

М.В. Головко, Л.В. Непорожня

# ФІЗИКА

# 8



М.В. Головка,  
Л.В. Непорожня

# ФІЗИКА

*Підручник для 8 класу  
закладів загальної середньої освіти*



Київ  
2021

УДК  
Г

**Головко М. В.**

Г      **Фізика : Підруч. для 8 класу закладів загальної середньої освіти / М. В. Головко, Л. В. Непорожня. — Київ : Педагогічна думка, 2021. — 280 с. : іл.**

ISBN

Підручник відповідає навчальній програмі з фізики для основної школи, затвердженої Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України (наказ МОН молоді та спорту України від 6 червня 2012 р. № 664 зі змінами, затвердженими наказом МОН України від 29 червня 2015 р. № 585). Головною метою підручника є сприяння розвитку учнів засобами фізики, формуванню в них предметної компетентності на основі фізичних знань, наукового світогляду й відповідного стилю мислення, розвитку експериментальних умінь, дослідницьких навичок, творчих здібностей і схильності до креативного мислення, усвідомлення необхідності вивчати фізику для розуміння навколишнього світу.

УДК

ISBN

© М. В. Головко, Л. В. Непорожня, 2016  
© Педагогічна думка, 2021

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
<b>Розділ 1. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА.....</b>	<b>9</b>
§ 1. Теплові явища та їх природа.....	10
§ 2. Агрегатні стани речовини.....	16
Виконуємо навчальний проект разом.....	22
§ 3. Тепловий стан тіла та температура. Вимірювання температури.....	24
Це цікаво.....	33
§ 4*. Залежність розмірів фізичних тіл від температури.....	34
§ 5. Внутрішня енергія тіла та способи її зміни.....	40
§ 6. Види теплообміну та їх використання в побуті й техніці	47
§ 7. Кількість теплоти. Питома теплоємність речовини.....	55
§ 8. Розрахунок кількості теплоти, яку отримує або віддає тіло під час теплового процесу.....	59
§ 9. Тепловий баланс.....	63
§ 10. Плавлення твердих тіл. Кристалізація.....	68
Вчимося розв'язувати фізичні задачі на теплові явища разом.....	74
Виявляємо предметну компетентність з теми «Внутрішня енергія. Кількість теплоти».....	78
§ 11. Випаровування рідини. Конденсація.....	81
§ 12. Кипіння рідини.....	86
§ 13. Розрахунок кількості теплоти при пароутворенні та конденсації.....	89
Виявляємо предметну компетентність з теми «Пароутворення і конденсація».....	94
§ 14. Розрахунок кількості теплоти, що виділяється внаслідок згоряння палива.....	96
§ 15. Перетворення енергії в механічних і теплових процесах. Принцип дії теплових машин.....	101



§ 16. Теплові двигуни. Двигун внутрішнього згорання . . . . .	107
Це цікаво. . . . .	112
§ 17. Екологічні проблеми використання теплових машин. . . . .	115
Вчимося розв'язувати фізичні задачі на теплові машини разом . . . . .	120
Виконуємо навчальний проект разом . . . . .	123
Виявляємо предметну компетентність з теми «Розрахунок кількості теплоти внаслідок згорання палива. Теплові машини» . . . . .	127
<b>Головне в розділі 1. . . . .</b>	<b>129</b>
<b>Розділ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. . . . .</b>	<b>132</b>
§ 18. Електричні явища. Електризація тіл . . . . .	133
§ 19. Закон Кулона . . . . .	140
§ 20. Електричне поле. . . . .	145
§ 21. Взаємодія заряджених тіл. Провідники та непровідники електрики. . . . .	148
Це цікаво. . . . .	154
§ 22. Дискретність електричного заряду. Електрон . . . . .	156
Це варто знати . . . . .	159
Вчимося розв'язувати фізичні задачі з теми «Електростатика» . . . . .	160
Виконуємо навчальний проект разом . . . . .	162
Виявляємо предметну компетентність з теми «Електростатика» . . . . .	162
§ 23. Електричний струм . . . . .	165
§ 24. Електричне коло та його основні елементи . . . . .	169
§ 25. Сила струму та її вимірювання. Амперметр . . . . .	176
§ 26. Електрична напруга та її вимірювання. Вольтметр . . . . .	181
§ 27. Електричний опір. Закон Ома для ділянки електричного кола. . . . .	186
§ 28. Розрахунок опору провідника. Питомий опір . . . . .	192
Це цікаво. . . . .	199

Вчимося розв'язувати фізичні задачі з теми «Сила струму. Електрична напруга та опір» . . . . .	200
Виявляємо предметну компетентність з теми «Сила струму. Електрична напруга та опір» . . . . .	202
§ 29. Послідовне з'єднання провідників . . . . .	205
§ 30. Паралельне з'єднання провідників . . . . .	210
§ 31. Робота та потужність електричного струму . . . . .	215
§ 32. Закон Джоуля-Ленца . . . . .	219
§ 33. Лічильник електричної енергії . . . . .	226
Вчимося розв'язувати фізичні задачі з теми «З'єднання провідників. Робота, потужність електричного струму» . . . . .	229
Виявляємо предметну компетентність з теми «З'єднання провідників. Робота, потужність електричного струму» . . . . .	232
§ 34. Природа електричного струму в розчинах і розплавах електролітів . . . . .	234
§ 35. Електричний струм у газах . . . . .	242
Це цікаво . . . . .	249
Вчимося розв'язувати фізичні задачі з теми «Електричний струм у різних середовищах» . . . . .	250
Виявляємо предметну компетентність з теми «Електричний струм у різних середовищах» . . . . .	252
§ 36. Вплив електричного струму на організм людини . . . . .	254
Виконуємо навчальний проект разом . . . . .	260
<b>Головне у розділі 2 . . . . .</b>	<b>261</b>
Лабораторні роботи . . . . .	264

## ВСТУП

### *Слово до учнів*

Юні друзі! Набуті в курсі фізики сьомого класу знання про будову речовини, властивості механічного руху, особливості взаємодії тіл, види механічної енергії та її використання людиною, стануть надійним фундаментом для подальшого вивчення однієї з фундаментальних природничих наук, яка є основою сучасної техніки та технологій.

У восьмому класі ви поглиблюватимете знання про природні явища, дізнаєтеся про їх використання в побуті, науці та техніці, внесок видатних українських учених у розвиток світової науки. Основна увага в курсі фізики восьмого класу приділена вивченню теплових та електричних явищ. Визначні досягнення людства в цих галузях фізики забезпечили можливість розгортання наукових досліджень від надр нашої планети до далекого космосу, створення сучасних транспортних та енергетичних мереж, високотехнологічних виробництв, комфортних умов проживання й діяльності людини в різних кліматичних і погодних умовах. Вони утворюють основу різноманітних комп'ютерних систем: від вашого мобільного телефону чи планшета до центру управління космічними польотами.

У попередньому класі ви переконалися, що людина досліджує явища близького та далекого навколишнього світу завдяки спостереженням та експерименту, які і є основними методами фізики. Проте якими б досконалими не були сучасні пристрої та інструменти, успіх наукової справи значною мірою залежить від ініціативи дослідника, його цілеспрямованості та наполегливості. Так само успіхи у вивченні фізики визначаються не тільки зусиллями вчителя та якістю підручника, а передусім вашою допитливістю, прагненням та умінням творчо підходити до розв'язування тих чи інших задач, працювати самостійно та в команді з товаришами.

Тому важливе місце в курсі фізики восьмого класу належить навчальним проектам. Їх виконання потребуватиме від вас ретельного опрацювання матеріалу, розуміння фізичного змісту явищ та процесів, а також наполегливого творчого пошуку, як самостійного, так і колективного. Кожен виконаний проект стане міні-відкриттям, дасть можливість виявити уміння та навички розв'язувати різноманітні завдання, а також висловлювати

власне бачення поставленої проблеми та шляхів її вирішення, що знадобиться в майбутній навчальній, а згодом і професійній, діяльності.

Сподіваємося, що цей підручник буде вашим надійним помічником у виконанні цих нелегких завдань. Автори намагалися викласти навчальний матеріал таким чином, щоб, працюючи з ним, ви розвивали своє мислення, світогляд, формували власні оцінні судження. Сучасний підручник – це не єдине джерело знань про основи фізичної науки. Він є, скоріше, навігатором у організації навчання. Для виконання завдань та підготовки проектів ви можете користуватися додатковими джерелами, наприклад, електронними освітніми ресурсами.

Працюючи з підручником, пам'ятайте, що важливою є саме ваша наполегливість і систематичність роботи. Тому намагайтеся вдумливо читати матеріал параграфа, звертайте увагу на підсумки та узагальнення, виконуйте завдання для самоконтролю. Тож бажаємо вам успіхів у вивченні фізики й сподіваємося, що цей підручник допоможе в цьому.

*Автори*



## *Слово до вчителя*

Шановні колеги! Пропонований підручник реалізує зміст курсу фізики 8-го класу для загальноосвітніх навчальних закладів, визначений навчальною програмою для основної школи (7–9 кл.), затвердженою МОН України у 2012 р., зі змінами та доповненнями, внесеними у 2015 р. Навчальний матеріал підручника відібрано та структуровано відповідно до внесених змін, спрямованих на розвантаження базового курсу фізики та посилення його компетентнісної й діяльнісної спрямованості.

Методичний апарат підручника орієнтується на розвиток в учнів восьмого класу предметної компетентності з фізики, формування якої розпочалося в сьомому класі, а також формування природничо-наукової компетентності як ключової для освітньої галузі «Природознавство». З огляду на це підручник містить навчальний матеріал, спрямований на поглиблення знань основ фізичної науки, вправи та завдання на розвиток експериментальних і обчислювальних умінь і навичок учнів, формування науково-природничої картини світу, наукового світогляду й критичного мислення учнів.

Для забезпечення ширших можливостей використання підручника в організації диференційованого навчання систему вправ розподілено за рівнями, що відповідають визначеним критеріями оцінювання навчальних досягнень учнів.

З метою підготовки восьмикласників до майбутньої навчально-пізнавальної діяльності в старшій школі та свідомого вибору профілю навчання до підручника логічно включено приклади застосування фізичних знань, що вивчаються, в науці та техніці, різноманітних галузях діяльності людини.

Особливу увагу приділено організації підготовки та виконання учнями навчальних проектів як провідного виду пізнавальної діяльності, спрямованої на максимальний розвиток творчих здібностей, залученню школярів до продуктивної самостійної та колективної праці під керівництвом учителя. У підручнику пропонуються рекомендації щодо організації роботи над навчальними проектами та окреслюється коло основних навчально-наукових питань, що можуть стати предметом дослідження.

Сподіваємося, що цей підручник стане вам у пригоді під час побудови авторських методичних систем навчання фізики.

*Автори*

## Розділ 1

# ТЕПЛОВІ ЯВИЩА



Явища природи, з якими ви ознайомитеся в цьому розділі, є визначальними для підтримання життя на нашій планеті. Їх прояви створюють унікальні кліматичні умови, забезпечують розмаїття рослинного й тваринного світу. Використання знань про теплові явища з давніх часів давало людині можливість облаштовувати комфортні умови проживання в різноманітних куточках Землі, вберігатися від арктичного холоду та пустельної спеки. Дослідження теплових явищ і встановлення фізичних законів, на яких вони ґрунтуються, забезпечило створення різноманітних машин і механізмів, що є основою сучасного транспорту та виробництва.

Принцип дії двигунів автомобілів і кораблів, літаків і ракет, турбін електростанцій, кліматичних систем житлових будинків і супермаркетів ґрунтується на теплових явищах. Упродовж багатьох століть видатні дослідники природи створювали вчення про теплоту, основи якого викладені в цьому розділі. Ви ознайомитеся з такими поняттями, як тепловий рух, температура, внутрішня енергія тощо, з'ясуєте їхній фізичний зміст, особливості перебігу теплових явищ та їх використання в науці й техніці, перспективи подальших досліджень цієї важливої галузі сучасної фізики.



## § 1. Теплові явища та їх природа

- ▶ *Теплові явища в природі та житті людини*
- ▶ *Тепловий рух, його прояви та природа*

**ТЕПЛОВІ ЯВИЩА В ПРИРОДІ ТА ЖИТТІ ЛЮДИНИ.** Теплові явища є невід’ємною складовою природи. Вони виявляються у виверженні вулканів, утворенні льодовиків, забезпечують безперервний кругообіг води, підтримуючи життя на Землі. Зміни пір року та розмаїття рослинного і тваринного світу теж пов’язані з перебігом теплових явищ. Проте вони можуть спричиняти і потужні тайфуни, надмірні опади, повені, різке підвищення або зниження температури (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Теплові явища визначають розмаїття природи

Людина навчилася використовувати теплові явища для своїх потреб у побуті та на виробництві. Катання на лижах, приготування їжі, обігрів приміщень, використання автотранспорту, виплавлення металу — все це пов’язане з тепловими явищами. Принцип дії двигунів автомобілів і пароплавів, літаків та ракет, тепловозів, холодильників, кондиціонерів ґрунтується на теплових явищах. Вони стали також основою виробничих технологій (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Використання теплових явищ у побуті, виробництві, науці та техніці

Вивчати теплові явища людина почала ще з того часу, коли навчилася використовувати вогонь для приготування їжі та обігріву житла. Хоча зусиллями видатних фізиків досягнуто визначних успіхів у формуванні вчення про теплоту та його використанні в науці й техніці, цей напрям залишається одним із пріоритетних у сучасній фізиці. Над розробленням цієї проблематики у світі працюють потужні наукові колективи, до яких належать і науково-дослідні установи України: Інститут технічної теплофізики в Києві та Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркіна у Харкові.

**ТЕПЛОВИЙ РУХ, ЙОГО ПРОЯВИ ТА ПРИРОДА.** Досліджуючи теплові явища, вчені встановили, що вони зумовлені тепловим рухом частинок речовини (молекул). Під час нагрівання тіла інтенсивність теплового руху молекул речовини зростає, а у разі охолодження зменшується.

**Тепловим рухом називають безперервний хаотичний рух частинок речовини.**

Щоб спостерігати прояв теплового руху мікрочастинок речовини, виконаємо дослід. У склянку з чистою водою додамо декілька крапель забарвленої рідини, наприклад, чорнил. За деякий час помітимо, що вода в склянці поступово забарвлюється — відбувається явище дифузії (від лат. *diffusion* — поширення) (рис. 1.3, а). Дифузії можна спостерігати, зануривши в склянку з водою пакетик чаю (рис. 1.3, б).

**Дифузія — це явище взаємного проникнення молекул однієї речовини у проміжки між молекулами іншої в результаті теплового руху.**

Дифузія може відбуватися в газах, рідинах та твердих тілах. Явище дифузії поширене в природі, а також використовується під час виробництва різноманітних розчинів, барвників, клеїв, пластичних мас, сплавів. Сучасні технології дифузійного зварювання забезпечують отримання міцних і надійних з'єднань.

З досвіду ви знаєте, що чай заварюють у гарячій воді, а цукор у ній розчиняється значно швидше, ніж у холодній. Тобто **швидкість дифузії зростає з підвищенням температури**.

Найвищою є швидкість дифузії в газах. Наприклад, пахощі парфумів, бензину тощо досить швидко поширюються у повітрі

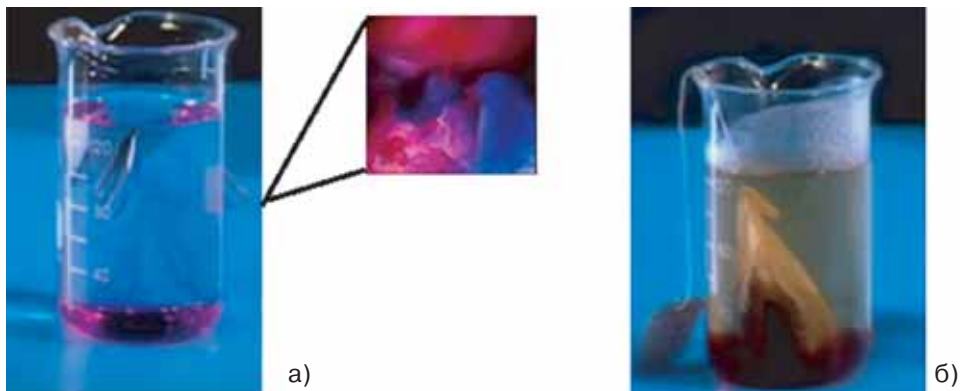


Рис. 1.3. Дифузія є експериментальним підтвердженням теплового руху



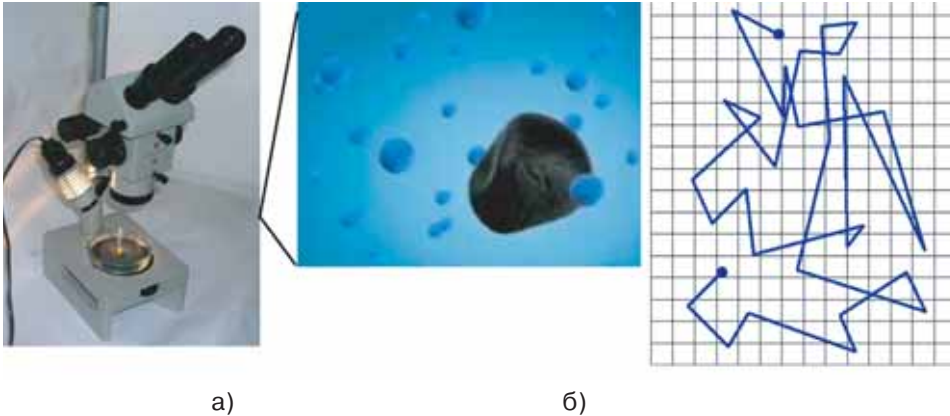


Рис. 1.4. Спостереження хаотичного теплового руху мікрочастинки

кімнати. Ця особливість може спричиняти й шкідливі наслідки. Зокрема, на хімічних виробництвах унаслідок дифузії в атмосфері поширюються шкідливі речовини. Тому для їх поглинання встановлюють спеціальні фільтри.

Досліди підтверджують, що внаслідок дифузії частинки речовини поширюються в усі боки однаково. Тобто *тепловий рух молекул речовини відбувається однаково в усіх напрямках*. При цьому він є неупорядкованим, або хаотичним (від грец. *chaos* — неупорядкована суміш). Хаотичність теплового руху мікрочастинки смоли можна спостерігати в мікроскоп. Унаслідок бомбардування частинки молекулами води вона починає рухатися (рис. 1.4, а). Оскільки тепловий рух молекул є хаотичним, то і напрям руху частинки смоли постійно змінюється і теж є хаотичним. Якщо зафіксувати початкове положення частинки смоли й позначати її переміщення через рівні проміжки часу, то отримаємо ламану лінію, що відповідає хаотичному тепловому руху мікрочастинки (рис. 1.4, б).

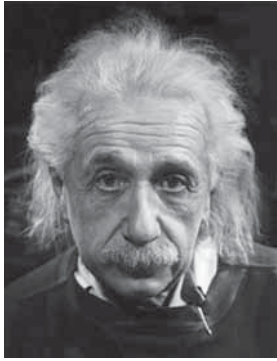
Тепловий рух завислих у рідині частинок уперше спостерігав та описав англійський ботанік Р. Броун.

Тому тепловий рух мікрочастинок, завислих у рідині або газі, називають **броунівським**. Під час броунівського руху молекули рідини або повітря зіштовхуються з мікрочастинкою, яка перебуває в завислому стані у рідині або газі. Молекули “штовхають” мікрочастинку з різних боків, і ці зіткнення не компенсуються,



Роберт Броун  
(1773—1858)  
Шотландський учений,  
який у 1827 р. відкрив  
тепловий хаотичний  
рух мікрочастинок  
речовини — явище  
броунівського руху

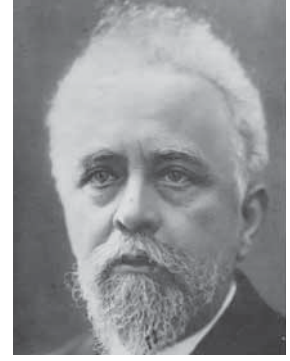




Альберт Ейнштейн  
(1879—1955)  
Видатний німецький та американський фізик-теоретик. Автор унікальних праць із теорії відносності, фотоелектричного ефекту, молекулярно-кінетичної теорії. Лауреат Нобелівської премії з фізики



Мар'ян Смолуховський  
(1872—1917)  
Видатний український та польський учений. Професор і ректор Львівського університету. Основоположник статистичної фізики



Жан Батист Перрен  
(1870—1942)  
Французький учений, який експериментально довів, що броунівський рух є наслідком теплового руху молекул середовища

позаяк їх кількість у кожний момент часу з кожного боку різна. У результаті частинка рухається в певному напрямі. Цей напрям постійно змінюється, оскільки молекули рухаються хаотично, а їх зіткнення з мікрочастинкою речовини мають випадковий характер. Мікрочастинки рухаються за рахунок теплового хаотичного руху молекул і не можуть бути зупинені. Інтенсивність броунівського руху зростає з підвищенням температури. Він є наочним підтвердження основних положень молекулярно-кінетичної теорії: *всі речовини складаються з частинок; частинки речовини перебувають у безперервному хаотичному русі; частинки речовини взаємодіють одна з одною.*

Наукові основи вчення про будову речовини та тепловий рух її частинок розвивали в своїх працях видатні учені: А. Авогадро, А. Лавуазьє, М. В. Ломоносов, Б. Румфорд, П. Деві. У 1905—1906 рр. великий німецький фізик А. Ейнштейн та український і польський учений М. Смолуховський розробили теорію руху броунівської частинки. Вони довели, що ці частинки рухаються як гігантські молекули, середня кінетична енергія яких дорівнює середній кінетичній енергії молекул, що їх оточують.

Французький учений Ж. Б. Перрен у 1908 р. виконав низку експериментальних досліджень броунівського руху і підтвердив молекулярно-кінетичну теорію Ейнштейна — Смолуховського.

### Головне в цьому параграфі

Тепловим рухом називають безперервний хаотичний рух частинок речовини.

Явище дифузії та броунівський рух є експериментальним підтвердженням теплового руху.

Дифузія відбувається внаслідок взаємного проникнення речовин у результаті теплового руху їх частинок.

Броунівський рух — тепловий рух мікрочастинок, завислих у рідині або газі.

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини: всі речовини складаються з частинок; частинки речовини перебувають у безперервному хаотичному русі; частинки речовини взаємодіють одна з одною.

### Запитання для самоперевірки

1. Наведіть приклади теплових явищ у природі.
2. Наведіть приклади нагрівання та охолодження тіл.
3. У чому полягає явище дифузії речовин? Наведіть приклади.
4. Як впливають зміни температури на дифузію речовин?
5. Які явища вказують на неупорядкованість та хаотичність руху частинок речовини?
6. Поясніть причину броунівського руху.
7. Які основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини підтверджуються броунівським рухом?

### Домашній експеримент

У чайну чашку налийте воду й обережно покладіть грудочку цукру. Залиште чашку на певний час, не перемішуючи рідину. Через 2—3 години візьміть воду з поверхні ложечкою й покуштуйте. Опишіть смак води. Поясніть, яке явище відбулося.

### Готуємося до виконання навчального проекту

Використовуючи науково-популярні джерела та інформаційно-пошукові системи, підготуйте інформацію на тему: “Видатні українські та зарубіжні вчені-фізики, які зробили вагомий внесок у розвиток учення про теплоту”.

### Вправа до § 1

- 1(п). Чи є неупорядкований рух порошинок у повітрі броунівським?
- 2(п). Чому пил може надовго зависати у повітрі?
- 3(с). Поясніть, чому використовувати фарбу дозволяється лише в добре провітрюваних приміщеннях.
- 4(с). Порівняйте швидкість руху молекул повітря та швидкість дифузії в повітрі. Поясніть відповідь.

- 5(д).** Лінійний розмір молекули білка становить  $40 \cdot 10^{-8}$  см. Визначте, яка кількість таких молекул може розміститися на відрізьку в 1 см за умови, що відстані між ними дорівнюють їхнім розмірам?
- 6(д).** Маса молекули води  $3 \cdot 10^{-26}$  кг. Визначте кількість молекул у  $60 \text{ см}^3$  води.

## § 2. Агрегатні стани речовини

- ▶ *Агрегатні стани речовини*
- ▶ *Фізичні властивості тіл та особливості їх молекулярної будови*
- ▶ *Кристалічні й аморфні тіла*

**АГРЕГАТНІ СТАНИ РЕЧОВИНИ.** Якщо вам на долоню потрапить сніжинка, вона швидко розтане й перетвориться в краплинку води, яка, у свою чергу, з часом може випаруватися. Ви, напевно, звернули увагу, що взимку поверхня річок та ставків вкрита кригою, а навесні лід тане. Влітку після дощу калюжі швидко висихають — вода випаровується і переходить у газоподібний стан. Отже, одна й та сама речовина — вода може перебувати в природі в різних станах залежно від умов (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Вода в природі перебуває в різних агрегатних станах

Не тільки вода, а й інші речовини можуть перебувати у твердому, рідкому та газоподібному стані. Ці три стани називають **агрегатними** (існує також четвертий стан речовини, з яким ви ознайомитеся при подальшому вивченні фізики, — плазма).

На відміну від води, агрегатні стани інших речовин у природних умовах спостерігати складніше. Наприклад, залізо в рідкому стані знаходиться в надрах землі, а рідка ртуть може перейти у твердий стан в умовах суворої зими.

Важливою особливістю всіх агрегатних станів є те, що будь-яка речовина зберігає в них притаманні їй властивості, оскільки *молекули однієї і тієї самої речовини незалежно від її агрегатного стану (твердого, рідкого чи газоподібного) нічим не різняться між собою*. Тобто лід і пара складаються з таких самих молекул води, хоча фізичні властивості речовини в різних агрегатних станах відрізняються.

**ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТІЛ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ МОЛЕКУЛЯРНОЇ БУДОВИ.** Фізичні властивості тіл у різних агрегатних станах визначаються особливостями їх молекулярної будови та пояснюються на підставі молекулярно-кінетичної теорії, з якою ви ознайомилися в попередньому параграфі. Важливо з'ясувати характер взаємодії, розміщення й теплового руху молекул у різних агрегатних станах.

Досліди підтверджують положення, що молекули одних і тих самих речовин у різних агрегатних станах не відрізняються одна від одної. Тобто *той чи інший агрегатний стан речовини визначається не особливостями самих молекул, а їх розміщенням, характером руху та взаємодії*.

Так, важливими фізичними властивостями **твердих тіл** є *збереження об'єму та форми*. Тверді тіла досить важко стискувати або розтягувати (рис. 2.2).

Властивість твердих тіл зберігати форму та об'єм визначається порівняно великим притяганням їх частинок. Мікročастинки більшості твердих тіл розміщені у певному порядку й утворюють кристалічну ґратку. Частинки твердих тіл хаотично коливаються навколо певних середніх положень рівноваги, які називають вузлами кристалічної ґратки. Значна потенціальна енергія їх взаємо-



Рис. 2.2. Щоб змінити форму залізної деталі, її попередньо сильно нагрівають та докладають значні зусилля

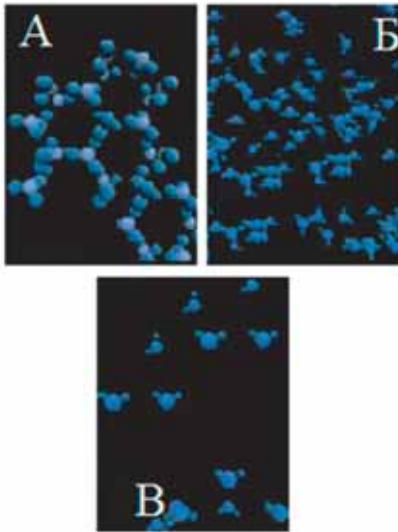


Рис. 2.3. Особливості розташування молекул однієї і тієї самої речовини у різних агрегатних станах



Рис. 2.4. Кристалічні тіла природної правильної форми

дії перешкоджає зміні середньої відстані між ними (рис. 2.3, А). Наслідком цього є збереження твердими тілами форми й об'єму.

Отже, *речовина перебуває у твердому стані тоді, коли середня потенціальна енергія взаємного притягання молекул значно більша від їхньої кінетичної енергії.*

Тверді тіла, атоми або молекули яких здійснюють теплові коливання біля вузлів кристалічної ґратки, називають **кристалічними** (від грец. *krystallos* — лід). Їх істотною ознакою є природна правильна геометрична форма, як, наприклад, у сніжинок та сталактитів (рис. 2.4).

Важливою особливістю кристалічних ґраток різних типів є чітка періодичність атомів у просторі. У кристалічних тілах існує так званий дальній порядок у розташуванні атомів. Прикладом кристалічного тіла є кухонна сіль (рис. 2.5).

Усі метали у твердому стані складаються з кристалів. *Важливою властивістю кристалічних тіл, є те, що вони перетворюються в рідину при певній фіксованій температурі.*

Інші фізичні властивості мають **аморфні** (від грец. *amorphos* — той, що без форми) тверді тіла. У них атоми або молекули коливаються відносно положень рівноваги, які, на відміну від кристалічних тіл, не зафіксовані у просторі. Для атомів аморфних тіл характерний так званий



ближній порядок. Прикладами таких тіл є смола, скло, бурштин (рис. 2.6).

*Аморфні тіла не мають певної фіксованої температури плавлення. З підвищенням температури вони поступово розм'якшуються, перетворюючись на в'язку рідину. Проте такий стан нестійкий, і через певний час речовина твердне. Характерними властивостями аморфних тіл є текучість і пластичність. Тому їх широко використовують для виготовлення різноманітних герметиків. Разом із тим аморфні тіла під час механічної дії на них легко розбиваються на частини довільної форми. Наприклад, скло, так само як і смола, у твердому стані легко руйнується.*

На відміну від твердих тіл **рідини** легко змінюють свою форму. Рідина набуває форми тієї посудини, в яку її наливають, але її об'єм при цьому залишається незмінним. Тобто *рідини зберігають об'єм, але легко змінюють форму* (рис. 2.7).

Молекулярна будова рідин має особливості. При нагріванні твердого тіла середня кінетична енергія молекул, які коливаються навколо певних положень рівноваги, збільшується. Коли температура тіла досягає температури плавлення, речовина починає переходити з твердого у рідкий стан.

Під дією зовнішньої сили (наприклад, сили тяжіння) рідина тече, зберігаючи об'єм, і набуває форми посудини. Фізичні властивості рідин пояснюються тим, що відстань між кожними двома молекулами менша, ніж їхні розміри. На таких відстанях сила притягання між молекулами має велике значення. Внаслідок цього молекули не можуть віддалятися одна від одної на значні відстані, тому рідина за звичайних умов зберігає об'єм (див. рис. 2.3, Б). Разом із тим сили притягання між молекулами недостатньо, щоб

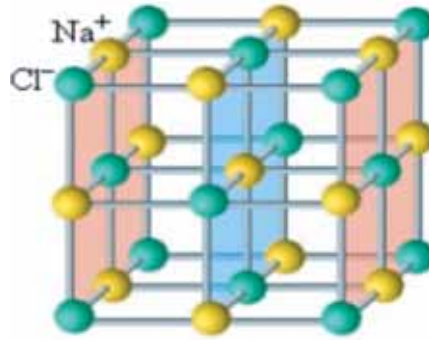


Рис. 2.5. Кристал кухонної солі



Рис. 2.6. Смола та бурштин є аморфними тілами



Рис. 2.7.  
Рідина набуває форму посудини





Рис. 2.8. Гази легко змінюють форму та об'єм

рідина зберігала форму, тому вона досить легко займає об'єм посудини.

Оскільки відстані між молекулами рідини вже достатньо малі, їх важко зменшити, тому рідини складно стискати. *Речовина перебуває в рідкому стані, коли середня кінетична енергія молекул стає сумірною із середньою енергією їх притягання.*

На відміну від рідин газ *повністю займають ту чи іншу ємність, змінюючи форму й об'єм.* Одна й та сама маса газу може займати різні об'єми (рис. 2.8).

Молекулярна будова газів визначає їхні властивості цілком заповнювати наданий їм об'єм. При нагріванні рідини швидкість молекул може збільшитися настільки, що стане достатньою для подолання сил притягання між молекулами. Рідина переходить у газоподібний стан.

*Речовина перебуває в газоподібному стані, коли середня кінетична енергія молекул переважає їхню середню потенціальну енергію.*

Оскільки газ легко стискається, між його молекулами мають бути відстані, що перевищують їх розміри. Середня відстань між молекулами в газах приблизно в 10 разів більша, ніж у рідинах і твердих тілах (див. рис. 2.3, В). На таких відстанях молекули досить слабо притягуються одна до одної, а отже, газ *не мають власної форми та сталого об'єму.* Саме тому неможливо заповнити газом половину ємності. Молекули газу рухаються однаково хаотично в різних напрямках і майже не взаємодіють одна з одною. При цьому газ швидко заповнює всю ємність. Власний об'єм молекул газу в посудині дорівнює приблизно тисячній частці її об'єму.

**Головне в цьому параграфі**

Одна й та сама речовина може перебувати у різних агрегатних станах. Її молекули у твердому, рідкому і газоподібному стані нічим не відрізняються між собою. Різні агрегатні стани речовини визначаються характером руху та взаємодії її молекул.

Збереження об'єму та форми є важливими фізичними властивостями твердих тіл. Рідини зберігають об'єм, але легко змінюють форму. Гази не мають сталого об'єму та власної форми й цілком заповнюють надану їм ємкість.

Речовина перебуває у твердому стані, коли середня потенціальна енергія взаємного притягання молекул значно більша від їхньої кінетичної енергії.

Тверді тіла, у яких атоми або молекули здійснюють теплові коливання біля положень рівноваги (вузлів кристалічної ґратки), називають кристалічними. При певній фіксованій температурі вони перетворюються в рідину, не розм'якшуючись перед цим.

В аморфних тілах стани рівноваги, навколо яких коливаються атоми або молекули, не зафіксовані у просторі. Аморфні тіла не мають певної фіксованої температури плавлення. З підвищенням температури вони поступово розм'якшуються, перетворюючись на в'язку рідину.

Якщо середня кінетична енергія молекул стає сумірною із середньою енергією їх притягання, то речовина переходить у рідкий стан.

Речовина перебуває в газоподібному стані, коли середня кінетична енергія молекул переважає їхню середню потенціальну енергію.

**Запитання для самоперевірки**

1. Наведіть приклади одних і тих самих речовин у різних агрегатних станах.
2. Чи відрізняються молекули води в різних агрегатних станах? Поясніть відповідь.
3. Назвіть спільні та відмінні фізичні властивості тіл у твердому, рідкому та газоподібному станах.
4. Поясніть, чому важко змінити форму твердого тіла.
5. До яких тіл, твердих чи рідких, належать аморфні тіла?
6. Які речовини краще стискаються: рідини чи гази? Поясніть.
7. На підставі яких положень молекулярно-кінетичної теорії будови речовини можна пояснити властивість газів повністю займати весь об'єм?

**Домашній експеримент**

Візьміть порожню пластикову пляшку з-під води. Закрийте її щільно кришечкою і покладіть у холодильник (або в морозильник). Вийміть пляшку через 2—3 години. Які зміни відбулися з нею? Поясніть побачене.

## Вправа до § 2

- 1(п). Поясніть, у якому агрегатному стані перебуває речовина, якщо зберігається її об'єм, але змінюється форма.
- 2(п). Поясніть, у якому агрегатному стані перебуває речовина, якщо її об'єм та форма зберігаються.
- 3(с). Поясніть, чому алюмінієву дротину простіше розділити багатозначним згинанням, ніж розірвати.
- 4(с). Чи можна сказати, що в кімнаті під стелею повітря менше, ніж біля підлоги?
- 5(д). Поясніть, чи можна ємкість наповнити газом на 50 %.
- 6(д). Через мікроскопічні щілини з балона зі стисненим газом щосекунди виходить 5 млрд молекул. Маса кожної молекули  $5 \cdot 10^{-23}$  г. Визначте, через який час маса балона з газом зменшиться на 1 мг.
- 7(в). Деякий газ перетворили на рідину внаслідок сильного охолодження. При цьому об'єм газу зменшився в 700 разів. Визначте, яку частину об'єму газу становив об'єм його молекул.

### ВИКОНУЄМО НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЕКТ РАЗОМ

Шановні друзі! Ви ознайомилися з фізичними властивостями тіл у різних агрегатних станах. Досягнення фізики в галузі молекулярно-кінетичної будови тіла дали можливість створити речовини з унікальними властивостями, які утворюють основу сучасної техніки та технології. Пропонуємо і вам долучитися до цього процесу й виконати навчальний проект, в якому дослідити фізичні властивості та використання рідких кристалів, полімерів або наноматеріалів.

Щоб навчальний проект став вашим справжнім маленьким відкриттям, ретельно сплануйте його виконання та дотримуйтеся встановленого графіка роботи. Обговорюйте всі питання, що виникають, з учителем і товаришами. Зверніть увагу: навчальний проект виконується в декілька етапів, кожний із яких є важливим.

На **першому етапі** доцільно проаналізувати проблему та визначити найпринциповіші питання, що потребують вивчення, а також джерела інформації, в яких вони висвітлюються. Важливо конкретизувати завдання та розподілити їх між окремими учнями, якщо проект виконується колективно.

На **другому етапі** збирають інформацію з проблеми проекту, аналізують різноманітні джерела, пропонують власні ідеї та обговорюють ідеї інших учасників. Попередні результати можна обговорити з учителем.

На **третьому етапі** оформляються отримані результати та готується презентація проекту. Завершується проект захистом, час та форма якого узгоджуються з учителем.

Пропонуємо окремі основні питання з теми навчального проекту, на які доцільно звернути увагу в процесі його виконання.

## 1. РІДКІ КРИСТАЛИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ.

Речовини, які можуть перебувати в проміжному (між твердим та рідким) агрегатному стані, називають *рідкими кристалами*. Фізичні властивості таких речовин визначаються істотними силами взаємодії між молекулами, що забезпечує збереження сталого об'єму та поєднання властивостей твердих тіл і рідин, високу чутливість до температури, тиску, електричного й магнітного полів. Під зовнішніми впливами рідкі кристали можуть змінювати свої характеристики (наприклад, колір, електропровідність), тому їх використовують під час виготовлення дисплеїв різноманітних цифрових пристроїв та електронних датчиків. Рідкі кристали дають можливість створювати надтонкі й гнучкі пристрої, але їхнім недоліком є помітна уразливість щодо механічних пошкоджень (рис. 2.9).

Цікаво, що такі біологічні речовини, як дезоксирибонуклеїнова кислота, що несе код спадкової інформації, і речовина мозку, теж є рідкими кристалами.

Тому одним із перспективних напрямів є використання рідких кристалів у медицині.

В Україні дослідження рідких кристалів розпочалися із середини 1980-х років у Інституті фізики НАН України. На початку 1990-х років тут був відкритий ефект «фотоорієнтації» рідких кристалів світлочутливими полімерами, що забезпечило нові можливості їх використання в науці та техніці. Сьогодні у відділі фізики кристалів Інституту фізики НАН України тривають фундаментальні теоретичні та експериментальні дослідження властивостей рідких кристалів.

## 2. ПОЛІМЕРИ.

Особливі властивості мають природні та штучні сполуки з великою кількістю повторювань однакових або різних атомів, з'єднаних у довгі ланцюги, — полімери (рис. 2.10). Їхня здатність до відновлення форми після значних деформацій, низька крихкість, електро- та теплоізоляційні властивості, висока стійкість в агресивних середовищах забезпечують широке використання в техніці та побуті. Одним із недоліків полімерів є старіння.



Рис. 2.9. Майбутнє цифрової електроніки за гнучкими надтонкими рідкокристалічними дисплеями

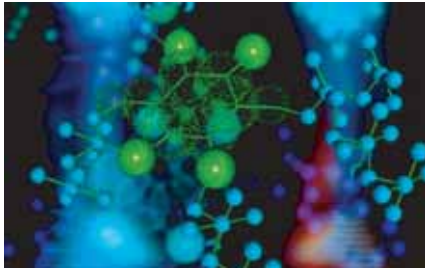


Рис. 2.10. Молекула водорозчинного полімеру

Природні полімери — білки, відіграють важливу роль у життєдіяльності живих організмів. Перспективним напрямом застосування полімерів є їх використання як біосумісних матеріалів для імплантатів (біосумісність — це властивість матеріалу «вбудовуватися» в тканини організму, не викликаючи побічних негативних проявів).

**3. НАНОМАТЕРІАЛИ.** Основою сучасних технологій стають наноматеріали — речовини, молекули яких не перевищують за розмірами 1 нм ( $10^{-9}$  м): фулерени, нанотрубки та нановолокна, нанопористі структури, нанодисперсії, наноплівки. Нанокристалічні матеріали набувають поширення завдяки унікальним тепловим, електричним, магнітним властивостям.

Наноматеріали є основою для технологій, що дають можливість обробляти речовини в діапазоні розмірів, які не перевищують товщину волосини, та створювати об'єкти з новими хімічними, фізичними й біологічними властивостями.

Українські вчені активно працюють у напрямі дослідження наноматеріалів. Наприклад, науковці відділу фізико-неорганічної хімії Інституту загальної і неорганічної хімії ім. В. Вернадського НАН України розробляють технологію створення вуглецевих самозбірних наноматеріалів.

### § 3. Тепловий стан тіла та температура. Вимірювання температури

- ▶ *Тепловий стан тіла та температура*
- ▶ *Теплообмін тіл і теплова рівновага*
- ▶ *Вимірювання температури*

**ТЕПЛОВИЙ СТАН ТІЛА ТА ТЕМПЕРАТУРА.** Згідно з основними положеннями молекулярно-кінетичної теорії будови речовини, її частинки перебувають у постійному хаотичному русі та взаємодії. Інтенсивність руху частинок тіла визначається ступенем його нагрітості або тепловим станом. *Тепловий стан тіла залежить від теплового руху його мікрочастинок. Чим вища швидкість хаотичного руху молекул, атомів та інших мікрочастинок тіла, тим більш нагрітим воно буде, і навпаки.*

Зміна теплового стану тіла призводить до зміни його фізичних властивостей. Так, нагріте до високої температури залізо стає ков-

ким, а охолодження аморфних тіл робить їх крихкими. Рідина, що кипить, перетворюється на пару, яка не зберігає форми та займає весь наданий об'єм.

Об'єктивна оцінка теплового стану тіл важлива як на виробництві, так і в побуті. З досвіду ви знаєте, людина здатна оцінювати теплові стани за власними відчуттями, як правило, на дотик: чашка з кавою гаряча, снігова грудка холодна тощо. Щоправда, така оцінка буде досить відносною, адже відчуття можуть не повністю відповідати справжньому станові. Наприклад, опускаючи змерзлі руки у воду, досить складно зробити висновок, наскільки вона нагріта. Крім того, якщо необережно доторкнутися до посудини на розігрій плиті, можна отримати опіки.

Тому для достатньо точного опису теплового стану тіла використовують кількісну міру його нагрітості, яку називають *температурою*.

Спостереження дифузії показують, що швидкість руху частинок речовини залежить від температури. Але як співвідносяться швидкості теплового руху частинок різних речовин при одній і тій самій температурі? З'ясувалося, що за певної температури речовини однаковими є не середні швидкості руху молекул або атомів, а середні значення їх кінетичних енергій. У частинок із порівняно малими масами (наприклад, атоми або молекули водню, гелію) швидкості теплового руху більші. У частинок із більшою масою (наприклад, молекули кисню або води) швидкості теплового руху менші.

Отже, температура тіла безпосередньо пов'язана з тепловим рухом мікрочастинок речовини, зокрема з їхньою кінетичною енергією, що припадає в середньому на одну частинку. *Чим вища температура тіла, тим більша середня кінетична енергія його мікрочастинок, і навпаки.*

**Температура — це фізична характеристика теплового стану речовини, що визначається середньою кінетичною енергією хаотичного руху її частинок.**

Молекули та атоми нагрітішого тіла мають більшу середню кінетичну енергію теплового руху порівняно з молекулами й атомами менш нагрітого тіла. Так, молекули води кімнатної температури взимку рухаються значно швидше, ніж молекули води в річці під кригою.

**ТЕПЛОБМІН ТІЛ І ТЕПЛОВА РІВНОВАГА.** З досвіду ви знаєте, що чашку з щойно приготованим чаєм ставлять на блюдце, аби не зіпсувати поверхню столу внаслідок її різкого нагрівання. Гаряча чашка передає своє тепло поверхні столу, на якій сто-



їть. Крижана бурулька швидко тоне в руках, які водночас охолоджуються. Тобто більш нагріті тіла віддають тепло менш нагрітим і при цьому охолоджуються — між тілами відбувається теплообмін.

*Під час теплообміну більш нагріті тіла віддають тепло менш нагрітим. При цьому кінетична енергія хаотичного руху молекул або атомів, а отже, і температура перших знижується (вони охолоджуються), а других — підвищується (вони нагріваються).*

У природі процеси теплообміну, під час яких теплота переходить від більш нагрітих до менш нагрітих тіл, відбуваються постійно. За звичайних умов теплота самочинно не може переходити від менш нагрітих до більш нагрітих тіл. Гарячий чай у чашці через деякий час самочинно охолоджується до кімнатної температури, але не може самостійно нагрітися. Саме по собі тіло з вищою температурою не може нагрітися за рахунок охолодження тіла з нижчою температурою. Для цього потрібно виконати роботу. Така робота виконується під час охолодження продуктів у холодильнику. Температура продуктів, які кладуть до холодильника, поступово знижується до температури холодильної камери. З часом унаслідок теплообміну температура всередині холодильної камери дещо підвищується. Для підтримання певної температури в холодильній камері холодильник оснащують термореле, яке вмикає двигун холодильника у разі підвищення температури. Двигун працює доти, доки температура всередині холодильної камери знизиться до заданого значення, необхідного для зберігання продуктів.

*Якщо тіла мають різну температуру, то самочинний обмін теплотою між ними відбувається в чітко визначеному напрямі:*

*від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою.*

У зворотному напрямі самочинний обмін теплотою не відбувається.

У три однакові склянки налємо порівну води різної температури: кімнатної, нагрітої в чайнику та охолодженої в холодильнику (рис. 3.1, а).

Через певний час порівняємо тепловий стан води в кожній посудині. Помітимо, що температура води в усіх склянках буде однаковою, тобто встановиться теплова рівновага (рис. 3.1, б).

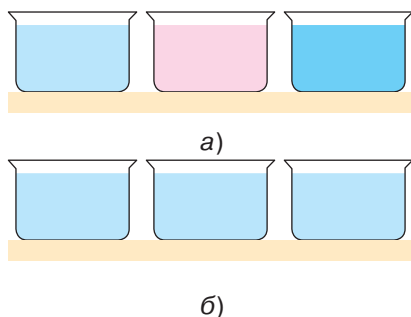


Рис. 3.1. Через певний час температура води в склянках стане однаковою, тобто встановиться теплова рівновага

Тіла з різною температурою, що перебувають у певному обмеженому просторі, з часом самочинно переходять у стан теплової рівноваги — їх температури зрівнюються.

*Будь-яке тіло або система тіл, що перебувають в обмеженому просторі, з часом самочинно переходять у стан, за якого всі частини тіла або всі тіла системи мають однакову температуру, тобто у стан теплової рівноваги.*

Молекули гарячого тіла мають більшу кінетичну енергію поступального руху, тому рухаються швидше, ніж молекули холодного тіла. Під час контакту тіл (дотику твердих тіл або змішування рідин і газів) швидші молекули гарячого тіла співударяються з повільнішими молекулами холодного тіла й віддають їм частину своєї кінетичної енергії, починаючи рухатися повільніше. Середня кінетична енергія хаотичного руху частинок усіх тіл, що взаємодіють і перебувають у стані теплової рівноваги, стає однаковою.

**ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.** Теплові явища та процеси відіграють важливу роль у житті й діяльності людини. Тому постійно виникає потреба визначати теплові стани різноманітних тіл та їх систем. Як це можна зробити? Насамперед вимірюючи таку важливу кількісну характеристику теплового стану, як температура. Вам, напевне, доводилося вимірювати температуру власного тіла, повітря в кімнаті та на вулиці. Потрібно вимірювати температуру всередині газового духового шкафа чи електричної плити для вибору оптимального режиму приготування страв, температуру води в системі охолодження теплових двигунів, температуру, при якій відбуваються різні технологічні процеси.

Вимірювати температуру навчилися раніше, ніж з'ясували її фізичний зміст. Для вимірювання використовують спосіб, який ґрунтується на *залежності певних властивостей тіла від зміни його температури.*

Важливе правило вимірювання температури впливає з умови теплової рівноваги: потрібний деякий час для встановлення теплової рівноваги між термометричним тілом і тілом, температуру якого вимірюють.

Прилади, використовувані для вимірювання температури шляхом контакту з досліджуваним середовищем, називають *термометрами.*

Перший прилад для оцінювання температури — термоскоп — сконструював видатний італійський учений Галілео Галілей у 1592 р. Термометричним тілом у термоскопі було повітря. Тер-



Андерс Цельсій  
(1701—1743)

Видатний шведський фізик та астроном. У 1742 р. сконструював перший рідинний термометр

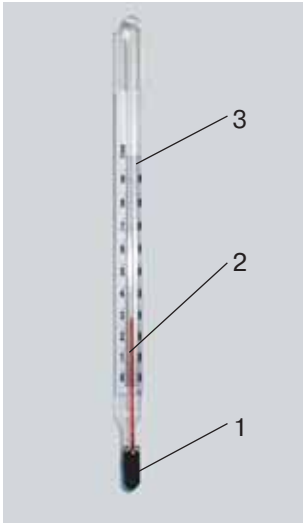


Рис. 3.2. Будова рідинного термометра

москоп Г. Галілея був дуже чутливим до зміни температури, але оскільки прилад не мав шкали, він не використовувався для кількісних вимірювань.

Найпоширеніші, зокрема у побуті, рідинні термометри. Вони досить прості за конструкцією та зручні у використанні. В основу принципу дії рідинного термометра шведський учений А. Цельсій поклав властивість рідини змінювати свій об'єм залежно від температури (під час нагрівання розширюватися, а під час охолодження стискатися).

У 1742 р. А. Цельсій створив прилад, який назвали термометром. Рідинний термометр складається з невеликого резервуара (скляної колбочки) 1, заповненого рідиною (наприклад, спиртом, пентаном, толуолом). Резервуар з'єднаний зі скляною капілярною трубкою 2, запаяною згори. Трубка кріпиться до температурної шкали 3 (рис. 3.2).

Для зменшення зовнішніх впливів елементи термометра вміщують у прозорий корпус. Рідинні термометри можна застосовувати для вимірювання діапазону температур, за яких рідина зберігає свої властивості. Крім того, висота підняття стовпчика рідинного термометра залежить від властивостей самої рідини та скла, з якого виготовлено трубку. З огляду на це, наприклад, вода практично не використовується як термометричне тіло, оскільки замерзає при температурі  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  і закипає при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тривалий час для побутових і технічних потреб використовували ртутні термометри. Діапазон вимірюваних ними температур значно ширший. Зокрема, ртутним термометром можна вимірювати температури до  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температура тверднення ртуті).

Розглянемо принцип вимірювання температури рідинним термометром. Під час контакту резервуара, де міститься рідина (термометричне тіло), з тілами, температуру яких потрібно виміряти (тілом людини, повітрям у кімнаті), температура рідини поступово збільшуватиметься. Внаслідок теплового розширення зростати-

ме її об'єм: стовпчик рідини в капілярній трубці підніматиметься. Якщо потім термометр залишити на столі, він почне охолоджуватися до кімнатної температури. Температура рідини, а отже, і її об'єм, зменшуватиметься. Стовпчик рідини опускатиметься. Збільшення та зменшення температури рідини термометра, а також її об'єму відбувається поступово — потрібен певний час для встановлення теплової рівноваги між тілом і термометром.

*Термометри показують власну температуру. Для вимірювання температури тіла потрібно забезпечити контакт між ним і термометром протягом певного часу, поки встановиться теплова рівновага і температура рідини термометра зрівняється з температурою тіла.*

Тільки через певний час після встановлення теплової рівноваги температура, яку показує термометр, зрівнюється з температурою навколишнього середовища. Тобто термометрам властива певна інерційність.

На практиці застосовують різні види термометрів. У них використовуються різні термометричні тіла, а також залежність властивостей тіла від температури, наприклад, зміна об'єму тіла або електричного опору. Для вимірювання температури повітря в кімнаті використовують рідинні термометри (рис. 3.3, а), температур у котлах опалення та духовках кухонних плит — металеві термометри (рис. 3.3, б). Термометричним тілом тут є біметалева пластинка у вигляді спіралі зі стрілкою.

Для технічних потреб використовують також електричні термометри, принцип дії яких ґрунтується на вимірюванні залежності електричного опору тіла від температури. Дедалі більшого поширення набувають електронні термометри з цифровою індикацією (рис. 3.3, в), які можна застосовувати й для вимірювання температури власного тіла. Це мініатюрні пристрої, чутливі до найменших змін температури. Вимірювання температури інфрачервоними термометрами не потребує їх безпосереднього контакту з тілами (рис. 3.3, г). Достатньо зручними у використанні є високочутливі смужкові термометри для вимірювання температури тіла людини (рис. 3.3, д).

Оскільки температура є кількісною характеристикою, замало зафіксувати зміни рівнів стовпчика рідини термометра. Потрібно поставити їм у відповідність числові значення, які залежали б не від особливостей вимірювання, а лише від температури тіла, тобто *проградуювати температурну шкалу*. З цією метою на ній вибирають дві фіксовані (так звані реперні) точки, що відповідають значенням температури, які легко відтворюються і за якими можна перевіряти точність термометрів і порівнювати їх між собою. Температурну шкалу, використововану в сучасних рідинних термометрах, запропонував шведський учений А. Цельсій у 1742 р.

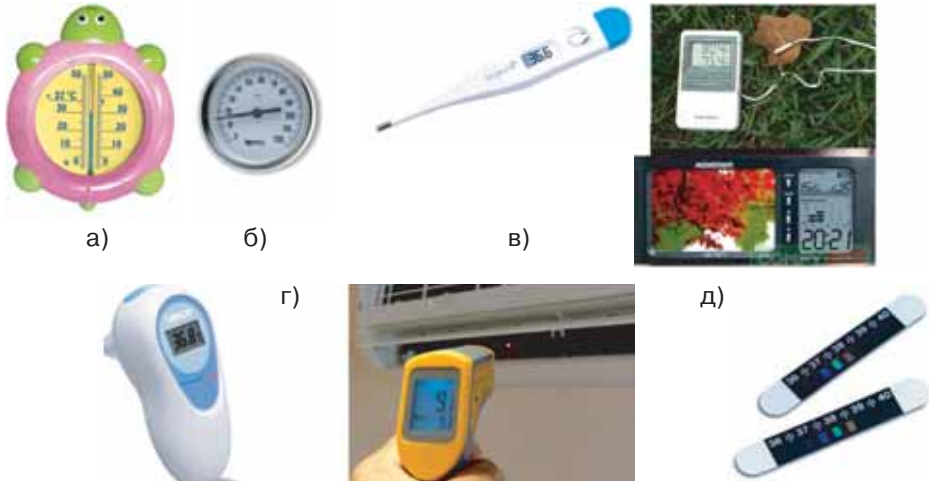


Рис. 3.3. Термометри різних типів

За фіксовані точки температурної шкали він узяв точки, що відповідають температурам *танення льоду (замерзання води)* та *кипіння води* за нормального тиску (1 атмосфера, що відповідає 760 мм рт. ст., або 101 292,8 Па). Інтервал між фіксованими точками Цельсій поділив на 100 однакових частин і встановив розмір одиниці температурної шкали — *градус* (рис. 3.4).

На честь ученого одиниці температури назвали градусами Цельсія. Виміряні значення температури позначають значком °C (наприклад, 22 °C — 22 градуси Цельсія).

*Одиниця вимірювання температури 1 °C (один градус Цельсія) — це одна сота температурного інтервалу між температурою плавлення льоду та температурою кипіння дистильованої води за нормального атмосферного тиску.*

Раніше використовувалася шкала Реомюра, запропонована французьким природодослідником Р. Реомюром у 1730 р. Температура танення льоду за цією шкалою 0 °R, а кипіння води 80 °R.

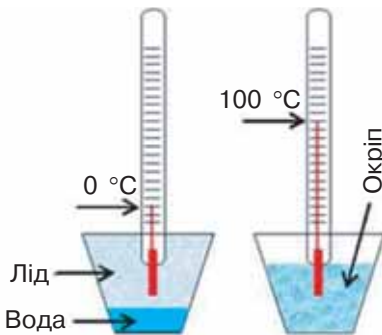


Рис. 3.4. Градування шкали рідинного термометра

У окремих країнах світу (наприклад, Англії та Сполучених Штатах Америки) дотепер використовується температурна шкала Фаренгейта, яку запропонував німецький фізик Д. Фаренгейт у 1714 р. За шкалою Фаренгейта температура танення льоду 32 °F, температура людського тіла 98 °F, а температура кипіння води 212 °F.

У 1848 р. англійський фізик **В. Томсон (лорд Кельвін)** запропонував так звану *термодинамічну шкалу температур* (її також називають абсолютною).

За цією шкалою відлік температури починають від абсолютного нуля — гранично низької, недосяжної температури (за якої мав би повністю припинитися хаотичний рух молекул). Поблизу абсолютного нуля частинки речовини здійснюють так звані нульові коливання, енергія яких не залежить від температури.

Одиницею термодинамічної шкали температур є **Кельвін**.

*За основну одиницю температури Міжнародної системи одиниць (СІ) прийнято Кельвін (К). Інтервал температур 1 кельвін дорівнює інтервалу температур 1 градус Цельсія:*

$$1 \text{ К} = 1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Нульовий рівень абсолютної шкали температур прийнято за  $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура плавлення льоду або замерзання води ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) за абсолютною шкалою температур дорівнює  $273,15 \text{ К}$ .

*Шкала Цельсія та термодинамічна шкала зміщені між собою на  $273,15 \text{ К}$ . Тобто:*

$$T_{\text{К}} = t \text{ }^\circ\text{C} + 273,15 \text{ К}.$$

де  $t \text{ }^\circ\text{C}$  — температура за шкалою Цельсія;  $T_{\text{К}}$  — температура за шкалою Кельвіна (термодинамічною шкалою).

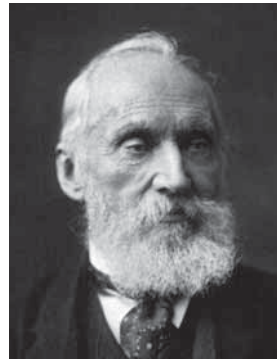
### Головне в цьому параграфі

Тепловий стан тіла залежить від теплового руху його мікрочастинок. Чим більша швидкість хаотичного руху молекул, атомів та інших мікрочастинок тіла, тим нагрітішим воно буде, і навпаки.

Температура — фізична характеристика теплового стану речовини, з якої складається тіло, що визначається середньою кінетичною енергією хаотичного руху частинок речовини.

Під час теплообміну більш нагріті тіла віддають тепло менш нагрітим. При цьому кінетична енергія хаотичного руху молекул або атомів, а отже, і температура перших знижується (вони охолоджуються), а других — підвищується (вони нагріваються). У природі під час теплообміну теплота переходить від більш нагрітих до менш нагрітих тіл. За звичайних умов теплота самочинно не може переходити від менш нагрітих до більш нагрітих тіл.

Тіла з різною температурою, що перебувають у певному обмеженому просторі, з часом самочинно переходять у стан теплової рівноваги, тобто їхні температури стають однаковими.



Вільям Томсон, лорд Кельвін (1824—1907)  
Видатний англійський фізик, відомий фундаментальними працями з термодинаміки



Температуру вимірюють спеціальними приладами — термометрами, що показують власну температуру. Для вимірювання температури тіла потрібно забезпечити контакт між ним і термометром протягом певного часу, поки встановиться теплова рівновага і температура рідини термометра зрівняється з температурою тіла.

За основну одиницю температури Міжнародної системи одиниць (СІ) прийнято Кельвін (К); інтервал температури  $1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

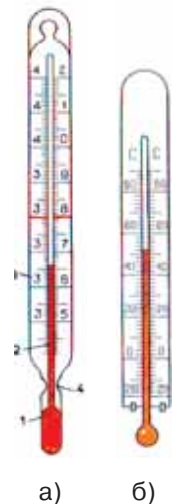
Шкала Цельсія та термодинамічна шкала зміщені між собою на 273,15 К. Тобто:  $T_{\text{к}} = t \text{ }^\circ\text{C} + 273,15 \text{ К}$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Поясніть, якими характеристиками мікрочастинок речовини визначається тепловий стан тіла.
2. Чим можна пояснити, що за однієї й тієї самої температури атоми та молекули різних речовин мають різні середні швидкості теплового руху?
3. Який фізичний зміст поняття «температура»?
4. Поясніть, що означає теплова рівновага з позицій молекулярно-кінетичної теорії.
5. За яких умов можуть відбуватися процеси, коли менш нагріті тіла віддають теплоту більш нагрітим?
6. Які теплообмінні процеси відбуваються в чашці з гарячим чаєм, до якого додали лід із холодильника?
7. Який принцип покладено в основу дії термометрів?
8. Що є одиницею температурної шкали Цельсія?

### Вправа до § 3

- 1(п). Поясніть поширення в повітрі запахів бензину, диму, нафталіну, парфумів та інших пахучих речовин.
- 2(п). Запропонуйте методи прискорення дифузії речовин.
- 3(с). Чи може перебувати в тепловій рівновазі з навколишнім середовищем вода у водоймі?
- 4(с). Відкриту посудину з водою зрівноважено на терезах. Чому з часом рівновага терезів порушилася?
- 5(д). Визначте, у скільки разів середня швидкість теплового руху молекули водню більша за середню швидкість молекули гелію за однієї і тієї самої температури, якщо маса молекули гелію вдвічі більша за масу молекули водню.
- 6(д). Унаслідок нагрівання певного газу середня швидкість руху його молекул збільшилася втричі. Визначте, у скільки разів змінилася кінетична енергія поступального руху його молекул.
- 7(д). Розгляньте рисунок, на якому зображено медичний термометр (рис. а) та побутовий термометр (рис. б).



Визначте межі вимірювання цих термометрів та їхні покази. Спробуйте пояснити, яка особливість будови медичного термометра забезпечує точне визначення температури тіла людини навіть через деякий час після того, як припиняють вимірювання.

- 8(д).** Чи можна звичайним ртутним термометром виміряти температуру краплини води. Відповідь поясніть.
- 9(в).** Температура речовини збільшилася від 25 до 75 °С. Визначте, у скільки разів змінилася середня кінетична енергія частинок цієї речовини.
- 10(в).** Визначте середню швидкість теплового руху молекули водню та води за температури 20 °С, якщо середня швидкість теплового руху молекул кисню за цієї температури становить 478 м/с.

### Це цікаво\*

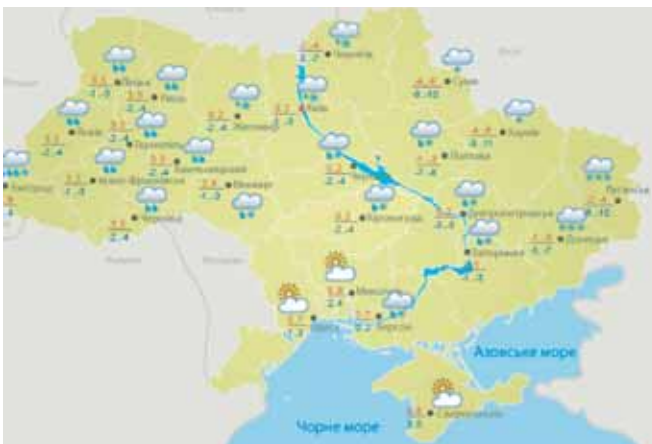
#### ТЕМПЕРАТУРНІ РЕКОРДИ В УКРАЇНІ, СВІТІ ТА ВСЕСВІТІ

Абсолютний максимум температури повітря в Україні, який становив +42 °С, був зафіксований 12 серпня 2010 р. на метеостанції в Луганську.

Максимальну температуру + 80 °С, до якої прогрівалася поверхня ґрунту, було зафіксовано 2 червня 1995 р. на метеостанції Вознесенськ (Миколаївська область). Абсолютний мінімум температури повітря –41,9 °С спостерігався 8 січня 1935 р. в Луганську. Найнижчу температуру на поверхні ґрунту –46 °С було зафіксовано 31 січня 1987 р. на метеостанції Куп'янськ (Харківська область).

Найхолодніше місце Землі розташоване на її Південному полюсі, у центрі Антарктики. 10 серпня 2010 р. за допомогою супутникових інфрачервоних датчиків тут було зафіксовано температуру –93,2 °С. Найвища температура повітря +70,7 °С була зафіксована в серпні 2005 р. у пустелі на півдні Ірану.

Температура сонячної поверхні становить близько +6000 °С. У надрах Сонця температура сягає +15 000 000 °С. Одним із найхолодніших місць у Сонячній системі є темний бік Місяця, у кратерах якого температура не піднімається вище –238 °С.



\* <https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/records/>

Учені доводять, що в момент Великого вибуху температура Всесвіту становила приблизно  $+4\,000\,000\,000\text{ }^\circ\text{C}$ . Найхолоднішим об'єктом Всесвіту, відкритим на сьогодні, вважається Туманність Бумеранга в сузір'ї Кентавра, розташована від Землі на відстані 5000 світлових років (приблизно  $4,73 \cdot 10^{20}\text{ м}$ ). Її температура становить  $-272,15\text{ }^\circ\text{C}$ . При цій температурі замерзає Гідроген — найлегший хімічний елемент.

В Україні фундаментальні дослідження з фізики низьких і наднизьких температур виконуються з 1928 р. в Українському фізико-технічному інституті (м. Харків), де під керівництвом І. В. Обреїмова було засновано одну з найпотужніших в Європі криогенну лабораторію (лабораторію низьких температур). Вже у 1931 р. в ній було створено технологію отримання рідкого гелію, який має температуру кипіння  $-268,96\text{ }^\circ\text{C}$ . Із 1960 р. ця проблематика вивчається у Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України (м. Харків). Зокрема, науковці провели унікальні у світовій фізичній науці експериментальні дослідження фізичних властивостей гелію при температурах близько тисячних градусів Цельсія.

#### § 4\*. Залежність розмірів фізичних тіл від температури

- ▶ *Особливості теплового розширення твердих тіл, рідин і газів*
- ▶ *Теплове лінійне та об'ємне розширення*

**ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛООВОГО РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ, РІДИН І ГАЗІВ.** Для вивчення особливостей теплового розширення твердого тіла виконаємо дослід. Металеву кульку на підвісі пропустимо через кільце (рис. 4.1, а). Нагріємо кульку в полум'ї спиртівки та спробуємо повторити дослід. Кулька застрягає й не проходить через кільце (рис. 4.1, б).

Отже, при підвищенні температури тверді тіла розширюються. Це пояснюється тим, що під час їх нагрівання збільшуються проміжки між молекулами та інтенсивність коливань молекул або атомів, що містяться у вузлах кристалічних ґраток. *При рівномірному нагріванні тверде тіло розширюється в усіх напрямках.*

Унаслідок теплового розширення дроти ліній електропередач влітку провисають сильніше, ніж взимку, а викрутити гвинт із нагрітої деталі стає значно важче. Тому особливості розширення твердих тіл під час нагрівання потрібно враховувати в різних конструкціях та механізмах. Так, на стиках трамвайних або залізничних рейок залишають проміжки, щоб під час нагрівання (влітку або внаслідок руху потягу) рейки не деформувалися через розширення.



Рис. 4.1. При підвищенні температури тверді тіла розширюються

Щоб урахувати розширення металевих конструкцій мосту влітку, його з'єднання роблять не зовсім щільними (рис. 4.2).

Разом із тим властивість твердих тіл неоднаково розширюватися під час нагрівання може бути корисною. У попередньому параграфі ви ознайомилися з металевим термометром, у якому використовується біметалева пластинка. Її принцип дії ґрунтується на нерівномірному розширенні під час нагрівання складових, виготовлених із різних металів. Розширення біметалевої пластинки при її нагріванні внаслідок переважання електричної мережі забезпечує спрацювання автоматичного побутового запобіжника, який розмикає електричне коло (рис. 4.3).

Між тепловим розширенням рідин і твердих тіл є значні відмінності. Виконаємо дослід. У товстостінну колбу, закриту корком із тонкою скляною трубкою, наллємо зафарбовану воду так, щоб вона частково потрапила в трубку (4.4, а).

При нагріванні колби зафарбована вода буде підніматися по трубці (рис. 4.4, б) тому, що при підвищенні температури рідина розширюється у всіх напрямках. У цьому досліді потрібно врахувати, що нагрівається не тільки вода, а й скляна колба. Хоча скло теж розширюється, вода розширюється значно більше. Можна припустити, що рідини розширюються значно сильніше, ніж тверді тіла, але менше, ніж гази. Якби вода й скло розширювалися однаково, то рівень води в тонкій трубці не змінився б.

Розглянемо особливості теплового розширення газів. Виконаємо дослід. Порожню товстостінну скляну колбу з корком з'єднаємо трубкою з відкритим демонстраційним манометром (рис. 4.5, б).



Рис. 4.2. Для забезпечення цілісності конструкцій передбачають можливість їх теплового розширення



Біметалева пластинка      Важіль вимикача

Рис. 4.3. Принцип дії автоматичного побутового запобіжника ґрунтується на тепловому розширенні біметалевої пластинки

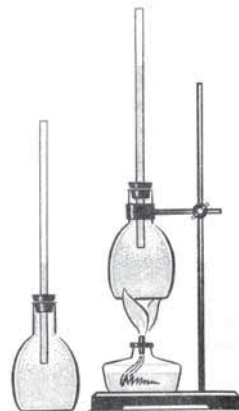


Рис. 4.4. Розширення рідини під час нагрівання



а) б) в)  
Рис. 4.5. Особливості теплового розширення повітря

Нагрівуючи колбу помітимо, що рівень манометричної рідини змінюється (рис. 4.5, в) внаслідок зростання тиску повітря в колбі. Якщо колбу помістити в посудину з льодом (рис. 4.5, а), то цей рівень зміниться в іншому напрямі. Під час нагрівання колби підвищується температура повітря в ній, і воно тисне на рідину в трубці манометра, її рівень змінюється. При охолодженні повітря в колбі рівень рідини в трубці змінюється в протилежний бік, тобто зі зниженням температури повітря стискається. Таким чином, *при підвищенні температури газу його тиск на стінки посудини збільшується (газ розширюється), а при охолодженні — зменшується.*

При підвищенні температури збільшується середня кінетична енергія руху молекул або атомів газу. Молекули сильніше та частіше стикаються зі стінками посудини. Наслідком цього і є збільшення тиску газу. Ця властивість газу дає можливість встановити залежність між зміною температури й зміною тиску газу за умови, що об'єм газу є сталим.

**\*ТЕПЛОВЕ ЛІНІЙНЕ ТА ОБ'ЄМНЕ РОЗШИРЕННЯ.** Оскільки тверді тіла, на відміну від рідин та газів, зберігають сталу форму, розглядають їх лінійне розширення під час нагрівання. Розширення твердих тіл значно менше, ніж рідин та газів. Так, залізний стрижень завдовжки 1 м, якщо його нагріти до температури 100 °С, видовжується внаслідок розширення на 1,2 мм, а стовпчик рідинного термометра, зануреного в киплячу воду, піднімається на кілька сантиметрів.

Теплове лінійне розширення твердих тіл залежить від роду речовин, з яких вони складаються. Тому при конструюванні різних пристроїв тіла добирають так, щоб вони розширювалися однаково. Так, залізобетон не руйнується внаслідок розширення металевих конструкцій за рахунок того, що бетон теж розширюється.

На практиці було встановлено, що за порівняно невеликих змін температури твердого тіла його лінійні розміри змінюються пропорційно зміні температури.

*Зміна лінійних розмірів твердого тіла прямо пропорційна зміні температури.*

При невеликих змінах температури відносно видовження стрижня  $\frac{l-l_0}{l_0}$  буде прямо пропорційним зміні температури  $\Delta t$ , тобто  $\Delta t = t - t_0$ , де  $t_0$  — початкова температура тіла,  $t$  — температура, до якої нагрівається тіло:

$$\frac{l-l_0}{l_0} \sim \Delta t.$$

Введемо коефіцієнт пропорційності  $\alpha_l$ :

$$\frac{l-l_0}{l_0} = \alpha_l \cdot \Delta t.$$

Коефіцієнт пропорційності  $\alpha_l$  називають *тепловим*, або *температурним*, коефіцієнтом лінійного розширення (видовження) тіла. Його значення залежить від природи речовини, а також температури.

*Температурний коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha$  показує, на скільки зміниться довжина твердого тіла відносно початкової довжини при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$ .*

Лінійні розміри тіла, температура якого змінилася на величину  $\Delta t$ , обчислюються за формулою

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha_l \cdot \Delta t),$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт лінійного розширення.

Розмірність температурного коефіцієнта лінійного розширення:  $\frac{1}{^\circ\text{C}}$  або  $\frac{1}{\text{K}}$ , оскільки інтервал температур  $1\text{ K} = 1^\circ\text{C}$ .

Для більшості твердих тіл коефіцієнт лінійного розширення перебуває в межах  $(10^{-6} - 10^{-5}) \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . Так, для сталі  $\alpha_l = 2,4 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , цегли —  $\alpha_l = 0,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , а для скла  $\alpha_l = 9,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

Для практичних потреб необхідно розраховувати також теплове об'ємне розширення рідин і твердих тіл. У невеликому інтервалі температур зміна об'єму рідин і твердих тіл прямо пропорційна змінам температури:

$$\frac{V-V_0}{V_0} = \alpha_V \cdot \Delta t.$$

Коефіцієнт пропорційності  $\alpha_V$  називають *тепловим*, або *температурним*, коефіцієнтом об'ємного розширення тіла.



Значення температурного коефіцієнта залежить від природи речовини.

*Температурний коефіцієнт об'ємного розширення  $\alpha_V$  показує, на скільки зміниться об'єм тіла відносно початкового об'єму при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$ .*

Об'єм тіла, температура якого змінилася на величину  $\Delta t$ , обчислюється за формулою

$$V = V_0 \cdot (1 + \alpha_V \cdot \Delta t).$$

Розмірність температурного коефіцієнта об'ємного розширення:  $\frac{1}{^\circ\text{C}}$  або  $\frac{1}{\text{K}}$  (оскільки інтервал температур  $1 \text{ K} = 1 ^\circ\text{C}$ ).

Температурні коефіцієнти об'ємного розширення рідин за значенням більші порівняно з коефіцієнтами лінійного видовження твердих тіл і можуть суттєво відрізнятися. Так, для води  $\alpha_V = 2,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , ртуті  $\alpha_V = 1,8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , а спирту  $\alpha_V = 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

Значення температурного коефіцієнта об'ємного розширення вказує на особливості зміни об'єму рідини. Якщо нагріти спирт і ртуть до температури  $100^\circ\text{C}$ , то об'єми цих рідин зміняться по-різному: об'єм спирту збільшиться на  $11\%$ , а ртуті — лише на близько  $1,8\%$ .

Коефіцієнт об'ємного розширення рідини може бути від'ємним (наприклад, для води при температурі від  $0$  до  $+4^\circ\text{C}$ ).

### **Головне в цьому параграфі**

Тверді тіла, рідини та газу розширюються або стискаються при зміні їх температури.

Під час нагрівання твердого тіла збільшується інтенсивність коливань молекул у вузлах кристалічних ґраток. Відстань, на яку вони зміщуються під час коливань від середніх положень, зростає, тіло набуває більшого об'єму. При рівномірному нагріванні тверде тіло розширюється в усіх напрямках.

При підвищенні температури рідини розширюються значно сильніше, ніж тверді тіла, але менше, ніж газу. Збільшення об'єму спостерігається з подальшим підвищенням температури.

У разі підвищення температури газу збільшується його тиск на стінки посудини (газ розширюється), а при охолодженні тиск зменшується.

Лінійні розміри тіла, температура якого змінилася на величину  $\Delta t$ , обчислюються за формулою  $l = l_0 \cdot (1 + \alpha_l \cdot \Delta t)$ .

Об'єм рідини, температура якої змінилася на величину  $\Delta t$ , обчислюється за формулою  $V = V_0 \cdot (1 + \alpha_V \cdot \Delta t)$ .

**Запитання для самоперевірки**

1. Поясніть особливості теплового розширення твердих тіл і рідин при зміні температури.
2. На підставі молекулярно-кінетичних уявлень про будову речовини поясніть зростання тиску газу при збільшенні температури.
3. Чим зумовлене лінійне та об'ємне теплове розширення тіл?
4. Від чого залежить тепловий коефіцієнт лінійного розширення? Тепловий коефіцієнт об'ємного розширення?
5. За якою формулою розраховуються лінійні розміри тіла при зміні температури?
6. За якою формулою визначається об'єм рідини при зміні температури?
7. Наведіть приклади негативного впливу теплового розширення тіл у техніці та запропонуйте шляхи його зменшення.
8. Наведіть приклади використання теплового розширення тіл у техніці.

**Домашній експеримент**

Порожню пластмасову пляшку об'ємом 0,5 л без пробки покладіть у холодильник (можна в морозильник) на 2—3 год. У прозору склянку налийте воду, підігріту до 40—50 °С. Дістаньте пляшку й поставте її горлом у воду. Спостерігайте, що відбувається. Запишіть та поясніть.

**Вправа до § 4**

- 1(с). Температуру сталюгого стрижня завдовжки 50 см збільшили на 200 °С. Визначте довжину стрижня після нагрівання, якщо температурний коефіцієнт лінійного розширення сталі  $\alpha_l = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .
- 2(с). На скільки потрібно нагріти воду в чайнику, щоб її об'єм збільшився з 1 л до 1,02 л? Температурний коефіцієнт об'ємного розширення води  $\alpha_v = 2,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .
- 3(д). Визначте мінімальну довжину сталюгого дроту, взятого влітку при температурі 25 °С, щоб з'єднати дві опори ліній електропередачі, розташовані на відстані 200 м одна від одної, якщо взимку температура повітря зменшується до -35 °С? Температурний коефіцієнт лінійного розширення сталі  $\alpha_l = 1,2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . Відповідь округліть до сотих метра.

- 4(д). До якої температури потрібно охолодити 10 л гліцерину, взятого за температури 50 °С, щоб його об'єм дорівнював 9,8 л?
- 5(в). Цистерну об'ємом 70 м<sup>3</sup> завантажують бензином на нафтопереробному заводі при температурі 35 °С. На скільки відсотків заповненою виявиться цистерна, якщо її розвантажуватимуть за температури 5 °С? Температурний коефіцієнт об'ємного розширення бензину  $\alpha_v = 1,1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

## § 5. Внутрішня енергія тіла та способи її зміни

- ▶ *Внутрішня енергія тіла*
- ▶ *Способи зміни внутрішньої енергії тіла*

**ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ ТІЛА.** З курсу фізики сьомого класу вам відомі два види енергії, що характеризують механічні явища: кінетична та потенціальна енергія (рис. 5.1).

Опис енергетичних характеристик механічних явищ ґрунтується на так званому *макроскопічному* підході, коли визначальними є зовнішні або загальні властивості та характеристики (наприклад, маса, швидкість) і не беруться до уваги особливості внутрішньої структури тіл.

Як ви вже знаєте, теплові явища безпосередньо пов'язані з тепловим рухом мікрочастинок речовини. Саме їх рухом і взаємодією визначається характер теплових процесів. Такий науковий підхід до вивчення теплових явищ отримав назву *мікроскопічного*. Мікрочастинки будь-якого тіла здійснюють тепловий хаотичний рух, що характеризується середньою *кінетичною енергією*. Крім кінетичної енергії хаотичного руху мікрочастинок кожного тіла характеризуються енергією постійних взаємодій (рис. 5.2).

У твердих тілах і рідинах атоми та молекули постійно взаємодіють між собою, здійснюючи коливання відносно стабільних

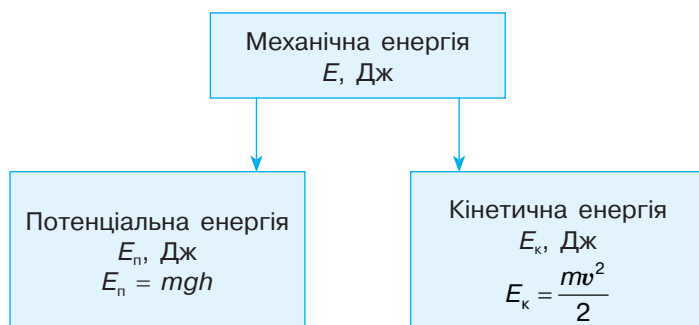


Рис. 5.1. Два види механічної енергії тіла

положень рівноваги. У газах відстань між молекулами значно більша, ніж у рідинах і твердих тілах. Енергію, яка залежить від взаємного розміщення атомів та молекул, називають *потенціальною енергією взаємодії мікрочастинок*.

Якщо ви спостерігали різке гальмування автомобіля, то помітили, що на дорожньому покритті залишаються сліди гуми, а шини нагріваються настільки, що «димлять» (рис. 5.3).

За законом збереження енергії, кінетична енергія руху автомобіля переходить у інші види енергії. Підвищення температури вказує на збільшення швидкості, а отже, й кінетичної енергії хаотичного руху мікрочастинок покриття дороги та шин. Крім того, змінюється потенціальна енергія взаємодії мікрочастинок (виникають деформації поверхонь, унаслідок яких змінюється взаємне розміщення молекул). Отже, хоч автомобіль і зупинився, проте його кінетична енергія не зникла, а перейшла у *внутрішню енергію* покриття дороги та шин.

Таким чином, внутрішня енергія тіла визначається кінетичною енергією хаотичного руху його мікрочастинок і потенціальною енергією їх взаємодії (рис. 5.4).

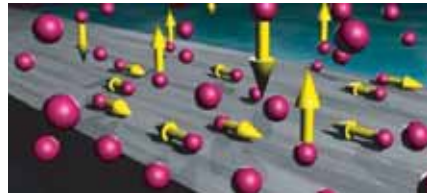


Рис. 5.2. Мікрочастинок речовини здійснюють тепловий хаотичний рух і постійно взаємодіють



Рис. 5.3. Під час різкого гальмування енергія руху переходить у внутрішню енергію: шини автомобіля та поверхня дороги нагріваються

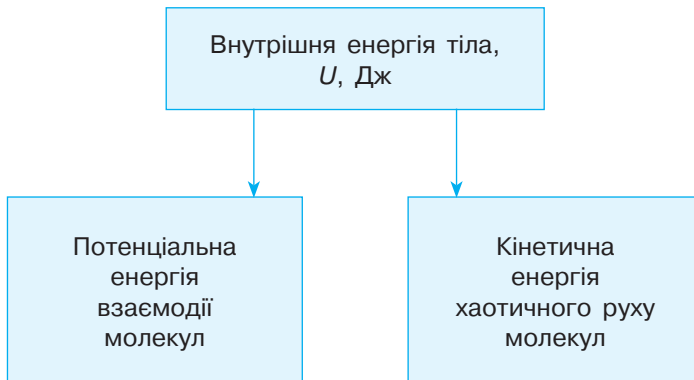


Рис. 5.4. Внутрішня енергія тіла є сумою кінетичної енергії хаотичного руху та потенціальної енергії взаємодії всіх його мікрочастинок

*Внутрішня енергія тіла є сумою кінетичної енергії хаотичного руху всіх його мікрочастинок та потенціальної енергії їх взаємодії.*

Одиницею внутрішньої енергії, як і інших видів енергії, є джоуль (Дж). Внутрішня енергія позначається латинською літерою  $U$ .

Спробуємо з'ясувати, від чого залежить внутрішня енергія тіла. Ви вже знаєте, що температура є фізичною характеристикою теплового стану речовини, з якої складається тіло, і визначається середньою кінетичною енергією хаотичного руху його частинок. Тому зміна температури означатиме зміну сумарної кінетичної енергії всіх частинок. Крім того, при зміні температури тіл відбувається їх теплове розширення або стискання, змінюються відстані між частинками, і, відповідно, змінюється енергія взаємодії між ними. Отже, *внутрішня енергія тіла залежить від його температури*. Зміна будь-яких зовнішніх характеристик тіла (наприклад, швидкості) не зумовлює зміни його внутрішньої енергії.

*Таким чином, внутрішня енергія тіла не залежить від його механічного руху та положення відносно інших тіл. Вона залежить лише від процесів, які відбуваються всередині тіла, й визначається його внутрішнім станом.*

**СПОСОБИ ЗМІНИ ВНУТРІШНЬОЇ ЕНЕРГІЇ ТІЛА.** За відсутності зовнішніх впливів на тіло його внутрішня енергія залишатиметься сталою. При цьому всередині тіла між його мікрочастинками відбувається постійний обмін енергією: кінетична енергія їх хаотичного руху під час зіткнень перетворюється в потенціальну енергію їх взаємодії. Щоб змінити внутрішню енергію тіла, потрібно змінити його температуру. Проте внутрішня енергія тіла змінюється й під час плавлення кристалів та кипіння рідин, хоча ці процеси відбуваються при сталій температурі. Зміна внутрішньої енергії відбувається за рахунок зміни енергії взаємодії між частинками речовини під час її переходу з одного агрегатного стану в інший.

*Внутрішня енергія тіла змінюється тільки при зміні температури тіла та переході речовини з одного агрегатного стану в інший.*

Отже, внутрішня енергія тіл змінюється під час теплових процесів, пов'язаних зі змінами температури та агрегатних станів. Тобто будь-які *теплові процеси супроводжуються змінами внутрішньої енергії тіла*. Оскільки тіла постійно беруть участь у теплових процесах, то важливою є саме зміна їх внутрішньої енергії, яку позначають  $\Delta U$ .



*Зміни внутрішньої енергії тіла пов'язані зі змінами кінетичної енергії хаотичного руху та потенціальної енергії взаємодії мікрочастинок, з яких воно складається.*

Зміни внутрішньої енергії тіл можливі під час хімічних реакцій, у результаті яких відбуваються перетворення одних речовин в інші (наприклад, процес горіння палива, коли відбуваються сполучення вуглецю з киснем та утворення вуглекислого газу). Відповідно, змінюються кінетична і потенціальна енергія взаємодії атомів у складі молекул та енергія взаємодії електронів з ядрами, що й визначає зміну внутрішньої енергії.

Внутрішня енергія може також змінюватися в процесі ядерних перетворень, коли змінюється сумарна кінетична і потенціальна енергія внутрішніх частинок ядра — нейтронів та протонів.

*Таким чином, внутрішня енергія змінюється при теплових процесах, хімічних та ядерних реакціях.*

Одним зі способів зміни внутрішньої енергії є виконання механічної роботи. З давніх часів людству відомий спосіб добування вогню натиранням одного шматка сухої деревини іншим (рис. 5.5).

Нагрівання деревини та поява вогню свідчать про нагрівання тіл, які взаємодіють, тобто збільшення їхньої внутрішньої енергії. Кінетична енергія руху палички переходить у внутрішню енергію деревини.

*Змінити внутрішню енергію тіла можна за рахунок виконання механічної роботи:  $\Delta U = A$ .*

*Таким чином, одним зі способів зміни внутрішньої енергії тіла є механічна робота, яка характеризує зміни внутрішньої енергії тіла при перетворенні механічної енергії у внутрішню або внутрішньої енергії в механічну.*

Перетворення внутрішньої енергії в механічну роботу можна спостерігати під час досліду (рис. 5.6).



Рис. 5.5. Зміна внутрішньої енергії шматків деревини зумовлює появу вогню

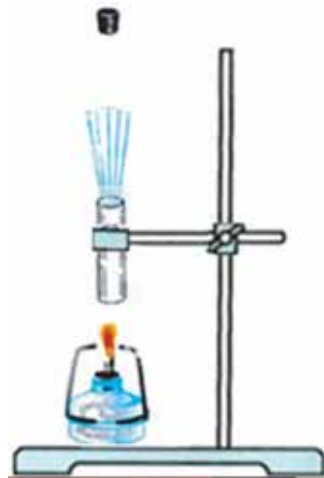


Рис. 5.6. Під час нагрівання повітря виконує механічну роботу з виштовхування корка

Якщо порожню металеву пробірку, закриту корком, нагрівати в полум'ї спиртівки, за деякий час корок вилетить. Під час нагрівання пробірки внутрішня енергія повітря збільшується, і воно виконує механічну роботу з виштовхування корка. *Тобто в результаті зміни внутрішньої енергії тіла може виконуватися механічна робота.*

Для того щоб змінити температуру тіла, а отже, і його внутрішню енергію, не обов'язково виконувати роботу. Якщо взяти в руки склянку з холодною водою й потримати її певний час, щільно охопивши долонями, вода нагріється до температури долонь. Продукти з морозильної камери холодильника перед використанням інколи опускають у воду кімнатної температури. Поступово вони розморожуються (нагріваються), а температура води зменшується. Як у першому, так і в другому прикладі температури двох тіл, що перебувають у контакті, вирівнюються, тобто встановлюється теплова рівновага.

Нагріта металева кулька буде занурюватися в лід, поступово охолоджуючись (рис. 5.7).

При цьому температура кульки, а отже, і її внутрішня енергія, зменшується. Лід буде танути, його внутрішня енергія збільшуватиметься. Більш нагріте тіло передає частину теплоти, а відповідно, й внутрішньої енергії, менш нагрітому тілу. Такий процес називають теплообміном.

*Теплообмін — це процес обміну внутрішньою енергією між тілами чи їх частинами без виконання роботи.*

Під час контакту двох тіл із різною температурою при теплообміні відбувається передача енергії від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою.

Таким чином, будь-які зміни внутрішньої енергії тіла пов'язані з виконанням механічної роботи або теплообміном. *Тобто змінити внутрішню енергію можна шляхом виконання механічної роботи чи теплообміну.*



Рис. 5.7. Внутрішня енергія гарячої кульки, що перебуває у льоді, зменшується, кулька охолоджується

Процес теплообміну є незворотним. Енергія завжди передається від гарячого тіла до холодного. Самочинно зворотний процес передачі енергії не відбувається.

Є теплові процеси, під час яких відбувається зміна внутрішньої енергії двома способами одночасно. Наприклад, у досліді з моделлю парової турбіни скляну колбу з трубкою заповнюють водою і нагрівають спиртівкою (рис. 5.8).

Між полум'ям спиртівки та колбою з водою відбувається теплообмін, внаслідок якого внутрішня енергія води зростає і вона закипає. Пара виконує роботу за рахунок своєї внутрішньої енергії, і турбіна обертається. Тобто одночасно відбувається теплообмін та виконується механічна робота. Теплові процеси, в яких використовуються різні способи зміни внутрішньої енергії, є предметом вивчення теплофізики з метою конструювання промислових турбін, з якими ви ознайомитися в наступних параграфах.

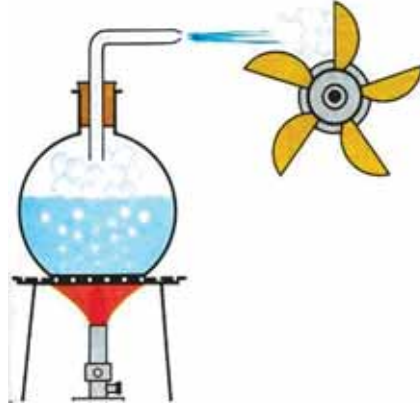


Рис. 5.8. Між полум'ям спиртівки та колбою з водою відбувається теплообмін, а пара виконує механічну роботу за рахунок внутрішньої енергії

### Головне в цьому параграфі

Внутрішня енергія тіла є сумою кінетичної енергії хаотичного руху та потенціальної енергії взаємодії всіх його мікрочастинок. Внутрішня енергія тіла, як і інші види енергії, вимірюється в джоулях (Дж) і позначається латинською літерою  $U$ .

Внутрішня енергія тіла залежить не від його механічного руху та положення відносно інших тіл, а лише від процесів, які відбуваються всередині тіла, й визначається його внутрішнім станом. Внутрішня енергія тіла змінюється тільки при зміні температури тіла та переході речовини з одного агрегатного стану в інший. Внутрішня енергія змінюється при теплових процесах, хімічних і ядерних реакціях.

Внутрішню енергію тіла можна змінити, виконавши механічну роботу:  

$$\Delta U = A.$$

Теплообмін є процесом обміну внутрішньою енергією між тілами, їхніми частинами та навколишнім середовищем без виконання роботи.

Процес теплообміну є незворотним. Енергія завжди передається від гарячого тіла до холодного. Самочинно зворотний процес передачі енергії не відбувається.

## Запитання для самоперевірки

1. Що називають внутрішньою енергією тіла? Від яких чинників вона залежить?
2. Поясніть, як впливають зміни температури на внутрішню енергію тіла.
3. Поясніть, чи відбувається зміна внутрішньої енергії води в процесі кипіння при сталій температурі.
4. Як зміниться внутрішня енергія води під час її кристалізації?
5. Наведіть приклади процесів зміни внутрішньої енергії в природі.
6. Наведіть приклади збільшення внутрішньої енергії тіл внаслідок виконання роботи сили тертя.
7. Наведіть приклади виконання тілами роботи за рахунок зменшення їх внутрішньої енергії.
8. Чому вологі дрова тріщать у багатті, а мокре каміння може руйнуватися на дрібненькі шматочки?
9. У чому полягає відмінність процесів зміни внутрішньої енергії через виконання роботи та теплообмін?

## Домашній експеримент

Металеву, пластикову, а за наявності й дерев'яну, ложки покладіть на декілька годин у холодильник. Вийміть їх і порівняйте їхню температуру на дотик. Зробіть висновок про їхню внутрішню енергію та поясніть його.

## Вправа до § 5

- 1(с). Як зміниться внутрішня енергія склянки води кімнатної температури, якщо: а) її нагріти до температури 40 °С; б) охолодити до 10 °С?
- 2(с). Як зміниться внутрішня енергія склянки води, якщо: а) її перемістити зі столу на підлогу; б) помістити в холодильник; в) закип'ятити воду?
- 3(д). В якій із посудин з однаковими колбами, зображеними на рисунку, температура води вища? Поясніть, чому.
- 4(д). Чому під час розпилювання дерева металевою пилкою, вона нагрівається до більшої температури, ніж дерево?
- 5(д). Чому після сильного шторму температура води стає вищою?
- 6(д). Чому нагріваються метеорити, що входять у шари атмосфери?
- 7(д). Чи можна спостерігати «падаючі зірки» на Місяці?
- 8(в). Чому при забиванні цвяха в дерев'яну поверхню його шляпка нагрівається значно менше, ніж тоді, коли він вже повністю забитий?

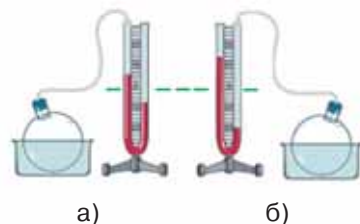


Рисунок до завдання 3

## § 6. Види теплообміну та їх використання в побуті й техніці

- ▶ Теплопровідність
- ▶ Конвекція
- ▶ Променевий теплообмін

**ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ.** Теплові явища, з якими ми стикаємося в природі й побуті, пов'язані з передачею теплоти від одних тіл до інших, тобто з теплообміном. Як відбувається теплообмін між тілами?

Розглянемо особливості передачі теплоти на досліді. Металевий стрижень закріпимо одним кінцем у штативі. Прикріпимо вздовж нього воском кілька металевих цвяхів. Спиртівкою нагріватимемо вільний кінець стрижня. Стрижень почне нагріватися, і віск, що утримує цвяхи, буде танути. Першим відпаде цвях, розташований найближче до кінця стрижня в полум'ї спиртівки. За ним по черзі відпадатимуть наступні цвяхи (рис. 6.1).

Ми побачили, що теплота від полум'я спиртівки передається металевому стрижню й поступово цвяхам на ньому. Як відбувається цей процес? У полум'ї спиртівки молекули повітря мають значну кінетичну енергію, яка суттєво більша, ніж кінетична енергія хаотичного руху атомів кристалічної ґратки стрижня. Під час зіткнення молекули повітря передають енергію їй атомам. Спочатку збільшується швидкість хаотичного руху атомів кристалічної ґратки й, відповідно, температура частини стрижня над спиртівкою. Поступово атоми з більшою енергією передають частину її сусіднім атомам. Підвищується температура наступних частин металевого стрижня. Через деякий час температура всіх частин стрижня стає однаковою. Передачу енергії від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих шляхом безпосередньої взаємодії мікрочастинок називають *теплопровідністю*.

*Теплопровідність — це передача теплоти від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих, зумовлена хаотичним рухом мікрочастинок речовини.*

Мікрочастинки твердих тіл коливаються відносно положень рівноваги. З підвищенням температури певної ділянки тіла збільшується інтенсивність коливань частинок речовини, їхня кіне-



Рис. 6.1. Теплопровідність металевого стрижня



тична та потенціальна енергія зростає. Збільшується кількість та посилюється інтенсивність співударів цих частинок із частинками сусідніх, холодніших шарів із нижчою температурою. Частинки з більшою енергією передають її надлишок сусіднім частинкам, енергія яких зростає, а температура підвищується. Потім енергія передається до наступного шару. Такий процес передачі енергії відбувається достатньо повільно.

*Теплопровідність супроводжується передачею внутрішньої енергії від більш нагрітих тіл до менш нагрітих без перенесення речовини.*

Саме метали мають найбільшу теплопровідність, яка у сотні та тисячі разів більша, ніж в інших речовин. Найкраще проводять тепло мідь і срібло. Висока теплопровідність металів пов'язана з особливостями їх будови та зумовлена, на відміну від інших твердих тіл, не лише хаотичними тепловими коливаннями у вузлах кристалічної ґратки, а й тим, що між ґратками є багато вільних електронів.

На ділянці з вищою температурою частина електронів отримує більшу кінетичну енергію. Ці електрони легко долають проміжки між йонами. Стикаючись із йонами в холодніших шарах металу, електрони передають їм надлишок своєї енергії, що зумовлює підвищення температури в цій ділянці. Поступово внутрішня енергія передається більш холодній ділянці.

Варто зазначити, що теплопровідність металів істотно перевищує теплопровідність рідин та газів. Наприклад, теплопровідність води у 330 разів менша, ніж міді. А теплопровідність повітря, у свою чергу, у 25 разів менша, ніж води.

Яке значення має теплопровідність у природі та техніці? Вам, напевно, доводилося чути від старших, що сувора зима без снігу надзвичайно небезпечна для пшениці, посіяної восени (озимини). Сніг погано проводить тепло, оскільки він пухкий і між його кристаликами міститься багато повітря, яке має невелику теплопровідність. Тому під снігом посіви озимої пшениці надійно захищені до весни (рис. 6.2).

Теплопровідність газів є наслідком хаотичного невпорядкованого теплового руху їх атомів або молекул. Швидкі молекули газу з шарів із вищою температурою переміщуються у холодніші шари. Молекули, що рухаються з меншими швидкостями, переходять у більш нагріті шари, заміщуючи швидкі молекули. При цьому середня кінетична енергія теплового хаотичного руху молекул газу в нагрітому шарі зменшується, а відповідно, знижується температура газу. Тому гази погано проводять тепло. Завдяки незначній теплопровідності газів їх широко використовують при виготовленні теплоізоляційних матеріалів. Сучасні віконні сис-

теми мають подвійне та потрійне скло з повітряними прошарками (6.3, а). Сьогодні у будівництві широко використовуються спеціальна цегла з отворами для повітря (6.3, б) і газоблоки з пористою структурою (6.3, в). Стіни будинків утеплюють пінополістирольними плитами (6.3, г).

Малу теплопровідність мають дерево, пластик, тканина. Тому ручки кухонного посуду виготовляють із дерева та пластику, а гарячий чайник із металевою ручкою знімають із плити за допомогою ганчірки.

Отже, *різні речовини мають неоднакову теплопровідність.*

**КОНВЕКЦІЯ.** На відміну від металів, у рідинах та газах теплообмін може супроводжуватися перенесенням речовини — *конвекцією*.

*Конвекція — теплообмін у рідинах та газах, який супроводжується перенесенням речовини.*

Щоб спостерігати конвекцію, закріпимо в штативі скляну трубку у формі прямокутника. Заповнимо її водою та додамо кілька частинок перманганату калію. Нагріватимемо спиртівкою трубку в певному місці. Помітимо, як у воді виникають конвекційні потоки: рідина весь час переміщується (рис. 6.4).

Холодні (зафарбовані) шари води опускаються донизу, а нагріті піднімаються догори. Тобто здійснюється перенесення речовини. Розглянемо, чому це відбувається. Рідина у нижній частині скляної трубки нагрівається, і внаслідок цього її густина зменшується, а об'єм збільшується. Відповідно збільшується й архімедова сила, що діє на нагріті шари рідини. Тому вони піднімаються вгору, витісняючись холодними шарами рідини.



Рис. 6.2. Озимина надійно захищена снігом від переохолодження

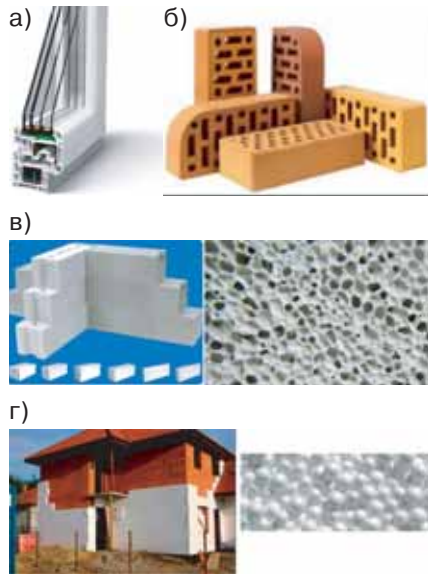


Рис. 6.3. Теплоізоляційні матеріали: а) трикамерний склопакет; б) цегла; в) газоблоки; г) пінополістирол



Рис. 6.4.  
Конвекція в рідині

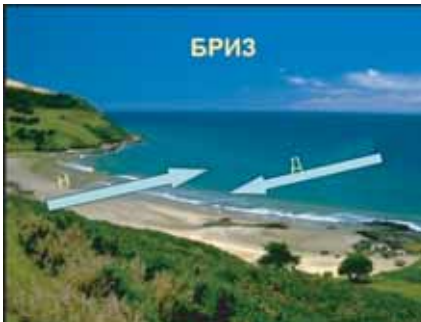


Рис. 6.5.  
Утворення берегового бризу

Подібним чином відбувається конвекція струменів повітря. Завдяки природній конвекції постійно перемішуються повітряні маси, у зв'язку з чим виникають конвекційні потоки в атмосфері — вітри. Прикладом конвекції в атмосфері Землі є берегові бризи. Механізм їх утворення пояснюється конвекцією повітряних мас. Удень суша прогрівається Сонцем швидше, ніж вода. Тому повітря над сушею прогрівається сильніше, ніж над морем. Густина повітря над сушею зменшується, утворюється зона низького тиску, а над морем утримується зона підвищеного тиску. Холодніше повітря інтенсивно рухається з моря у бік зниженого тиску до берега, дме вітер, який називають денним бризом. Уночі суша охолоджується швидше, ніж море. Над нею формується область підвищеного тиску, і охолоджене повітря рухається в бік області зі зниженим тиском, до моря. Так званий нічний бриз дме із суші на море (рис. 6.5).

Рідини та гази нагрівають, як правило, знизу. При нагріванні згори конвекція не відбуватиметься, оскільки верхні шари з меншою густиною (більш нагріті) не опускаються донизу і не відбувається перемішування. Крім того, конвекція можлива за умови, що між частинами речовини є різниця температур.

Тому радіатори водяного опалення та електричні конвектори-обігрівачі встановлюють поблизу підлоги (рис. 6.6).

Прохолодніше повітря опускається донизу, нагрівається та піднімається вгору. Завдяки природній конвекції повітря прогрівається рівномірно й у кімнаті підтримується стала температура.

Вимушена конвекція використовується в системах охолодження двигунів автомобілів, жарових і сушильних шафах (рис. 6.7).



Рис. 6.6. Конвекція повітря в кімнаті



Рис. 6.7. Використання явища вимушеної конвекції

**ПРОМЕНЕВИЙ ТЕПЛОБМІН.** Особливістю теплопровідності та конвекції є передача теплоти в певному середовищі за допомогою мікрочастинок речовини. Чи замислювалися ви над тим, яким чином тепло від Сонця потрапляє на Землю? Адже ці небесні тіла розділяє вакуум, де концентрація мікрочастинок незначна й вони не можуть забезпечити передавання теплоти. Виявляється, що в природі існує ще один вид теплообміну, який не потребує молекул та атомів. Він зумовлений перетворенням внутрішньої енергії тіла в енергію *теплого, або променевого, випромінювання*.

*Променевий теплообмін — це процес перенесення внутрішньої енергії від одного тіла до іншого внаслідок випускання, поширення та поглинання випромінювання.*

*Процес випромінювання та поглинання теплоти відбувається за рахунок зміни внутрішньої енергії тіла.*

Чашка з гарячим чаєм випромінює теплову енергію, поступово охолоджуючись. Її внутрішня енергія та, відповідно температура, зменшується. Склянка води на сонці нагрівається, поглинаючи теплове випромінювання, її внутрішня енергія, а отже, температура, збільшується.

Для спостереження особливостей теплового випромінювання проведемо дослід. U-подібний манометр (стовпчики зафарбованої рідини в обох колінах однакові) з'єднаємо з теплоприймачем на

штативі. На одному рівні з теплоприймачем розташуємо підставку. Якщо масивну гирю нагріти до високої температури (300—500 °С) і встановити на підставку, то через деякий час рівновага стовпчиків манометра порушиться. Тобто в теплоприймачі збільшиться тиск. Унаслідок променевого теплообміну між гарячою гирею та теплоприймачем підвищиться температура повітря, а отже, й тиск у ньому, зміну якого покаже манометр (рис. 6.8).

Унікальним природним джерелом енергії, що забезпечує існування всього живого на нашій планеті, є Сонце. Завдяки променево-му теплообміну його енергія надходить до Землі, підтримує кругообіг води в природі та циркуляцію повітряних мас, фотосинтез, що є основою життєдіяльності рослинних організмів. За рік Сонце випромінює приблизно  $1,2 \cdot 10^{34}$  Дж енергії, з яких лише 0,000 000 002 % отримує Земля.

Перспективи майбутньої екологічно чистої енергетики пов'язують саме з використанням енергії Сонця (рис. 6.9).

Співвідношення випромінюваної та поглинутої енергії залежить від температури, стану та кольору поверхні тіла. *Тіло випромінює тим більше енергії, чим вища його температура.*

Тіла з чорними шорсткими поверхнями випромінюють і поглинають більше енергії, ніж тіла з білими та гладенькими поверхнями, нагріті до однакової температури. Тому спеціальні матеріали

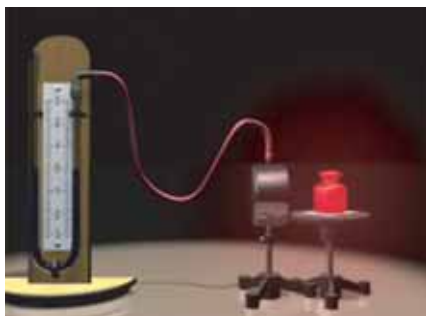


Рис. 6.8. Променивий теплообмін



Рис. 6.9. Використання енергії Сонця в побуті та техніці





Рис. 6.10. Тепловідбивний екран із порилексу

з відбивними поверхнями використовують для зменшення втрат теплового випромінювання. Наприклад, тепловідбивні екрани з фольги або порилексу розташовують за радіаторами водяного опалення в кімнаті (рис. 6.10). Таким чином стіна ізолюється від нагрівача й тепло зберігається в кімнаті.

*Теплову енергію випромінюють та поглинають усі тіла при будь-якій температурі, вищій від абсолютного нуля.* Навіть шматок льоду випромінює тепло. Проте ми не відчуваємо цього, піднісши до нього руку, оскільки рука випромінює більше тепла, ніж поглинає.

Людина й тварини теж є джерелами теплового випромінювання (рис. 6.11).

«Побачити» його можна за допомогою спеціальних пристроїв — тепловізорів (їх також називають приладами нічного бачення) (рис. 6.12).

На дисплеї тепловізора відображається розподіл температури досліджуваного об'єкта у вигляді кольорової гами, де певному діапазону температур відповідає визначений колір.

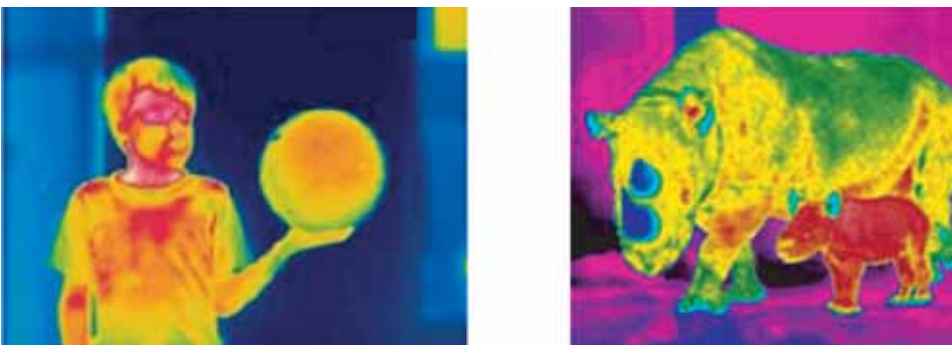


Рис. 6.11. Живі організми є джерелами теплового випромінювання



Рис. 6.12. Тепловізор дає можливість спостерігати за розподілом температури

### Головне в цьому параграфі

Теплопровідність — це передача теплоти від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих, зумовлена хаотичним рухом мікрочастинок речовини. Теплопровідність супроводжується передачею внутрішньої енергії від більш нагрітих до менш нагрітих тіл без перенесення речовини.

Конвекція — теплообмін у рідинах і газах, який супроводжується перенесенням речовини.

Променевий теплообмін — процес перенесення внутрішньої енергії від одного тіла до іншого внаслідок випускання, поширення та поглинання випромінювання.

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають теплопровідністю речовини?
2. Наведіть приклади речовин із різною теплопровідністю.
3. Поясніть особливості теплопровідності металів.
4. Наведіть приклади конвекції в природі.
5. Поясніть, чому рідини та гази нагрівають знизу.
6. Чи можлива конвекція у твердих тілах?
7. Чи може відбуватися конвекція в кабіні космічного корабля в умовах невагомості?
8. Наведіть приклади використання конвекції в побуті та техніці.
9. Що називають променевим теплообміном?
10. Як відбувається променевий теплообмін?
11. Яке значення має променевий теплообмін у природі та техніці?

### Вправа до § 6

- 1(п). Поясніть, чому для теплоізоляції використовують пінополістирол, газоблоки, пористу цеглу.
- 2(п). Поясніть, чому в жарку погоду доцільно вдягати світлий одяг.
- 3(с). Чому нагрівний елемент електрочайника розташовують унизу приладу?
- 4(с). Поясніть, як зміниться ефективність роботи електричного конвектора, якщо його розташувати високо над підлогою.
- 5(д). Який зі способів теплопередачі може бути використаний для обігріву космічного корабля в умовах невагомості?
- 6(д). Чому кондиціонери розміщують біля стелі, адже вони теж можуть використовуватися для обігріву?

## § 7. Кількість теплоти. Питома теплоємність речовини

- ▶ *Кількість теплоти.*
- ▶ *Одиниці кількості теплоти*
- ▶ *Питома теплоємність речовини*

**КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ.** Під час теплообміну більш нагріті тіла передають менш нагрітим теплоту. При цьому змінюється внутрішня енергія як тіла, що віддає теплоту, так і тіла, що її отримує. Ці зміни оцінюють *кількістю теплоти  $Q$* . *Кількісною характеристикою теплообміну є кількість теплоти — енергія, передана тілом у процесі теплообміну.* Тобто зміна внутрішньої енергії тіла  $\Delta U$  дорівнює кількості теплоти, яку воно отримало або віддало під час теплообміну:

$$\Delta U = Q.$$

Отже, ми з'ясували, що *кількість теплоти безпосередньо пов'язана зі зміною внутрішньої енергії тіла, яка, у свою чергу, пропорційна зміні його температури за умови сталої маси.* Тоді

$$\Delta U \sim \Delta t.$$

*Кількість теплоти — це фізична величина, яка є мірою зміни внутрішньої енергії тіла під час теплообміну.*

**ОДИНИЦІ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОТИ.** Якщо в процесі теплообміну тіло віддає або отримує певну кількість теплоти, це означає, що його внутрішня енергія, відповідно, або зменшується, або збільшується. Оскільки кількість теплоти, яку віддає чи отримує тіло, характеризує зміну його внутрішньої енергії, то за одиницю вимірювання кількості теплоти прийнято джоуль (Дж).

*Тобто кількість теплоти, так само, як і робота й енергія, має одиницю вимірювання джоуль (Дж).*

Особливістю кількості теплоти є те, що це кількісна характеристика саме теплових процесів. Тепловий стан того чи іншого тіла за відсутності теплообміну характеризується внутрішньою енергією.

**ПИТОМА ТЕПЛОЄМНІСТЬ РЕЧОВИНИ.** Кількість теплоти, яку отримує тіло під час нагрівання, буде тим більшою, чим вища температура  $t_2$ , до якої нагрілося тіло, порівняно з його початковою температурою  $t_1$ .

Відповідно, тіло віддає тим більшу кількість теплоти, чим менша його кінцева температура порівняно з початковою. Отже, кількість теплоти, отримана тілом під час нагрівання або віддана під час охолодження, пропорційна зміні температури ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ):

$$Q = C \cdot \Delta t.$$

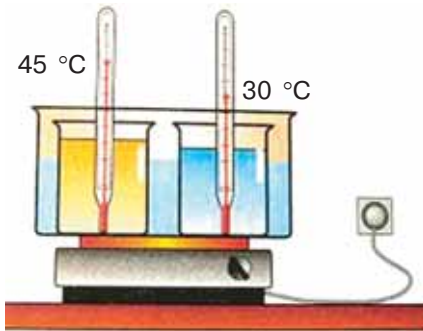


Рис. 7.1. Для нагрівання гліцерину потрібна менша кількість теплоти, ніж для нагрівання води

воду та гліцерин однакової маси. Помістимо в них термометри для спостережень зміни температури, а колби — в кювету з водою, яку підігріємо спиртівкою.

Будемо спостерігати за зміною температури води та гліцерину під час їх нагрівання за однакових умов. Помітимо, що температура гліцерину підвищуватиметься значно швидше, ніж температура води (рис. 7.1).

Це означає, що для нагрівання одиниці маси гліцерину на 1 °C потрібна менша кількість теплоти, ніж для нагрівання води.

Досліди показують, що для нагрівання тіл однакової маси, взятих при однаковій температурі, необхідна різна кількість теплоти. Так, у нашому досліді для нагрівання 1 кг води на 1 °C потрібно 4200 Дж теплоти, а для нагрівання 1 кг гліцерину на 1 °C — тільки 2400 Дж.

На практиці зручніше користуватися не теплоємністю тіла, а *питомою теплоємністю*, тобто теплоємністю одиниці маси речовини:

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

*Питомою теплоємністю речовини називають фізичну величину, що показує, яка кількість теплоти необхідна для зміни температури речовини масою 1 кг на 1 °C.*

Найменування одиниці питомої теплоємності  $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

Різні речовини мають різну питому теплоємність (табл. 7.1).

Коефіцієнт пропорційності  $C$  між кількістю теплоти  $Q$  та зміною температури  $\Delta t$  називають *теплоємністю тіла*.

*Теплоємністю тіла називають фізичну величину, що показує, яка кількість теплоти необхідна, аби змінити температуру тіла на 1 °C.*

Теплоємність тіла вимірюється в Дж/°C.

Кількість теплоти залежить від роду речовини. Вдамося до досліду. Наллємо у дві однакові колби

воду та гліцерин однакової маси. Помістимо в них термометри для спостережень зміни температури, а колби — в кювету з водою, яку підігріємо спиртівкою.

Будемо спостерігати за зміною температури води та гліцерину під час їх нагрівання за однакових умов. Помітимо, що температура гліцерину підвищуватиметься значно швидше, ніж температура води (рис. 7.1).

Це означає, що для нагрівання одиниці маси гліцерину на 1 °C потрібна менша кількість теплоти, ніж для нагрівання води.

Досліди показують, що для нагрівання тіл однакової маси, взятих при однаковій температурі, необхідна різна кількість теплоти. Так, у нашому досліді для нагрівання 1 кг води на 1 °C потрібно 4200 Дж теплоти, а для нагрівання 1 кг гліцерину на 1 °C — тільки 2400 Дж.

На практиці зручніше користуватися не теплоємністю тіла, а *питомою теплоємністю*, тобто теплоємністю одиниці маси речовини:

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

*Питомою теплоємністю речовини називають фізичну величину, що показує, яка кількість теплоти необхідна для зміни температури речовини масою 1 кг на 1 °C.*

Найменування одиниці питомої теплоємності  $1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

Різні речовини мають різну питому теплоємність (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

## Питома теплоємність деяких речовин

Речовина	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Речовина	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
Золото	130	Графіт	750
Ртуть	140	Скло	840
Свинець	140	Цегла	880
Олово	230	Алюміній	920
Срібло	250	Олія	1700
Мідь	400	Лід	2100
Цинк	400	Гас	2100
Латунь	400	Ефір	2350
Залізо	460	Деревина	2400
Сталь	500	Спирт	2500
Чавун	540	Вода	4200

Проаналізуємо значення, наведені в таблиці. Наприклад, питома теплоємність срібла становить  $250 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ . Це означає, що для нагрівання срібла масою 1 кг на  $1^\circ\text{C}$  йому необхідно надати 250 Дж теплоти. Під час охолодження 1 кг срібла на  $1^\circ\text{C}$  не виділиться кількість теплоти 250 Дж. Отже, під час зміни температури 1 кг срібла воно або виділяє, або поглинає кількість теплоти 250 Дж.

*Питома теплоємність речовини у різних агрегатних станах — рідкому, твердому, газоподібному — не однакова.* Приклад цього — вода, її питома теплоємність  $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ , тоді як пито-

ма теплоємність льоду — вдвічі менша і становить  $2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

Завдяки великій теплоємності вода в морях, озерах, річках, нагріваючись, поглинає значну кількість сонячної енергії і тривалий час її зберігає. Тому біля водних масивів не так спекотно влітку. В холодну пору року вода охолоджується, віддаючи в навколишній простір значну кількість тепла, тим самим пом'якшуючи клімат.

Через велику теплоємність води її використовують як теплоносій у системах водяного опалення, охолодження ядерних реакторів, автомобільних двигунів тощо.

## Головне в цьому параграфі

Кількісною характеристикою теплообміну є кількість теплоти  $Q$  — енергія, передана тілом у процесі теплообміну. Кількість теплоти є мірою зміни внутрішньої енергії тіла під час теплообміну. Вона вимірюється так само, як і робота та енергія, у джоулях (Дж).

Кількість теплоти, отримана або витрачена тілом, залежить від його маси, роду речовини, з якої його виготовлено, та різниці початкової і кінцевої температур.

Питоною теплоємністю речовини називають фізичну величину, що показує, яка кількість теплоти необхідна для зміни температури речовини масою 1 кг на 1 °С.

## Запитання для самоперевірки

1. Яку фізичну величину називають кількістю теплоти?
2. Поясніть фізичний зміст кількості теплоти. У яких одиницях вона вимірюється?
3. Що називають питоною теплоємністю речовини?
4. Що характеризує питома теплоємність речовини? У яких одиницях вона вимірюється?
5. Чи відрізняється питома теплоємність речовини в різних агрегатних станах?

## Домашній експеримент

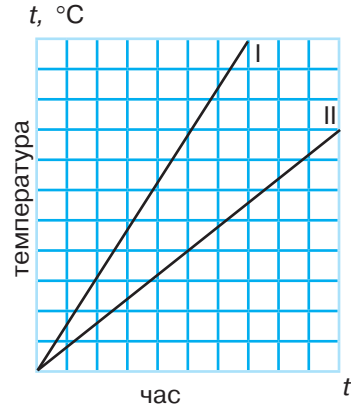
Підготуйте три посудини з водою. Першу з теплою (з температурою, що приблизно дорівнює температурі тіла людини), другу з холодною (з-під крану), третю з водою кімнатної температури. Опустіть одну руку в посудину з теплою, а другу — в посудину з холодною водою. Вийміть обидві руки та опустіть їх у воду кімнатної температури. Порівняйте й поясніть свої відчуття.

## Вправа до § 7

- 1(п). Для нагрівання тіла було використано 1 Дж теплоти. Наскільки змінилася внутрішня енергія тіла?
- 2(п). Під час охолодження тіла його внутрішня енергія зменшилася на 5 Дж. Яка кількість теплоти виділилася при цьому?
- 3(с). Яку кількість теплоти отримало тіло, виготовлене з речовини теплоємністю  $2000 \frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}$ , якщо воно нагрілося від температури 20 °С до 80 °С?
- 4(с). Обчисліть теплоємність речовини, з якої виготовлене тіло, що остигнувши на 50 °С, віддало 15 кДж теплоти.
- 5(д). Виберіть матеріал, яким би ви скористалися, щоб зняти кип'ячий чайник із металевою ручкою з плити: металева фольга, мокра ганчірка, губка для миття посуду, суха ганчірка. Поясніть вибір.



- 6(д).** Виберіть матеріал, яким би ви скористалися для виготовлення ручки для кришки каструлі: залізо, алюміній, дерево, пластик. Поясніть вибір.
- 7(д).** Чому медичну грілку заповнюють гарячою водою?
- 8(в).** На рисунку наведено графіки нагрівання води й гліцерину однакової маси. Укажіть, який з графіків відповідає нагріванню кожної з рідин.



## § 8. Розрахунок кількості теплоти, яку отримує або віддає тіло під час теплового процесу

- *Розрахунок кількості теплоти при нагріванні та охолодженні тіла*

**РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОТИ ПРИ НАГРІВАННІ ТА ОХОЛОДЖЕННІ ТІЛА.** Під час теплових процесів тіла можуть отримувати певну кількість теплоти (нагріватися) або віддавати її (охолоджуватися). Від яких фізичних характеристик залежить кількість теплоти, яку тіло одержує при нагріванні чи віддає при охолодженні? З досвіду ви знаєте, що підігріти страву, залишену за кімнатної температури, можна значно швидше, ніж ту, яка зберігалася в холодильнику. Пов'язано це з тим, що в другому випадку початкова температура була істотно нижчою, і, відповідно, набагато більшою буде різниця кінцевої та початкової температури. Отже, *чим більше змінюється температура тіла під час нагрівання, тим більшу кількість теплоти йому необхідно надати.*

Неважко помітити, що заповнений наполовину чайник закип'ятити швидше, ніж максимально заповнений. Тобто за однакової початкової температури вода меншої маси нагріється швидше. Отже, *кількість теплоти, необхідна для нагрівання тіла, залежить від його маси: чим більша маса тіла, тим більша кількість теплоти необхідна для його нагрівання на певне число градусів.*

Проте кількість теплоти, потрібна для нагрівання тіла, залежить не лише від різниці між кінцевою та початковою температурою тіла та його маси. Із попереднього параграфу вам відомо, що кількість теплоти, потрібна для нагрівання 1 кг речовини на 1 °C, залежить від роду речовини та визначається її питомою те-

плоємністю. Тобто *кількість теплоти, необхідна для нагрівання речовини, залежить від її питомої теплоємності.*

Таким чином, кількість теплоти, потрібна для нагрівання тіла до певної температури, залежить від: питомої теплоємності речовини, з якої виготовлено тіло ( $c$ ), маси цього тіла ( $m$ ) та різниці між його кінцевою ( $t_2$ ) і початковою ( $t_1$ ) температурою.

Отже, щоб обчислити кількість теплоти, необхідну для нагрівання тіла, потрібно питому теплоємність речовини ( $c$ ) помножити на масу цього тіла ( $m$ ) та різницю між його кінцевою ( $t_2$ ) і початковою ( $t_1$ ) температурами (рис. 8.1):

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t. \quad (8.1)$$

З (8.1) можна отримати такі формули:  
для обчислення теплоємності тіла:

$$c \cdot m = \frac{Q}{t_2 - t_1}; \quad (8.2)$$

для обчислення різниці температур:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{Q}{c \cdot m}. \quad (8.3)$$

У процесі отримання теплоти внутрішня енергія тіла і температура збільшуються, а тіло нагрівається. Коли тіло віддає певну кількість теплоти, його внутрішня енергія і температура зменшуються, а тіло при цьому охолоджується.

Виявляється, що під час нагрівання 1 кг води на 1 °С її внутрішня енергія збільшиться на 4200 Дж, а під час охолодження зменшиться на таке саме значення. Отже, скільки енергії (теплоти) тіло вбирає під час нагрівання, стільки ж віддає під час охолодження. Тобто кількість теплоти, яку віддає тіло під час охолодження, можна також обчислити за формулою (8.1).

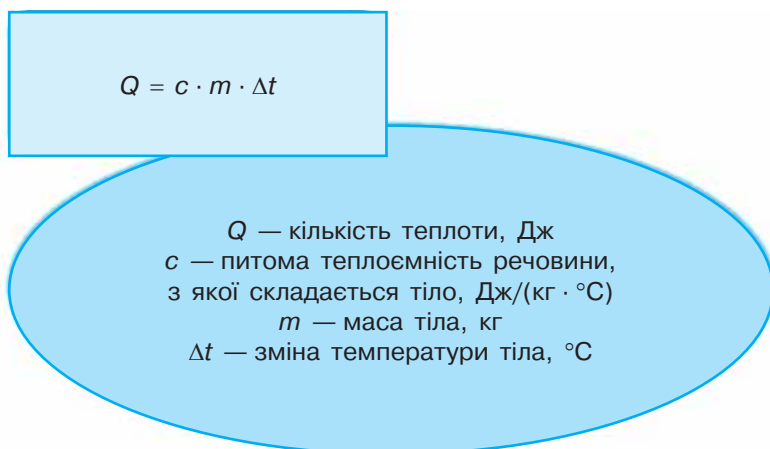


Рис. 8.1. Кількість теплоти при нагріванні та охолодженні тіла

У фізиці прийнято вважати кількість теплоти додатною ( $Q > 0$ ), якщо тіло отримує теплову енергію, та від'ємною ( $Q < 0$ ), якщо віддає її.

**Зверніть увагу:** використовуючи формулу (8.1) для розрахунку кількості теплоти, яку отримує або віддає тіло, зміну температури тіла  $\Delta t$  визначають, віднімаючи від більшої температури меншу.

Наприклад, якщо під час теплового процесу тіло охолонуло від температури  $t_1 = 100\text{ }^\circ\text{C}$  до температури  $t_2 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , то зміну його температури визначають як:  $\Delta t = t_1 - t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C} - 25\text{ }^\circ\text{C} = 75\text{ }^\circ\text{C}$ .

На практиці виникає потреба виконувати розрахунки отриманої чи відданої тілами теплоти. Наприклад, при спорудженні будинків потрібно враховувати, яку кількість теплоти віддаватиме вся система опалення, а також те, яка кількість теплоти надходитиме в навколишнє середовище через вікна та стіни.

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ НА РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОТИ ПРИ НАГРІВАННІ ТА ОХОЛОДЖЕННІ ТІЛА

Формула, за якою обчислюється кількість теплоти при нагріванні та охолодженні тіла (8.1), використовується для розв'язування фізичних задач на теплові процеси. Розглянемо приклади.

**Задача 1.** Воду масою 0,8 кг при температурі  $25\text{ }^\circ\text{C}$  змішали з окропом масою 0,4 кг. Температура змішаної води дорівнює  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Обчисліть кількість теплоти, яку віддає окріп, і кількість теплоти, яку отримала, нагріваючись, холодна вода. Порівняйте їх.

Дано:

$$m_1 = 0,8\text{ кг}$$

$$t_1 = 25\text{ }^\circ\text{C}$$

$$c_1 = c_2 = 4200\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$$

$$m_2 = 0,4\text{ кг}$$

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

$$t = 50\text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_1 \text{ —? } Q_2 \text{ —?}$$

Розв'язок

Окріп, охолоджуючись від  $100$  до  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , віддав частину своєї внутрішньої енергії:

$$Q_2 = c_2 \cdot m_2 \cdot (t_2 - t);$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= 4200\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 0,4\text{ кг} \cdot 50\text{ }^\circ\text{C} = \\ &= 84\,000\text{ Дж} = 84\text{ кДж}. \end{aligned}$$

Вода, в яку влили окріп, нагрілася від  $25$  до  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , і отримала таку кількість теплоти:

$$Q_1 = c_1 \cdot m_1 \cdot (t - t_1);$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= 4200\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 0,8\text{ кг} \cdot 25\text{ }^\circ\text{C} = \\ &= 84\,000\text{ Дж} = 84\text{ кДж}. \end{aligned}$$

**Відповідь:**  $Q_1 = Q_2 = 84\text{ кДж}$ .

**Задача 2.** В алюмінієвій каструлі, маса якої 800 г, нагрівають 5 кг води від 10 °С до кипіння. Визначте кількість теплоти, необхідну для нагрівання: а) каструлі; б) води.

Дано:

$$m_1 = 0,8 \text{ кг}$$

$$t_1 = 10 \text{ °С}$$

$$t_2 = 100 \text{ °С}$$

$$m_2 = 5 \text{ кг}$$

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

$$c_1 = 920 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$$

$$Q_1 \text{ —? } Q_2 \text{ —?}$$

*Розв'язок*

Кількість теплоти, необхідна для нагрівання алюмінієвої каструлі:

$$Q_1 = c_1 \cdot m_1 \cdot (t_2 - t_1);$$

$$Q_1 = 920 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \cdot 0,8 \text{ кг} \times \\ \times (100 \text{ °С} - 10 \text{ °С}) = \\ = 66\,240 \text{ Дж} = 66,24 \text{ кДж}.$$

Кількість теплоти, потрібна для нагрівання води:

$$Q_2 = c_2 \cdot m_2 \cdot (t_2 - t_1);$$

$$Q_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \cdot 5 \text{ кг} \cdot (100 \text{ °С} - 10 \text{ °С}) = \\ = 1\,890\,000 \text{ Дж} = 1,89 \text{ МДж}.$$

**Відповідь:**  $Q_1 = 66,24 \text{ кДж}$ ;  $Q_2 = 1,89 \text{ МДж}$ .

### Головне в цьому параграфі

Кількість теплоти, яку тіло вбирає під час нагрівання, дорівнює кількості теплоти, яку воно віддає під час охолодження.

Щоб обчислити кількість теплоти, необхідну для нагрівання тіла або віддану ним під час охолодження, потрібно помножити на масу цього тіла ( $m$ ) та зміну його температури  $\Delta t$ :  $Q = cm\Delta t$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Назвіть величини, від яких залежить кількість теплоти, необхідна для нагрівання тіла.
2. Від яких величин залежить кількість теплоти, яку віддає тіло під час охолодження?
3. За якою формулою обчислюють кількість теплоти, що отримує тіло під час нагрівання або віддає під час охолодження?
4. Якщо провести дослід зі змішування однакових мас гарячої і холодної води та обчислити кількість теплоти, відданої гарячою й одержаною холодною водою, отримаємо різні значення. Пояснить, чому.

### Вправа до § 8

- 1(п). Порівняйте кількість теплоти, потрібну для нагрівання до кімнатної температури питної води в пляшках об'ємом 1 та 0,5 л, які вийняли з холодильника. Відповідь пояснить.

- 2(п).** Порівняйте кількість теплоти, потрібну для нагрівання тіла, взятого при кімнатній температурі, на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , і кількість теплоти, що виділиться під час охолодження цього тіла на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Відповідь поясніть.
- 3(с).** Яка кількість теплоти необхідна для нагрівання нікелю масою  $200\text{ г}$  від  $20$  до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Питома теплоємність нікелю  $460\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ .
- 4(с).** Яку масу піску можна нагріти від  $18$  до  $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ , використавши  $264\text{ МДж}$  теплоти? Питома теплоємність піску  $970\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ .
- 5(д).** До якої температури був нагрітий чавунний брусок масою  $1,8\text{ кг}$ , якщо при його охолодженні до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  виділилося  $77,76\text{ кДж}$  теплової енергії? Питома теплоємність чавуну  $550\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ .
- 6(д).** Визначте кількість теплоти, необхідну для нагрівання від  $15$  до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  повітря в кімнаті, довжина якої  $5\text{ м}$ , ширина  $4\text{ м}$  та висота  $2,8\text{ м}$ .
- 7(в).** Визначте, наскільки збільшиться температура свинцевої кульки, яка падає на залізну пластину з висоти  $120\text{ м}$ , якщо вважати, що вся механічна енергія перетворюється на внутрішню енергію кульки. Питома теплоємність свинцю  $120\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

## § 9. Тепловий баланс

- ▶ *Тепловий баланс*
- ▶ *Рівняння теплового балансу та його використання для розв'язування задач на теплові процеси*

**ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС.** Важливою особливістю теплових процесів є те, що під час теплового контакту між тілами теплота самовільно переходить від більш нагрітого до менш нагрітого тіла. З часом між цими тілами встановлюється тепла рівновага, тобто температура тіл стає однаковою. У задачах на визначення енергетичних характеристик теплових процесів виникає необхідність обчислювати кількість теплоти, яка надається або виділяється тілами з різною температурою до встановлення теплової рівноваги.

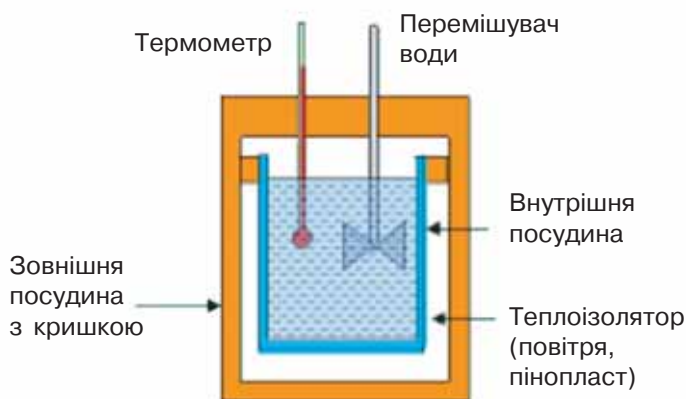
Процеси теплообміну підпорядковуються закону збереження енергії за умови, що вони відбуваються в теплоізольованій або замкненій системі. *Теплоізольованою називають систему, в якій тіла обмінюються теплом лише між собою.* Тобто в теплоізольованій системі не відбувається втрати теплоти в навколишнє середовище. У реальних системах такі втрати є достатньо відчутними. Так, частина теплової енергії, що виділяється конфоркою електричної плити, на якій кип'ятять воду, йде на нагрівання повітря в кімнаті. Через металеві стінки чайника теплота віддається в навколишнє середовище. Прикладом теплоізольованої системи

є калориметр — пристрій, використовуваний для дослідження теплових процесів (рис. 9.1).

Калориметр складається з двох посудин циліндричної форми, вміщених одна в одну. Між посудинами розміщений шар теплоізолятора (повітря, пінопласту тощо) для зменшення втрат тепла під час теплообміну. Зовнішня посудина прикривається кришкою, до якої можна прикріпити термометр та пристрій для перемішування рідини. Таку систему певною мірою можна вважати теплоізованою.

За законом збереження енергії для теплоізованої системи *кількість теплоти, яку віддають більш нагріті тіла, дорівнює кількості теплоти, отриманої менш нагрітими тілами в процесі теплообміну.*

Тобто кількість теплоти, яку віддасть нагрітий залізний важок, що опускається у внутрішню посудину з водою, дорівнює кількості теплоти, отриманої водою.



а) принципова схема калориметра



б) складові калориметра

Рис. 9.1. Будова калориметра



Порівняння кількості теплоти, відданої та отриманої тілами в теплових процесах, називають *тепловим балансом*. Тепловий баланс використовують у техніці для аналізу теплових процесів, які відбуваються в парових котлах, печах, теплових двигунах тощо.

### РІВНЯННЯ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ НА ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ.

Розглянемо теплообмін усередині системи, що складається з декількох тіл. Будемо вважати, що система достатньо ізольована від навколишніх тіл і її внутрішня енергія не змінюється та всередині системи не виконується робота. У процесі теплообміну до настання теплової рівноваги кожне з тіл отримує  $Q^+$  певну кількість або віддає її  $Q^-$ .

За законом збереження енергії, який справджується для теплових процесів так само, як і для всіх інших процесів у природі, у замкнутій системі під час теплопередачі одні тіла віддають таку саму кількість теплоти, яку отримують інші:

$$Q_{\text{отримана}} = Q_{\text{віддана}}, \text{ або}$$

$$Q_1^+ + Q_2^+ + Q_3^+ + \dots + Q_n^+ = Q_1^- + Q_2^- + Q_3^- + \dots + Q_m^-; \quad (9.1)$$

*Під час певного теплового процесу в теплоізольованій системі сумарна кількість теплоти, отримана одними тілами, дорівнює сумарній кількості теплоти, відданої іншими.* Рівняння (9.1) називають рівнянням теплового балансу.

\* Оскільки у фізиці прийнято вважати, що кількість теплоти, отримана тілом під час теплообміну, є додатним числом, а кількість теплоти, віддана тілом під час теплообміну, — від'ємним, то рівняння теплового балансу можна подати у вигляді:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0. \quad (9.2)$$

*Тобто в замкнутій системі сума кількостей теплоти, відданих та отриманих усіма тілами системи під час певного теплового процесу, дорівнює нулю.*

**Особливості розв'язування фізичних задач на теплові процеси з використанням рівняння теплового балансу.** Пропонуємо вам деякі рекомендації щодо розв'язування задач на визначення енергетичних характеристик теплових процесів. Насамперед уважно проаналізуйте умову задачі та визначте, чи є система, в якій відбуваються теплові процеси, замкнутою (теплоізольованою). Для замкнутої системи складають і розв'язують рівняння теплового балансу.

Послідовність розв'язування задач з використанням рівняння теплового балансу можна подати у вигляді такого алгоритму:

1. З'ясуйте, які тіла беруть участь у процесі теплообміну.

2. Визначте, якою була початкова температура кожного з тіл системи та температура системи після встановлення теплової рівноваги.

3. Проаналізуйте теплові процеси, що відбувалися з тілами до встановлення теплової рівноваги, та формули, які описують ці процеси.

4. Складіть рівняння теплового балансу. Для цього в лівій частині запишіть суму кількостей теплоти, яку одні тіла віддали під час теплообміну, а в правій — суму кількостей теплоти, яку віддали інші тіла:  $Q_1^+ + Q_2^+ + Q_3^+ + \dots + Q_n^+ = Q_1^- + Q_2^- + Q_3^- + \dots + Q_m^-$ .

5. За результатами аналізу теплових процесів запишіть формулу кількості теплоти  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  для кожного з тіл, які беруть участь у теплообміні. Врахуйте, що для визначення зміни температури кожного з тіл  $\Delta t$  потрібно від більшого значення температури відняти менше.

6. Розв'яжіть отримане рівняння відносно невідомої величини й запишіть кінцеву формулу.

7. Обчисліть шукану величину та проаналізуйте отриманий результат.

### ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНОЇ ЗАДАЧІ НА РІВНЯННЯ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ

**Задача.** У скляній колбі масою 100 г міститься 200 г води, температура якої 40 °С. У воду занурили тіло масою 200 г, нагріте до температури 90 °С. Через деякий час температура води в колбі становила 44 °С. Визначте питому теплоємність речовини, з якої виготовлене тіло.

*Дано:*

$$m_1 = 0,1 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,2 \text{ кг}$$

$$t_1 = t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c_1 = 840 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$$

$$c_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$$

$$m_3 = 0,2 \text{ кг}$$

$$t_3 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t = 44 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c_3 = ?$$

*Розв'язок*

Проаналізуємо умови задачі. Система, між тілами якої відбувається процес теплообміну, складається зі скляної колби, води та нагрітого тіла. Будемо вважати її замкненою. Отже, для розв'язування задачі потрібно скласти рівняння теплового балансу.

Поміркуємо, що відбувалося з кожним тілом системи під час теплообміну. Оскільки вода містилася в колбі певний час до того, як у неї занурили тіло, то початкова температура води й колби була однаковою і становила  $t_1 = t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплова рівновага після занурення у воду нагрітого тіла настала при температурі  $t = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тобто під час теплообміну колба та вода нагрілися до  $t = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ . При цьому занурене у воду тіло охолодилося до температури  $t = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Складемо рівняння теплового балансу, в якому  $Q_1$  — кількість теплоти, отримана колбою під час нагрівання;  $Q_2$  — кількість теплоти, отримана водою під час нагрівання;  $Q_3$  — кількість теплоти, яку віддало занурене тіло під час охолодження.

$$\text{Отже, } Q_1 + Q_2 = Q_3.$$

Використаємо формулу для визначення кількості теплоти, отриманої або відданої тілом.

$$\text{Тоді: } Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1); \quad Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2); \quad Q_3 = c_3 m_3 (t_3 - t).$$

Підставимо у рівняння теплового балансу записані вирази:

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

У результаті ми одержали рівняння з однією невідомою величиною  $c_3$ .

Розв'язавши його відносно шуканої величини, одержимо

$$c_3 = \frac{c_1 m_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_2)}{m_3 (t_3 - t)}.$$

Підставимо в отриману формулу числові значення фізичних величин. Виконаємо розрахунки:

$$c_3 = \frac{840 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0,1 \text{ кг} \cdot 4 ^\circ\text{C} + 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0,2 \text{ кг} \cdot 4 ^\circ\text{C}}{0,2 \text{ кг} \cdot 46 ^\circ\text{C}} \approx 400 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right).$$

$$\text{Одержимо } c_3 = 400 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

За табл. 7.1 встановлюємо, що отримане значення відповідає питомій теплоємності міді.

$$\text{Відповідь: } c_3 = 400 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}. \text{ Тіло виготовлене з міді.}$$

## Головне в цьому параграфі

Тепловим балансом називають порівняння кількості теплоти, одержаної та відданої тілами в теплових процесах. Під час запису рівняння теплового балансу рівноправними є міркування:

— під час певного теплового процесу в теплоізольованій системі сумарна кількість теплоти, отримана одними тілами, дорівнює сумарній кількості теплоти, відданої іншими.

$$Q_1^+ + Q_2^+ + Q_3^+ + \dots + Q_n^+ = Q_1^- + Q_2^- + Q_3^- + \dots + Q_m^-;$$

— у замкнутій теплоізольованій системі сума кількостей теплоти, відданих та отриманих усіма тілами системи під час певного теплового процесу, має дорівнювати нулю:  $Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0$ , причому кількість теплоти, отримана тілом під час теплообміну, є додатним числом, а кількість теплоти, віддана тілом під час теплообміну, — від'ємним числом.

## Запитання для самоперевірки

1. Що називають тепловим балансом?
2. Наведіть приклади теплоізолюваної системи.
3. Для розв'язування яких фізичних задач доцільно використовувати рівняння теплового балансу?
4. Запишіть рівняння теплового балансу. У чому полягає його зміст?
5. За яких умов рівняння теплового балансу є справедливим?

## Вправа до § 9

- 1(с). Обчисліть, на скільки градусів нагріється алюмінієва деталь масою 2 кг, якщо їй надати таку саму кількість теплоти, яка надходить на нагрівання води масою 880 г від 0 до 100 °С.
- 2(с). Визначте температуру води, що встановиться після того, як змішати 100 г окропу і 100 г води, взятої при температурі 10 °С.
- 3(д). Алюмінієва каструля масою 1,5 кг містить 800 г води за температури 20 °С. Скільки окропу потрібно долити в каструлю, щоб отримати воду, температура якої 45 °С?
- 4(д). У мідний калориметр масою 100 г налили 740 г води, температура якої 15 °С. Після цього в калориметр занурили брусок масою 200 г, нагрітий в окропі. Після встановлення теплової рівноваги температура в калориметрі підвищилася до 17 °С. Визначте питому теплоємність речовини, з якої виготовлено брусок.
- 5(д). Дослідіть, чи буде в закритому термосі танути лід, якщо його температура і температура води становитимуть °С.
- 6(в). У чавунну ванну, маса якої 200 кг, спочатку налили воду температурою 20 °С, а потім додали води температурою 80 °С. Після встановлення теплової рівноваги температура води стала дорівнювати 60 °С. Яку масу холодної та гарячої води налили у ванну, якщо загальний об'єм води у ванні склав 160 л?

## § 10. Плавлення твердих тіл. Кристалізація

- ▶ *Плавлення твердих тіл. Кристалізація*
- ▶ *Розрахунок кількості теплоти при плавленні твердих тіл і кристалізації*



Рис. 10.1.  
Плавлення  
льоду

### ПЛАВЛЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ. КРИСТАЛІЗАЦІЯ.

Вивчаючи агрегатні стани речовини ви ознайомилися з плавленням і кристалізацією твердих тіл.

**Плавленням** називають процес переходу речовини з твердого стану в рідкий (рис. 10.1).

Зворотний процес переходу речовини з рідкого стану в твердий називають **кристалізацією (твердненням)**. Кристалічні тіла плавляться та тверднуть за певної сталої для кожної речовини температури, яку називають **температурою плавлення**. Різні кристалічні тіла плавляться та тверднуть при різних температурах (табл. 10.1).

Таблиця 10.1

**Температура плавлення та кристалізації деяких речовин**

Речовина	Температура плавлення/кристалізації $t_{пл}^{\circ}$
Ртуть	-39
Лід	0
Галій	29,8
Олово	232
Свинець	327
Алюміній	660
Срібло	960
Сталь	1400
Вольфрам	3387

Для кожної кристалічної речовини є своя температура плавлення. Наприклад, температура плавлення вольфраму становить 3387 °С, заліза — 1535 °С, алюмінію — 660 °С, нафталіну — 80 °С. Є метали, які плавляться при температурі, меншій за температуру тіла людини (рис. 10.2).

Під час нагрівання твердого тіла інтенсивність коливального руху молекул у кристалі підвищується, а з досягненням температури плавлення коливання стають такими інтенсивними, що молекули (атоми) уже не можуть утриматися у вузлах ґратки і вона руйнується — відбувається плавлення. У процесі плавлення вся енергія, що передається твердому тілу, надходить на руйнування його кристалічної ґратки, тому під час плавлення температура кристалічної речовини залишається сталою.

*Отже, внутрішня енергія розплаву завжди більша, ніж внутрішня енергія такої самої маси кристалів за тієї самої температури.*

Спостереження показують, що температура плавлення не тільки визначається природою речовини, а й залежить від тиску. Якщо плавлення речовини супроводжу-



Рис. 10.2. Температура плавлення металу галію становить 29 °С

ється збільшенням її об'єму, то зі зростанням зовнішнього тиску температура плавлення цієї речовини підвищується. Якщо плавлення речовини супроводжується зменшенням її об'єму (наприклад, льоду, чавуну, вісмуту, сурми), то під час підвищення зовнішнього тиску температура плавлення цієї речовини знижується.

Під час кристалізації речовини відбувається протилежний процес. Середня кінетична енергія молекул зменшується. Сили притягання починають утримувати молекули між собою. Як наслідок, рух молекул стає впорядкованим — утворюються кристали. Енергія, що виділяється під час тверднення речовини, витрачається на підтримання сталої температури. *Температура кристалізації речовини дорівнює температурі її плавлення.*

Досліди показують: якщо взяти різні речовини однакової маси, то для перетворення цих речовин у рідину при температурі плавлення необхідна різна кількість теплоти.

Фізичну величину, що показує кількість теплоти, необхідну для повного перетворення 1 кг кристалічної речовини з твердого стану в рідкий за сталої температури плавлення, називають питомою теплотою плавлення:

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \quad (10.1)$$

Одиницею питомої теплоти плавлення у СІ є:

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

Питому теплоту плавлення кристалічної речовини визначають експериментально за допомогою калориметра. У табл. 10.2 наведено значення питомої теплоти плавлення та кристалізації певних речовин.

Таблиця 10.2

**Питома теплота плавлення та кристалізації речовини**

Речовина	Питома теплота плавлення (кристалізації), $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ за $t_{\text{пл}}^{\circ}$
Галій	5 590
Свинець	25 000
Олово	59 000
Сталь	82 000
Срібло	87 000
Мідь	180 000
Лід	330 000
Алюміній	380 000



З формули (10.1) випливає, що для плавлення твердого тіла масою  $m$  потрібно надати кількість теплоти, пропорційну його масі:

$$Q = \lambda m. \quad (10.2)$$

Відповідно до закону збереження енергії, під час кристалізації речовини виділяється певна кількість теплоти. Тому під час випадання снігу підвищується температура навколишнього середовища. За кристалізації речовини її внутрішня енергія зменшується. Кількість теплоти, що виділяється під час кристалізації речовини, визначають за формулою

$$Q = -\lambda m. \quad (10.3)$$

Особливості плавлення та кристалізації твердих тіл розглянемо на прикладі графіка залежності температури льоду від часу його нагрівання (рис. 10.3). По горизонтальній осі відкладено час нагрівання, а по вертикальній — температуру в градусах Цельсія. Для спостереження візьмемо певну кількість льоду при температурі  $-40^\circ\text{C}$ . Нехай для нагрівання використано нагрівник постійної потужності, тоді кількість теплоти, яка ним виділяється, буде прямо пропорційна часу роботи нагрівника (кількість теплоти дорівнює добутку потужності нагрівника на час його роботи).

При нагріванні льоду до  $0^\circ\text{C}$  його температура збільшилася від  $-40^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$  (ділянка  $AB$ ). Збільшення температури відбувалося до  $0^\circ\text{C}$  — температури плавлення льоду. При досягненні  $0^\circ\text{C}$  лід почав плавитися, а температура суміші льоду й утвореної з нього води не змінювалася, хоча нагрівання тривало (ділянка на графіку  $BC$ ). Після того як увесь лід розтанув, температура утвореної води почала підвищуватися (ділянка  $CD$ ).

Розглянемо процес охолодження та кристалізації води. Продовжимо розгляд графіка на ділянках  $DE$ ,  $EF$ ,  $FK$ . Коли температура води досягла  $+40^\circ\text{C}$  (точка  $D$ ), нагрівання води припинилося,

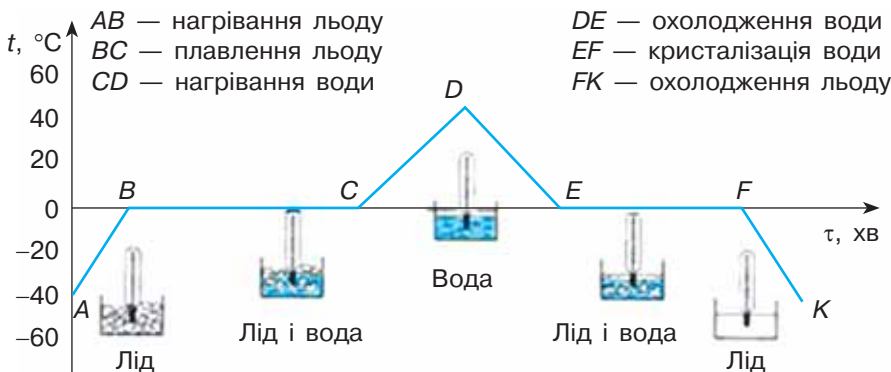


Рис. 10.3. Графік залежності температури льоду від часу його нагрівання

вода стала охолоджуватися (ділянка  $DE$ ). Коли температура води знизилася до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (точка  $E$ ), почався процес кристалізації води. Кристалізація відбувається, як бачимо, при сталій температурі, що дорівнює температурі плавлення (ділянка  $EF$ ) з виділенням теплоти речовиною. Відповідно до закону збереження енергії виділена енергія дорівнює теплоті плавлення. Поки вся вода не замерзає, її температура не змінюється, і лише після завершення процесу кристалізації температура утвореного льоду починає знижуватися (ділянка  $FK$ ).

**РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОТИ ПРИ ПЛАВЛЕННІ ТВЕРДИХ ТІЛ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЇ.** Аналізуючи особливості процесів плавлення та кристалізації твердих тіл, можна зробити висновок, що для плавлення речовини, взятої при температурі плавлення, їй необхідно надати кількість теплоти, обчислену за формулою (10.2):  $Q = \lambda m$ .

Для того щоб розплавити кристалічну речовину, взяту при температурі  $t$  (нижчій за температуру плавлення), її спочатку необхідно нагріти до температури плавлення, надавши кількість теплоти  $Q_1 = cm(t_{\text{пл}} - t)$ , а потім надати кількість теплоти, необхідну для плавлення:  $Q_2 = \lambda m$ .

Отже, кількість теплоти, потрібна для плавлення речовини, взятої при температурі, нижчій за температуру плавлення, обчислюється за формулою:

$$Q = cm(t_{\text{пл}} - t) + \lambda m. \quad (10.4)$$

Під час охолодження та тверднення кристалічна речовина виділить таку саму кількість теплоти:

$$Q = cm\Delta t + \lambda m. \quad (10.5)$$

Зверніть увагу, що розраховуючи кількість теплоти, яку видає тіло під час охолодження до температури тверднення, зміну температури  $\Delta t$  визначають, віднімаючи від більшого значення менше.

### Головне в цьому параграфі

Кристалічні тіла плавляться і тверднуть за певної, сталої для кожної речовини, температури, яку називають температурою плавлення. Температура плавлення речовини дорівнює температурі її кристалізації.

Під час процесу плавлення (тверднення) речовини її температура не змінюється.

Внутрішня енергія розплаву завжди більша, ніж внутрішня енергія такої самої маси кристалів за тієї самої температури.

Фізичну величину, що показує кількість теплоти, необхідну для повного перетворення 1 кг кристалічної речовини з твердого стану в рідкий

за сталої температури плавлення, називають питомою теплотою плавлення  $\lambda = \frac{Q}{m}$ . У СІ питому теплоту плавлення вимірюють у джоулях на кілограм  $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$ .

Для плавлення кристалічного тіла масою  $m$  йому потрібно надати кількість теплоти, пропорційну масі тіла  $Q = \lambda m$ .

Під час тверднення речовини її внутрішня енергія зменшується, за рахунок виділення кількості теплоти, що дорівнює  $Q = -\lambda m$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають плавленням речовини?
2. Що називають кристалізацією речовини?
3. Назвіть основні особливості процесів плавлення та кристалізації.
4. Поясніть, чому під час плавлення та кристалізації речовини її температура не змінюється.
5. Порівняйте внутрішню енергію речовини, взятої при температурі плавлення, та її розплаву.
6. Що називають питомою теплотою плавлення?
7. Як обчислюють кількість теплоти, необхідну для плавлення речовини, взятої за температури плавлення?

### Вправа до § 10

- 1(п). Поясніть, які зміни внутрішньої енергії відбуваються при плавленні 1 кг льоду та 1 кг заліза, взятих при температурі плавлення.
- 2(п). Поясніть, які зміни внутрішньої енергії відбуваються при кристалізації 1 кг олова.
- 3(с). Яку кількість теплоти потрібно витратити, щоб розплавити 150 кг міді при температурі її плавлення?
- 4(с). Визначте речовину, при кристалізації 40 г якої виділяється 6 кДж теплоти.
- 5(д). Свинець масою 100 г, взятий при температурі 27 °С, розплавив у сталевій коробці. Знайдіть масу коробки, якщо кількість теплоти, витраченої на теплові процеси, дорівнює 44,2 кДж.
- 6(д). Визначте температуру льоду, що утворився з води масою 5 кг, взятої при температурі 10 °С, якщо під час кристалізації виділилися 2,225 МДж теплоти.
- 7(в). У посудині міститься 2 л води, що має температуру 30 °С. Визначте температуру, яка встановиться в посудині, якщо туди додали 200 льоду, температура якого 0 °С.

## ВЧИМОСЯ РОЗВ'ЯЗУВАТИ ФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ НА ТЕПЛОВІ ЯВИЩА РАЗОМ

Шановні друзі!

У восьмому класі ви продовжуєте навчатися розв'язувати фізичні задачі різних типів. Приклади та особливості розв'язування розрахункових задач наведено в підручнику у відповідних параграфах. Пропонуємо вам короткі поради щодо розв'язування якісних, експериментальних і графічних фізичних задач на теплові процеси, які важливі для ґрунтового опанування курсу фізики восьмого класу.

**Якісні фізичні задачі.** Незважаючи на те, що такі задачі, як правило, не потребують використання формул і громіздких обчислень, для їх розв'язання надзвичайно важливо правильно вибудувати логічні міркування, що базуються на основних фізичних законах. Тому потрібно ґрунтовно та усвідомлено працювати з навчальним матеріалом, зокрема підручника.

Під час розв'язування якісних фізичних задач на теплові явища слід звернути увагу на їхні основні енергетичні характеристики (наприклад, кінетична енергія хаотичного руху мікрочастинок, потенціальна енергія взаємодії частинок речовини, внутрішня енергія тіла, температура тощо), а також на підпорядкованість теплових процесів закону збереження енергії.

Основними етапами під час розв'язування якісної задачі є:

1. Уважне читання умови задачі, з'ясування всіх термінів, які вона містить.
2. Аналіз умови та з'ясування фізичних явищ, що в ній описані, побудова схем та креслень.
3. Побудова ланцюжка логічних міркувань, підкріплених фізичними знаннями.
4. Аналіз запропонованої відповіді з погляду її фізичного змісту, відповідності умові задачі та практичному досвіду.

Наведемо приклад розв'язування якісної фізичної задачі.

*Задача 1.* У § 6 підручника наголошується, що під снігом посіви озимої пшениці надійно захищені від вимерзання. Поясніть, за яких умов сніговий покрив краще захищає посіви: взимку, при постійній температурі менше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , чи ранньою весною, коли можливе тимчасове підвищення температури навіть до додатних значень?

*Розв'язок.* Проаналізуємо умову задачі. У ній розглядаються теплові процеси, тому потрібно звернути увагу на особливості теплопередачі в першому та другому випадках. Теплоізоляційні властивості снігу пов'язані з його здатністю погано проводити

тепло. Але це характерно лише для пухкого снігу, який постійно перебуває при температурі менше  $0^{\circ}\text{C}$ . При цьому між кристаликами снігу міститься багато повітря, яке має невелику теплопровідність (рис. 10.4).

Якщо температура навколишнього повітря хоча б тимчасово буде вищою  $0^{\circ}\text{C}$  (температура танення льоду), верхній шар буде танути, сніг ущільнюватиметься, повітряні прошарки зменшуватимуться і теплопровідність зростатиме (рис. 10.5).

Тобто пухкий сніг значно краще зберігає посіви від вимерзання, ніж щільний. Таким чином, озимина витримує значно більші морози під пухким снігом, ніж незначні під щільним.

**Експериментальні фізичні задачі.** Важливою особливістю розв'язування фізичних задач є використання лабораторного та демонстраційного (якщо задача розв'язується в шкільному фізичному кабінеті), а також найпростішого саморобного (домашній експеримент) обладнання.

У школі ви розв'язуєте експериментальні задачі під керівництвом учителя з дотриманням основних правил безпеки життєдіяльності. Наголосимо, що дотримання правил безпеки є основною умовою й домашнього експерименту. Бажано його виконувати за допомогою дорослих. Але у будь-якому разі необхідно пам'ятати, що не можна користуватися електричним струмом, окропом, газом, легкозаймистими та небезпечними речовинами. Експериментальні фізичні задачі, запропоновані вам у рубриці «Домашній експеримент», є безпечними за умови дотримання найпростіших правил безпеки життєдіяльності.

Так само, як і якісні, експериментальні фізичні задачі потребують ретельного вивчення та аналізу їхніх умов, знання основних фізичних законів і логічних міркувань. Але їхньою важливою особливістю є доцільність складання схеми та плану експерименту, його відтворення за допомогою найпростіших підручних засобів.



Рис. 10.4. Структура пухкого снігу забезпечує його теплоізоляційні властивості



Рис. 10.5. При підвищенні температури сніг ущільнюється і його теплопровідність зростає

Тому експериментальні фізичні задачі виконуйте за схемою:

1. Ознайомлення та усвідомлення умов експериментальної задачі. Особливу увагу звертайте на додаткові умови (наприклад, нехтування втратами тепла на зовнішнє середовище).

2. Визначення фізичного явища та процесів, які описуються в експериментальній умові, з'ясування фізичного закону, що лежить у його основі.

3. Залежно від умови задачі: складання схеми та плану проведення експерименту, добір приладів, виконання експерименту й узагальнення отриманих результатів; або проведення теоретичних розрахунків та їх експериментальна перевірка.

Наведемо приклад експериментальної задачі.

*Задача 2.* Візьміть два порожні однакові металеві контейнери (бляшанки) для чаю або кави, один із яких має темну поверхню, а другий світлу. Налийте в них однакову кількість гарячої води з-під крана, попередньо вимірявши її температуру, та поставте на теплоізоляційну підставку для посуду (рис. 10.6).

Через декілька хвилин виміряйте температуру в кожному контейнері. За допомогою електронного термометра це можна зробити майже одночасно. Порівняйте виміряні значення. Поясніть різницю температур у контейнерах.

*Виконання експериментального завдання та обґрунтування результатів.* Готуючи експеримент, звертаємо увагу на те, що потрібно використовувати два однакові порожні контейнери (бляшанки) з різним кольором поверхні. У кожний з них заливаємо обережно однакову кількість гарячої води та залишаємо на декілька хвилин. Швидко вимірюємо температуру в кожній із посудин. Помітимо, що в посудині з поверхнею темного кольору температура нижча, ніж у посудині світлого кольору.

Для пояснення результату експерименту проаналізуємо умови задачі та визначимо початкові умови й особливості перебігу



Рис. 10.6. Однакову кількість гарячої води з-під крана наливають у контейнери та вимірюють температуру



фізичних процесів. Вода заливається в однакові (об'єм, матеріал) контейнери, які відрізняються тільки кольором поверхні. Початкова температура води, що заливається, а також її маса теж однакові. Тобто внутрішня енергія води в обох посудинах на початку експерименту однакова. Через певний час температура води в посудинах знижується, отже, зменшується її внутрішня енергія. Між контейнерами із водою та навколишнім середовищем відбувається процес теплообміну. Поміркуємо, який вид теплообміну спостерігається. Посудини з гарячою водою контактують лише з теплоізоляційною підставкою та повітрям, що мають низьку теплопровідність. Тому в цьому експерименті відбувається такий вид теплообміну, як теплове випромінювання, зумовлене перетворенням внутрішньої енергії в теплове випромінювання. Охолоджуючись, посудина з водою випромінює теплову енергію.

Як вам відомо, темні поверхні випромінюють енергії більше, ніж тіла з білими (сріблястими) поверхнями. Таким чином, внутрішня енергія посудини з чорною поверхнею зменшуватиметься швидше. Тобто температура води в ній буде нижчою, ніж у посудині зі світлою поверхнею.

**Графічні задачі.** У таких задачах об'єктом дослідження є графіки залежностей фізичних величин. Аналіз графіків дає можливість визначати кількісні співвідношення між фізичними величинами та складати формули.

Для розв'язування графічної фізичної задачі виконують такі дії:

1. Аналізують умову задачі та звертають увагу на те, залежність між якими фізичними величинами показує графік.
2. Вивчають графік, з'ясовують характер залежностей між фізичними величинами на кожному з відрізків.
3. Користуючись масштабом і графіком визначають невідомі величини.
4. Аналізують отримані результати та роблять висновки відповідно до запитань задачі.

Графічна задача може передбачати також побудову графіків залежностей між фізичними величинами за умовою задачі або табличними даними. У такому разі креслять осі координат, обирають масштаб, складають (або беруть із довідників) таблиці, наносять на координатну площину відповідні точки та з'єднують їх лініями.

**Задача 3.** Проаналізуйте графік плавлення певної речовини (рис. 10.7). Охарактеризуйте особливості теплових процесів на

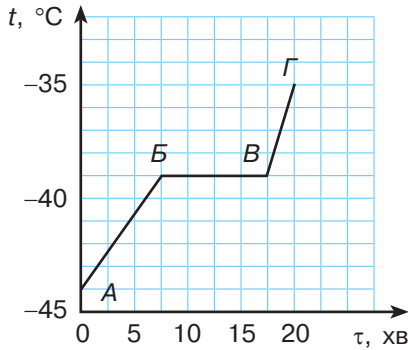


Рис. 10.7. Графік залежності температури речовини від часу

ділянках  $AB$ ,  $BB$ ,  $ВГ$ . Визначте речовину, тепловий стан якої характеризує цей графік.

*Розв'язок.* Графік відображає залежність температури речовини від часу. Охарактеризуємо особливості теплового процесу на кожному з відрізків.

1. Враховуючи початкову температуру речовини ( $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), можемо зробити висновок, що вона перебувала у твердому стані. На ділянці  $AB$  температура речовини збільшується, отже, вона нагрівається.

2. На ділянці  $BB$  температура речовини стала, тобто відбувається її плавлення.

3. На ділянці  $ВГ$  температура речовини збільшується, а відповідно, речовина нагрівається.

4. Плавлення речовини відбувається при температурі  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За табл. 10.1 визначаємо, що ця речовина — ртуть.

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ З ТЕМИ «ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ»

1(п). Визначте, як змінюється внутрішня енергія речовини під час плавлення:

- А) збільшується;
- Б) спочатку збільшується, а потім зменшується;
- В) зменшується;
- Г) не змінюється

2(п). Порівняйте значення внутрішньої енергії води та льоду однакової маси взятих при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

- А) більша в льоду; Б) однакова;
- В) більша у воді; Г) не залежить від агрегатного стану

3(п). Укажіть фізичну величину, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, що виділяється при охолодженні  $1\text{ кг}$  речовини на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

- А) питома теплота пароутворення речовини;
- Б) теплоємність тіла;
- В) питома теплота плавлення речовини;
- Г) питома теплоємність речовини.





- 13(д). У воду масою 1,2 кг, температура якої 15 °С, занурили металеву деталь масою 1,92 кг, нагріту в окропі. Температура води внаслідок цього підвищилася до 36 °С. Визначте, з якого металу виготовлено деталь.
- 14(д). Для отримання теплої води в посудині змішали 2 кг холодної води, температура якої 10 °С, та 3 кг гарячої води, температура якої 80 °С. Визначте температуру води у посудині після встановлення теплової рівноваги. Питома теплоємність води 4200 Дж/(кг · °С). Втратами теплоти та теплоємністю посудини знехтуйте.
- 15(в). У посудині перебуває лід масою 8 кг за температури –20 °С. Визначте масу льоду після надання посудині кількості теплоти 1,5 МДж.

## § 11. Випаровування рідини. Конденсація

- ▶ Випаровування рідини
- ▶ Конденсація

**ВИПАРОВУВАННЯ РІДИН.** Чекаючи, поки остигає щойно заварений чай, придивіться уважно, що відбувається над поверхнею чашки. Говорять, що гаряча вода “парує”. Насправді, водяна пара, яка міститься в повітрі, — невидима. Про її наявність, наприклад, над поверхнею чашки або озера свідчить туман — маленькі краплинки води, які утворюються внаслідок того, що частина пари перетворюється знову в рідину (рис. 11.1).

Над поверхнею води, що кипить, скажімо, в чайнику, також утворюється туман. Молекули рідини перебувають у безперервному хаотичному русі. Деякі молекули, що опиняються на поверхні рідини, можуть залишити її і вийти у простір над рідиною. *Сукупність молекул над поверхнею рідини утворює пару.*



Рис. 11.1. Поява туману (маленьких крапельок води) свідчить про наявність водяної пари

*Явище переходу рідини в пару називають пароутворенням. Одним зі способів пароутворення є випаровуванням.*

**Випаровування — пароутворення, що відбувається за будь-якої температури з вільної поверхні рідини.**

Оскільки з рідини під час випаровування вилітають найшвидші молекули, то середня швидкість руху тих молекул, що залишилися, а відповідно, і температура рідини, зменшується, тому *під час випаровування температура рідини стає децю нижчою.*

Процес випаровування рідини супроводжується поглинанням енергії. Наприклад, після змочування шкіра людини охолоджується через випаровування води з поверхні тіла. При цьому на поверхні тіла відчувається прохолода. Спекотного дня рекомендують у кімнаті завішувати вікна вологими простирадлами. Під час їх висихання вода буде випаровуватися, поглинаючи теплову енергію і знижуючи температуру повітря в кімнаті. Продукти харчування перевозять спеціальними транспортними засобами, обладнаними холодильними пристроями, у роботі яких використовується випаровування рідкого холодильного агента. У місцевостях із жарким кліматом воду намагаються зберігати у пористих глиняних посудинах. Вода, просочуючись крізь пори такої посудини, випаровується і в результаті залишається прохолодною.

Випаровування має велике значення в природі, житті людини і тварин (рис. 11.2). Утруднення випаровування погіршує охолодження тіла і може призвести до його перегрівання. Випаровування є невід'ємною умовою кругообігу води в природі.

*Інтенсивність випаровування залежить від: площі відкритої поверхні рідини (чим більша поверхня, тим більша кількість мо-*



Рис. 11.2. Випаровування в природі



лекул вилітає з неї), *температури* (з підвищенням температури процес випаровування стає інтенсивнішим) та *зовнішніх умов*. Наприклад, вам відомо, що у вітряну суху погоду розвішена на дворі мокра білизна сохне значно швидше, ніж у безвітряну погоду після дощу. Швидкість випаровування залежить також від *природи речовини, що випаровується*. Зокрема, вода випаровується швидше за олію, але спирт випаровується швидше, ніж вода. Це пояснюється різними силами взаємодії між молекулами названих речовин.

Досвід показує, що випаровуватися можуть і тверді тіла. Наприклад, лід, який утворився на калюжі, поступово зникає. Існує явище, під час якого речовина переходить із твердого стану в газоподібний, оминаючи рідкий стан. Процес переходу речовини з твердого стану в газоподібний називають *сублімацією*.

\* Всі живі організми на Землі на 80—90 % складаються з води. Впродовж доби через поверхню шкіри та легені людина втрачає її до 2 кг. Водяна пара постійно наявна в атмосферному повітрі, тому рівень її вмісту надзвичайно важливий для здоров'я людини. Шкідливими для живих організмів є як надмірний вміст водяної пари, так і недостатня її кількість. Для характеристики вмісту водяної пари в повітрі застосовують таку фізичну величину, як відносна вологість. Нормальне значення відносної вологості в помешканнях за кімнатної температури становить 40—60 %.

Підтримання необхідної вологості є обов'язковою умовою зберігання книг, картин, музичних інструментів, харчових продуктів. Тому сьогодні широко використовують спеціальні прилади, які підвищують або зменшують вологість повітря (рис. 11.3).

Для вимірювання вологості застосовують спеціальні прилади, наприклад, гігromетри та психрометри (рис. 11.4).



Рис. 11.3.  
Зволожувач повітря



а)



б)

Рис. 11.4. Прилади для вимірювання відносної вологості:  
а) гігromетр;  
б) психрометр



Рис. 11.5. Конденсація водяної пари



Рис. 11.6. Утворення паморозі внаслідок конденсації води з газуватого у твердий стан

**КОНДЕНСАЦІЯ.** У процесі хаотичного руху деякі молекули, що містяться у парі, можуть повернутись у стан рідини — відбувається конденсація.

*Процес переходу речовини з пари в рідину називають конденсацією.*

Конденсацію водяної пари ви можете спостерігати під час її охолодження. Наприклад, улітку вночі, коли повітря стає холоднішим, водяна пара, що міститься у повітрі, конденсується, утворюючи краплинки роси на рослинах. Водяна пара конденсується на склі залишеного без провітрювання вікна на кухні, особливо взимку (рис. 11.5).

*Конденсація пари супроводжується виділенням енергії.* Цим пояснюється той факт, що одразу після дощу стає дещо тепліше.

За певних умов можлива конденсація речовини з газуватого стану відразу в твердий. Таке явище ви можете спостерігати взимку, коли з водяної пари утворюються паморозь на деревах або візерунки на склі в салоні автобуса, який ще не встиг достатньо прогрітися (рис. 11.6).

**Головне в цьому параграфі**

Сукупність молекул, що перебувають у просторі над рідиною, називають парою, а процес переходу рідини у стан пари — пароутворенням.

Пароутворення відбувається двома способами — випаровуванням і кипінням.

Випаровування — пароутворення, що відбувається за будь-якої температури з вільної поверхні рідини.

Інтенсивність випаровування залежить від площі відкритої поверхні рідини, її температури та зовнішніх умов.

Конденсацією називають процес переходу речовини з пари в рідину.

**Запитання для самоперевірки**

1. Що називають пароутворенням; конденсацією; випаровуванням; парою?
2. Назвіть чинники, від яких залежить інтенсивність випаровування рідини.
3. Поясніть, чому під час випаровування рідини її температура знижується.
4. Поясніть, чому конденсація супроводжується підвищенням температури.
5. Поясніть, яке значення мають випаровування та конденсація в природі та житті людини.

**Домашній експеримент**

1. Наберіть у високу вузьку склянку та блюдце однакову кількість води. Залиште їх на декілька днів на підвіконні. Порівняйте кількість води, що залишилася в кожній посудині. Поясніть результат експерименту.

2. Подихайте на дерев'яну поверхню, а потім на дзеркало. Порівняйте спостережувані явища.

**Вправа до § 11**

- 1(с). Поясніть, чому для виготовлення парфумів використовують спирт, а не воду.
- 2(с). Поясніть, чому ґрунт просихає швидше у вітряну погоду.
- 3(д). Під час випускання газу з балона вентиль вкривається росою. Поясніть це явище.
- 4(д). Поясніть, чому сирі дрова під час горіння потріскують.
- 5(д). Поясніть, чому в закритій посудині рідина встигає повільніше.
- 6(д). Чому окуляри «запотівають» (вкриваються краплинками води) коли в морозний день зайти з вулиці в тепле приміщення, а не навпаки?

## § 12. Кипіння рідини

- ▶ *Кипіння рідини*
- ▶ *Температура кипіння*

**КИПІННЯ РІДИНИ.** У попередньому параграфі ви дізналися, що одним зі способів пароутворення є випаровування. Пароутворення також відбувається у процесі *кипіння*. На відміну від випаровування, під час кипіння перетворення на пару відбувається як на поверхні, так і всередині рідини.

Розглянемо особливості перебігу процесу кипіння. Поступово під час нагрівання води на внутрішній поверхні посудини утворюються маленькі бульбашки повітря, яке завжди присутнє у воді (рис. 12.1, а).

Під час нагрівання вода випаровується вздовж поверхні бульбашки в її середину. З підвищенням температури бульбашка заповнюється не тільки повітрям, розчиненим у воді, а й водяною паром (рис. 17.1, б). Зі збільшенням кількості водяної пари всередині бульбашок їхній об'єм поступово збільшується. Відповідно, зростає і виштовхувальна сила, бульбашки відриваються від поверхні посудини та рухаються до поверхні рідини.

Якщо вода ще не прогріта і верхні її шари залишаються холодними, бульбашки стискаються, створюючи характерний шум, який ми чуємо перед початком кипіння рідини (рис. 17.1, в). Якщо продовжувати нагрівати воду, процес пароутворення відбувається інтенсивніше. Кількість пари всередині бульбашок стає більшою, відповідно підвищується і її тиск. Як наслідок, об'єм бульбашок зростає і за певної температури рідини бульбашки спливають на поверхню та лопаються, а водяна пара, що містилася в бульбашках, виходить назовні (рис. 17.1, г).

*Кипіння — процес утворення пари не тільки на поверхні рідини, а й у її об'ємі.*

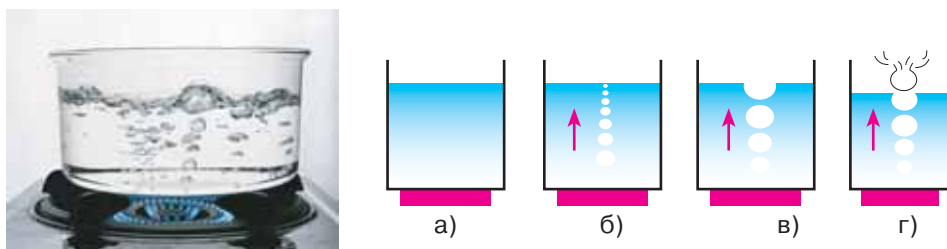


Рис. 12.1. Кипіння рідини

**ТЕМПЕРАТУРА КИПІННЯ.** Температуру, за якої рідина кипить, називають температурою кипіння. У процесі кипіння температура рідини не змінюється. За нормального атмосферного тиску над поверхнею рідини термометр, вміщений у воду під час її кипіння, показує одну й ту саму температуру, приблизно  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тому на графіку залежності температури води від часу кипіння відповідає відрізок  $BC$  (рис. 12.2).

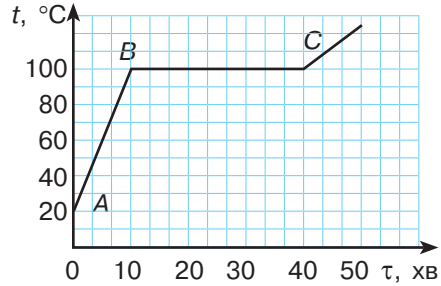


Рис. 12.2. Графік залежності температури води від часу кипіння

Це відбувається тому, що вся енергія, яка надається рідині, витрачається на збільшення її внутрішньої енергії та руйнування зв'язків між молекулами.

Внутрішня енергія пари завжди більша за внутрішню енергію рідини при тій самій температурі. Різні речовини мають свою температуру кипіння (табл. 12.1).

Таблиця 12.1

**Температура кипіння різних речовин**  
(за нормального атмосферного тиску)

Речовина	Температура кипіння $t$ , $^{\circ}\text{C}$
Гелій	-269
Водень	-253
Ефір	35
Спирт	78
Вода	100
Ртуть	357
Свинець	1745
Вольфрам	5680

\*На практиці та в результаті дослідів було встановлено, що температури кипіння залежать не тільки від роду речовини, а й від *тиску*. Чим більший зовнішній тиск над поверхнею рідини, тим вищою буде температура кипіння рідини і навпаки. Наприклад, на висоті 5 км над рівнем моря, де тиск удвічі нижчий від нормального атмосферного, температура кипіння води становить  $83\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тому воду можна закип'ятити, але приготувати страву буде складніше. Таким чином, при зниженні тиску зменшується температура кипіння речовини. Водночас при збільшенні тиску температура кипіння зростає.



Рис. 12.3. Використання залежності температури рідини від тиску:  
а) «скороварка»; б) автоклав; в) паровий котел високого тиску

Залежність температури кипіння від тиску широко використовують у технологічних процесах. Наприклад, зниження тиску забезпечує роз'єднання нафтопродуктів, а також використовується в цукроварінні (сироп кипить за зниженого тиску та порівняно невисокої температури, завдяки чому цукор не пригорає).

Підвищення тиску в «скороварці» за рахунок щільної кришки збільшує температуру. При цьому температура кипіння води досягає  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а процес приготування їжі прискорюється майже в 4 рази. Так само працюють автоклави, в яких консерви готуються при високих температурах, що забезпечує усунення шкідливих мікроорганізмів. У парових котлах, де тиск у 15 разів перевищує атмосферний, вода кипить за температури близько  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 12.3).

### Головне в цьому параграфі

Кипіння — це процес утворення пари не тільки на поверхні рідини, а й у її об'ємі.

Температуру, за якої рідина кипить, називають температурою кипіння. У процесі кипіння температура рідини не змінюється.

Чим більший зовнішній тиск, тим вища температура кипіння.

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають кипінням?
2. Що називають температурою кипіння?
3. Поясніть, чому в процесі кипіння рідини її температура не змінюється.
4. Від чого залежить температура кипіння рідини?
5. Наведіть приклади використання явища кипіння рідини в техніці.



**Вправа до § 12**

- 1(п). Поясніть, чим процес кипіння рідини відрізняється від її випаровування.
- 2(п). Порівняйте енергію водяної пари та води за однакової температури.
- 3(с). Поясніть, чому під час приготування страв для прискорення кипіння посуд накривають кришкою.
- 4(с). Проаналізуйте графік залежності температури води від часу. Укажіть, яка ділянка відповідає процесу кипіння.

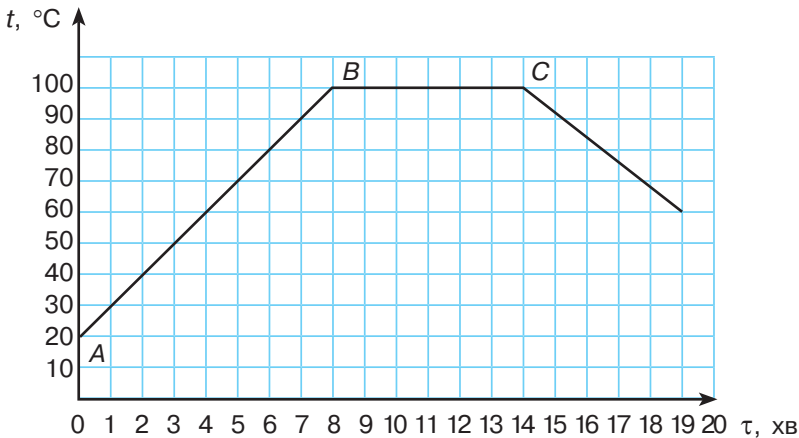


Рисунок до завдання 4

### § 13. Розрахунок кількості теплоти при пароутворенні та конденсації

- ▶ *Питома теплота пароутворення та конденсації*
- ▶ *Розрахунок кількості теплоти при пароутворенні та конденсації*

#### **ПИТОМА ТЕПЛОТА ПАРОУТВОРЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЇ.**

Ви вже знаєте, що процес пароутворення пов'язаний з підвищенням температури речовини й, відповідно, зі збільшенням її внутрішньої енергії. Тобто для перетворення рідини в пару потрібно речовині надати певну теплову енергію. Експериментально встановлено, що кількість теплоти, необхідна для перетворення рідини на пару, залежить від молекулярної будови речовини та характеризується питомою теплотою пароутворення.

*Питомою теплотою пароутворення називають фізичну величину, що характеризує кількість теплоти, потрібну для перетворення рідини масою 1 кг без зміни її температури в пару.*

Питому теплоту пароутворення позначають літерою  $r$ . У СІ питому теплоту пароутворення вимірюють у джоулях, поділених на кілограм  $[r] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ . Питому теплоту пароутворення визначають експериментально за допомогою калориметра. У табл. 13.1. наведено значення питомої теплоти пароутворення для певних речовин.

Таблиця 13.1

**Питома теплота пароутворення деяких речовин, при  $t^\circ$  кипіння й нормальному атмосферному тиску**

Речовина	Питома теплота пароутворення, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Гелій	20 600
Ртуть	290 000
Ефір	350 000
Водень	454 000
Спирт	900 000
Вода	2 300 000
Олово	2 450 000
Нікель	6 480 000
Свинець	8 600 000

Для визначення величини питомої теплоти пароутворення речовини за сталої температури та атмосферного тиску потрібно кількість теплоти  $Q$ , витрачену на випарування рідини масою  $m$ , розділити на масу рідини:

$$r = \frac{Q}{m}. \quad (13.1)$$

З даних табл. 13.1 бачимо, що, наприклад, для випаровування 1 кг спирту при температурі кипіння ( $78^\circ\text{C}$ ) потрібно витратити 900 кДж енергії, а для випаровування 1 кг ртуті при температурі кипіння ( $357^\circ\text{C}$ ) — 290 кДж. Отже, для випаровування однакових мас рідин при температурі кипіння необхідно витратити різну кількість теплоти. Питома теплота пароутворення речовини залежить також від температури та тиску.

За температури, яка дорівнює або менша від температури випаровування, пара конденсується. При цьому вивільнюється енергія, поглинута речовиною під час утворення пари. Досліди показують, що, *конденсуючись, пара віддає стільки енергії, скільки вона отримала під час пароутворення*. Тому питома теплота конденсації дорівнює питомій теплоті пароутворення (див. табл. 13.1).

### РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОТИ ПРИ ПАРОУТВОРЕННІ ТА КОНДЕНСАЦІЇ.

Питома теплота пароутворення характеризує кількість теплоти, необхідну для повного перетворення в пару певної речовини. Щоб випарувати 10 кг цієї речовини, потрібно надати їй теплову енергію в 10 разів більшу. Наприклад, для перетворення води масою 10 кг, взятої при температурі кипіння, на пару потрібно витратити кількість теплоти  $Q = 2,3 \text{ МДж/кг} \cdot 10 \text{ кг} = 23 \text{ МДж}$ .

У загальному випадку кількість теплоти, яку необхідно витратити, щоб повністю перетворити в пару  $m$  кг речовини, розраховують за формулою:

$$Q = rm. \quad (13.2)$$

Із цієї формули за відомими значеннями кількості теплоти, витраченої на перетворення рідини в пару, та питомої теплоти пароутворення можна визначити масу рідини:

$$m = \frac{Q}{r}. \quad (13.3)$$

Якщо потрібно повністю перетворити в пару рідину, що має температуру  $t$  нижчу, ніж температура кипіння, її спочатку необхідно нагріти до температури кипіння  $t_{\text{кип}}$ , надавши їй кількість теплоти  $Q_1 = cm(t_{\text{кип}} - t)$ , а потім додатково надати кількість теплоти, потрібну для пароутворення при температурі кипіння  $Q_2 = rm$ .

Отже, кількість теплоти, необхідна для перетворення в пару рідини, взятої при температурі, нижчій за температуру кипіння, обчислюється за формулою:

$$Q = Q_1 + Q_2 = cm(t_{\text{кип}} - t) + rm.$$

Під час конденсації та охолодження рідини до температури  $t$  речовина виділить таку саму кількість теплоти  $Q$ .

Тобто кількість теплоти, що виділяється під час конденсації пари певної маси, також визначається за формулою (13.2):  $Q = rm$ . Якщо речовина спочатку охолоджується, вона віддає кількість теплоти  $Q = cm\Delta t$ , де  $\Delta t$  характеризує зміну температури. Нагадаємо, що  $\Delta t$  обчислюють, віднімаючи від більшого значення температури менше.

Таким чином, під час охолодження та конденсації виділяється кількість теплоти, яку можна обчислити за формулою  $Q = cm\Delta t + rm$ .

Розв'язуючи задачі на процеси пароутворення та конденсації, потрібно дотримуватися алгоритму складання рівняння теплового балансу, що справедливо для будь-яких теплових процесів. Тобто в лівій частині записують суму кількості теплоти, яку отримують тіла, що беруть участь у тепловому процесі, а в правій — суму кількості теплоти, яку віддають тіла. При цьому необхідно враховувати певні особливості перебігу саме цих процесів. Зокрема:

1. Для випаровування рідини потрібно витратити певну кількість теплоти, тоді як під час конденсації виділяється деяка кількість теплоти.

2. Конденсація відбувається за певних фізичних умов, що визначаються температурою та тиском і вказуються в умові задачі.

3. На відміну від плавлення та кристалізації твердих тіл випаровування відбувається за будь-якої температури. Тому, розраховуючи кількість теплоти, необхідну для випаровування певної маси речовини, слід використати значення питомої теплоти пароутворення для заданої температури або взяти табличне значення для температури кипіння та врахувати, що для нагрівання рідини до цієї температури потрібно також витратити певну кількість теплоти:  $Q = Q_1 + Q_2 = cm(t_{\text{кип}} - t) + rm$ .

4. Під час охолодження речовини та її конденсації виділиться кількість теплоти  $Q = rm + cm\Delta t$ , де  $\Delta t$  характеризує зміну температури та обчислюється як різниця між більшим і меншим значеннями температури речовини.

### ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ НА ВИПАРОВУВАННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЮ.

**Задача 1.** Яку кількість теплоти потрібно витратити, щоб 2 кг води, температура якої 20 °С, нагріти до температури кипіння та повністю випарувати за нормального атмосферного тиску?

Дано:

$$m = 2 \text{ кг}$$

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

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

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

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

$$Q = ?$$

*Розв'язок*

Оскільки воду спочатку нагріли до температури кипіння, а потім випаровували, то витрачена при цьому теплова енергія дорівнює:

$$Q = cm(t_2 - t_1) + rm.$$

Виконаємо розрахунки:

$$\begin{aligned} Q &= 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}} \cdot 2 \text{ кг} \cdot 80^\circ\text{C} + 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 2 \text{ кг} = \\ &= 672\,000 \text{ Дж} + 4\,600\,000 \text{ Дж} = \\ &= 5\,272\,000 \text{ Дж} = 5,272 \text{ МДж}. \end{aligned}$$

**Відповідь.** Для нагрівання й випаровування 2 кг води, взятої за температури 20 °С, потрібно 5,272 МДж теплоти.

**Задача 2.** Яка кількість теплоти виділиться при конденсації 100 г водяної пари за температури 100 °С та подальшого охолодження води. Порівняйте її з кількістю теплоти, що виділиться при кристалізації води такої самої маси, взятої за температури 0 °С.

*Дано:*

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

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

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

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

$$\lambda = 330 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

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

 $Q$  — ?*Розв'язок*

Кількість теплоти, що виділяється при конденсації водяної пари:

$$Q = rm; Q = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,1 \text{ кг} = 230 \text{ кДж.}$$

Кількість теплоти, що виділяється під час кристалізації льоду:

$$Q = \lambda m; Q = 330 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,1 \text{ кг} = 33 \text{ кДж.}$$

**Відповідь.** Під час конденсації водяної пари виділяється 230 кДж теплоти, що майже в 7 разів більше, ніж при кристалізації води такої самої маси.

### Головне в цьому параграфі

Фізичну величину, що показує, яку кількість теплоти необхідно надати рідині масою 1 кг, аби перетворити її в пару без зміни температури, називають питомою теплою пароутворення.

Питому теплоту пароутворення позначають літерою  $r$ . У СІ питому теплоту пароутворення вимірюють у джоулях, поділених на кілограм  $[r] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Для обчислення кількості теплоти, яку необхідно витратити, щоб повністю випарувати  $m$  кг речовини, застосовують формулу  $Q = r \cdot m$ .

Конденсуючись, пара віддає стільки ж енергії, скільки отримала під час пароутворення.

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають питомою теплою пароутворення?
2. Від чого залежить питома теплота пароутворення?
3. Від чого залежить кількість теплоти, потрібна для пароутворення?
4. Як обчислити кількість теплоти, необхідну для перетворення рідини на пару?
5. Чому пара речовини має більшу внутрішню енергію, ніж сама речовина в рідкому стані за однієї й тієї самої температури?

### Вправа до § 13

- 1 (с). Яку енергію необхідно витратити, щоб 0,4 т скипидару, взятого при температурі кипіння, перетворити на пару? Питома теплота пароутворення скипидару 300 кДж/кг.
- 2(с). При конденсації парів ртуті виділилося 240 кДж теплоти. Визначте масу ртуті, якщо ртуть знаходиться за температури кипіння.
- 3(д). Визначте кількість теплоти, яка виділиться під час теплового процесу, в якому спочатку пари спирту масою 0,2 г, взяті при

температурі кипіння, конденсуються, а потім рідина охолоджується до  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- 4(д).** Визначте кількість теплоти, потрібну для перетворення в пару  $50\text{ кг}$  ртуті, яка перебуває у сталевій ванні масою  $0,8\text{ т}$ , якщо початкова температура ванни зі ртуттю  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- 5(в).** У внутрішній посудині калориметра, виготовленій з алюмінію, масою  $100\text{ г}$ , міститься  $200\text{ г}$  льоду за температури  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Визначте, яку масу водяної пари за температури  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  потрібно ввести до калориметра, щоб увесь лід розтанув.

### ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ З ТЕМИ “ПАРООТВОРЕННЯ І КОНДЕНСАЦІЯ”

1. Укажіть процес переходу рідкої речовини в газуватий стан:  
А) випаровування; Б) сублімація; В) конденсація; Г) кристалізація.
2. Порівняйте внутрішні енергії  $1\text{ кг}$  води та водяної пари, взятих при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  
А) більша у пари; Б) однакова;  
В) більша у води; Г) не залежить від агрегатного стану.
3. Укажіть назву величини, яка дорівнює кількості теплоти, що необхідна для перетворення  $1\text{ кг}$  рідини, взятої при температурі пароутворення, на пару:  
А) питома теплоємність речовини;  
Б) теплоємність тіла;  
В) питома теплота плавлення речовини;  
Г) питома теплота пароутворення речовини
4. Укажіть, де температура кипіння води буде найвищою:  
А) на рівні моря; Б) у глибокій шахті;  
В) на високій горі; Г) однакова скрізь.
5. Укажіть, у якої з речовин найбільша теплота пароутворення (рисунок):  
А) I; Б) II; В) III; Г) у всіх однакова.
6. Визначте кількість теплоти, що виділиться при конденсації  $200\text{ г}$  водяної пари, яка перебуває за температури  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , та охолодження її до  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
А)  $5188\text{ кДж}$ ; Б)  $518,8\text{ кДж}$ ;  
В)  $51,88\text{ Дж}$ ; Г)  $51,88\text{ кДж}$ .
7. На рисунку на с. 95 показано графік залежності температури речовини від часу. Встановіть відповідність між агрегатним станом речовини та ділянкою графіка.

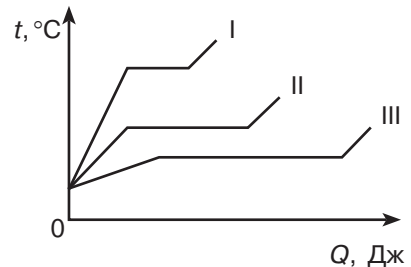


Рисунок до завдання 8



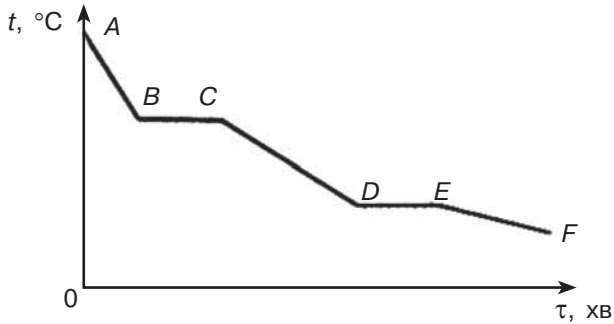


Рисунок до завдання 7

- |         |                         |
|---------|-------------------------|
| 1) $AB$ | А) тверде тіло          |
| 2) $BC$ | Б) суміш пари та рідини |
| 3) $CD$ | В) пара                 |
| 4) $DE$ | Д) рідина               |
| 5) $EF$ |                         |

8. Установіть відповідність між назвою процесу та змінами у будові речовини під час цього процесу.

- |                  |   |
|------------------|---|
| 1) нагрівання    | А) руйнується кристалічна ґратка                          |
| 2) кристалізація | Б) утворюється кристалічна ґратка                         |
| 3) випаровування | В) збільшується середня швидкість хаотичного руху молекул |
| 4) охолодження   | Г) зменшується середня швидкість хаотичного руху молекул  |
|                  | Д) поверхневий шар речовини покидають найшвидші молекули  |

9. Розташуйте запропоновані теплові процеси у порядку зростання абсолютного значення їхньої теплової енергії (для сталої маси води, взятої за кімнатної температури):

- А) повного випаровування за температури кипіння;  
 Б) нагрівання до температури кипіння;  
 В) охолодження на  $10\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 Г) перетворення в лід.

10. Вода з початковою температурою  $15\text{ }^\circ\text{C}$  закипіла в чайнику через 15 хв. Визначте час, упродовж якого вода повністю википить.

## § 14. Розрахунок кількості теплоти, що виділяється внаслідок згоряння палива

- ▶ *Згоряння палива. Питома теплота згоряння палива*
- ▶ *Розрахунок кількості теплоти, що виділяється внаслідок згоряння палива*

**ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА. ПИТОМА ТЕПЛОТА ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА.** Одним із основних джерел енергії для сучасних виробничих технологій, транспорту та побуту є паливо. Під час горіння палива виділяється *теплова енергія*, що як безпосередньо використовується (наприклад, для плавлення металів та приготування їжі в побуті), так і перетворюється в інші види енергії (наприклад, у електричну на теплових електростанціях).

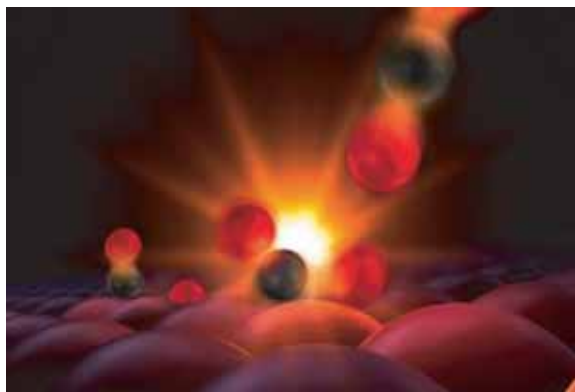
Основним процесом, під час якого виділяється теплова енергія, є *горіння* (рис. 14.1, а). *Горіння* — це особливий тип хімічної реакції окислення, що супроводжується виділенням тепла й світла (рис. 14.1, б).

Тепловий ефект горіння пояснюється виділенням енергії в процесі утворення нових молекул. Так, під час хімічної реакції горіння природного газу, тобто взаємодії молекул метану  $\text{CH}_4$  з молекулами кисню  $\text{O}_2$ , утворюються молекули вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  і води  $\text{H}_2\text{O}$  та виділяється теплова енергія (рис. 14.2).

Щоб запалити речовину в повітрі, спочатку потрібно її нагріти до певної температури — температури займання. Для різних речовин вона різна. Наприклад, дерево займається за температури приблизно  $270\text{ }^\circ\text{C}$ , вугілля —  $350\text{ }^\circ\text{C}$ . Теплота, яка виділяється під час горіння, підтримує температуру речовини вищою за температуру займання і горіння, що розпочавшись, самопідтримується.



а)



б)

Рис. 14.1: а) горіння — особливий тип хімічної реакції; б) знімок початку процесу формування хімічної реакції (встановлення зв'язку між двома атомами), виконаний за допомогою рентгенівського лазера

Важливою особливістю рідкого палива є те, що спочатку його необхідно нагріти, допоки воно не почне випаровуватися.

Цікаво, що метали, зокрема лужні, теж «горять», але за спеціальних умов. Так, щоб спостерігати горіння, наприклад, калію, натрію, міді, потрібно вмістити їх в атмосферу, насичену чистим киснем (рис. 14.3).

Зверніть увагу, що для припинення горіння речовини, яка горить, потрібно охолодити до температури, нижчої від температури займання, або припинити доступ кисню. Обидва ці способи використовують під час гасіння пожежі водою. Коли вода потрапляє на джерело вогню, вона випаровується і відбирає від тіл, що горять, теплоту. Їхня температура різко зменшується. Водяна пара,

що утворюється, утруднює доступ кисню, і горіння припиняється.

Оскільки вода є електропровідною речовиною, її не можна використовувати для гасіння пожежі, спричиненої несправностями електричних мереж. Тому застосовують вуглекислотні, порошкові та піноутворюючі вогнегасники. Під час їхньої роботи виділяється вуглекислий газ  $\text{CO}_2$ , який змішується зі спеціальними порошкоподібними або піноутворюючими речовинами і перешкоджає доступу кисню з повітря до джерела вогню. Одним зі способів гасіння пожежі є також механічне перешкоджання доступу повітря (рис. 14.4).

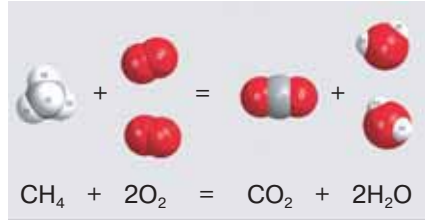


Рис. 14.2. Під час взаємодії молекул метану  $\text{CH}_4$  з молекулами кисню  $\text{O}_2$  утворюються молекули вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  та води  $\text{H}_2\text{O}$



Рис. 14.3. Процес горіння металів у атмосфері кисню



Рис. 14.4. Одним зі способів гасіння пожежі є перешкоджання доступу кисню до речовини, що горить



Рис. 14.5. Різні види палива

У промисловості та побуті використовують різні види палива: *тверде* (дрова, вугілля, сланці, торф); *рідке* (бензин, гас, дизельне пальне, спирт); *газоподібне* (метан, пропан, бутан, ацетилен) (рис. 14.5).

Оскільки будова молекул речовин різних видів палива відрізняється, вони мають різну теплотворну здатність. Для характеристики теплотворної здатності введено фізичну величину, яку називають питомою теплотою згоряння палива. Властивість палива віддавати певну кількість теплоти під час горіння характеризується питомою теплотою згоряння.

*Питома теплота згоряння — фізична величина, що показує, яка кількість теплоти виділяється при повному згорянні 1 кг певного виду палива.*

Питома теплота згоряння позначається  $q$ . Її одиницею є  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Різні речовини мають різну питому теплоту згоряння палива (табл. 14.1).

Таблиця 14.1

## Питома теплота згоряння палива певних речовин

Речовина	$q, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
Порох	3,8
Дрова сухі	10
Торф	14
Кам'яне вугілля	27
Спирт	27
Природний газ	44
Нафта	44
Гас	46
Бензин	47
Водень	120

**РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОТИ, ЩО ВИДІЛЯЄТЬСЯ ВНАСЛІДОК ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА.** Загальну кількість теплоти, що виділяється при згорянні палива, можна розрахувати, якщо відомі його питома теплоємність і маса.

Загальна кількість теплоти  $Q$ , яка виділяється при згорянні палива, обчислюється за формулою:

$$Q = qm.$$

Масу палива, необхідну для отримання деякої кількості теплоти, можна розрахувати за формулою:  $m = \frac{Q}{q}$ .

Розглянемо приклади розв'язування задач на визначення кількості теплоти, що виділяється під час згоряння палива.

**Задача 1.** Яка кількість теплоти виділиться при повному згорянні сухих березових дров об'ємом  $5 \text{ м}^3$ ? Густина березової деревини  $700 \text{ кг/м}^3$ , питома теплота згоряння  $13 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Дано:

$$V = 5 \text{ м}^3$$

$$\rho = 700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$q = 10 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$Q$  — ?

Розв'язок

Кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні березових дров, обчислимо за формулою:

$$Q = qm, \text{ де } m = \rho V.$$

$$m = 700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 5 \text{ м}^3 = 3,5 \cdot 10^3 \text{ кг.}$$

$$\begin{aligned} Q &= 10 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 3,5 \cdot 10^3 \text{ кг} = \\ &= 3,5 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 3,5 \text{ ГДж.} \end{aligned}$$

Відповідь:  $Q = 3,5 \text{ ГДж}$ .

**Задача 2.** Яка кількість теплоти виділиться при повному згорянні суміші, що складається з 1,5 л бензину та 0,5 л спирту? Густина бензину  $710 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , питома теплота згоряння  $4,7 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ , густина спирту —  $800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , питома теплота згоряння —  $2,7 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Дано:

$$V_1 = 1,5 \text{ л}$$

$$V_2 = 0,5 \text{ л}$$

$$\rho_1 = 710 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_2 = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$q_1 = 47 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$q_2 = 27 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$Q = ?$$

$$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

Розв'язок

Кількість теплоти, що виділиться при повному згорянні суміші, дорівнює сумі кількості теплоти, що виділиться при повному згорянні її компонентів:

$$Q = Q_1 + Q_2;$$

$$Q_1 = q_1 m_1; \quad Q_2 = q_2 m_2;$$

$$m_1 = \rho_1 V_1; \quad m_2 = \rho_2 V_2.$$

$$m_1 = 710 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 =$$

$$= 1,065 \text{ кг};$$

$$m_2 = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 0,4 \text{ кг};$$

$$Q_1 = 47 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 1,065 \text{ кг} \approx 50 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$Q_2 = 27 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0,4 \text{ кг} \approx 11 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$Q = 50 \cdot 10^6 \text{ Дж} + 11 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 61 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 61 \text{ МДж}.$$

Відповідь:  $Q = 61 \text{ МДж}$ .

### Головне в цьому параграфі

Горіння — особливий тип хімічної реакції окислення, яка супроводжується виділенням тепла і світла.

Питоною теплотою згоряння палива називають фізичну величину, що показує, яка кількість теплоти виділяється при повному згорянні 1 кг певного виду палива.

Загальна кількість теплоти  $Q$ , що виділяється при згорянні  $m$  кг палива, обчислюється за формулою:  $Q = qm$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Опишіть фізичне явище, що лежить в основі використання палива як джерела енергії.
2. Що називають питоною теплотою згоряння палива?
3. Який фізичний зміст питокої теплоємності згоряння палива?



4. Проаналізуйте формулу, за якою розраховується кількість теплоти, що виділяється в процесі згоряння палива.
5. Які речовини є перспективними видами палива і чому?

### Вправа до § 14

- 1(п). Поясніть, чому сірником легше запалити аркуш звичайного паперу, ніж шматок картонної упаковки.
- 2(п). Поясніть, чому, гасячи багаття, його розгортають по землі.
- 3(с). Яка кількість теплоти виділяється при повному згорянні 10 г пороху? Питома теплота згоряння пороху 3,8 МДж/кг.
- 4(с). Яку масу сухих дров потрібно спалити, щоб виділилося 15 ГДж енергії?
- 5(д). Спирт об'ємом 0,005 м<sup>3</sup> повністю згоряє. Яка кількість теплоти виділяється?
- 6(д). Яка кількість теплоти виділяється при повному згорянні паливної суміші, що складається з бензину об'ємом 2 л і спирту об'ємом 1,5 л?
- 7(в). Визначте, на скільки більше теплоти виділяється в результаті повного згоряння бензину масою 7,1 кг порівняно з торфом такого самого об'єму.

## § 15. Перетворення енергії в механічних і теплових процесах. Принцип дії теплових машин

- ▶ *Закон збереження і перетворення енергії в механічних і теплових процесах*
- ▶ *Принцип дії теплових машин*
- ▶ *ККД теплових машин*

**ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ І ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В МЕХАНІЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСАХ.** У § 5 ми пригадали, що механічна енергія є кількісною характеристикою механічного руху. Повна механічна енергія системи тіл дорівнює сумі їхньої потенціальної та кінетичної енергії. У замкненій системі виконується *закон збереження механічної енергії*: повна механічна енергія системи тіл залишається сталою, якщо унеможливити дію на них інших тіл. При цьому кінетична енергія може перетворюватися в потенціальну та навпаки.

$$E_{\text{мех}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const.} \quad (15.1)$$

У природі та техніці можна спостерігати багато фізичних явищ та процесів, у яких відбувається не лише перетворення складових механічної енергії, а й взаємоперетворення інших видів енергії. На практиці механічні системи не є повністю замкненими. Зо-

крема, за рахунок наявності сили тертя частина механічної енергії перетворюється у внутрішню. Наприклад, шайба, що вільно ковзає по льоду, з часом зупиниться під дією сили тертя. Її кінетична енергія не зникне, а перетвориться в теплову, при цьому температура шайби та льоду дещо підвищиться. Тобто механічна енергія тіла перетворюється на його внутрішню енергію.

Отже, якщо в ізольованій системі тіл відбуваються теплові процеси, то її механічна енергія не зберігається. Проте це не означає, що в такому разі порушується фундаментальний закон збереження енергії. Зменшення механічної енергії системи супроводжується збільшенням її внутрішньої енергії. При цьому *зміна механічної енергії тіл, що беруть участь у взаємодії, кількісно дорівнює зміні їхньої внутрішньої енергії.*

Тому загалом *повна енергія системи тіл*  $E_{\text{повна}}$  є сумою механічної енергії  $E_{\text{мех}}$  та внутрішньої енергії  $U$ . Повна енергія враховує не лише енергію макроскопічного руху та взаємодії тіл, а й мікроскопічну енергію руху та взаємодію частинок речовини.

Закон збереження повної енергії для системи, в якій відбуваються не лише механічні, а й теплові (а також хімічні, ядерні та інші) процеси, формулюють таким чином: *повна енергія замкнутої теплоізольованої системи тіл зберігається.*

$$E_{\text{повна}} = E_{\text{мех}} + U = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} + U = \text{const.}$$

Таким чином, для всіх явищ і процесів у природі справджується фундаментальна закономірність:

*Енергія у природі не виникає з нічого і безслідно не зникає. Вона лише перетворюється з одного виду в інший, зберігаючи своє значення.*

**ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВИХ МАШИН.** Як ви вже знаєте, одним зі способів зміни внутрішньої енергії є виконання механічної роботи. Водночас внутрішня енергія

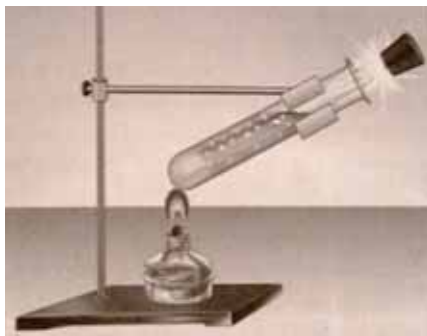


Рис. 15.1. Перетворення внутрішньої енергії води в кінетичну енергію руху корка

речовини може перетворюватися в механічну. Наприклад, у досліді з пробіркою, заповненою водою і щільно закритою гумовим корком (рис. 15.1), під час нагрівання спиртівкою збільшується внутрішня енергія води.

Вода закипає, тиск пари збільшується, корок вилітає. Внутрішня енергія пари переходить у кінетичну енергію корка. При цьому виконується механічна ро-

бота з його виштовхування, а внутрішня енергія і, відповідно, температура пари зменшується.

Енергія, що виділяється під час згоряння палива (у нашому прикладі спирту), переходить у внутрішню енергію води (пари), а пара, розширюючись, виконує роботу з переміщення корка. Отже, тепла енергія перетворюється у внутрішню енергію пари, а та, у свою чергу, — на кінетичну енергію руху корка.

*Принцип перетворення внутрішньої енергії в механічну роботу покладений в основу дії теплових машин.*

Уперше на практиці цей принцип був використаний при створенні шотландським винахідником Джеймсом Уаттом у 1769 р. парової машини.

Парова машина Уатта впродовж багатьох років залишалася єдиною функціональною тепловою машиною, що застосовувалася для промислових потреб. За її допомогою видобували вугілля, приводили в рух млини, пилорами, ткацькі верстати, поїзди й пароплави (рис. 15.2).

Таким чином, *тепловими називають машини, в яких енергія згоряння органічного палива перетворюється в механічну роботу. Всі теплові машини складаються з трьох основних частин: робочого органа, передавального механізму та пристрою, в якому певний вид енергії перетворюється в механічну роботу.*



Джеймс Уатт  
(1736—1819)  
Шотландський  
винахідник  
отримав патент  
на вдосконалений  
пристрій, який  
давав можливість  
використовувати  
енергію пари в  
промисловості

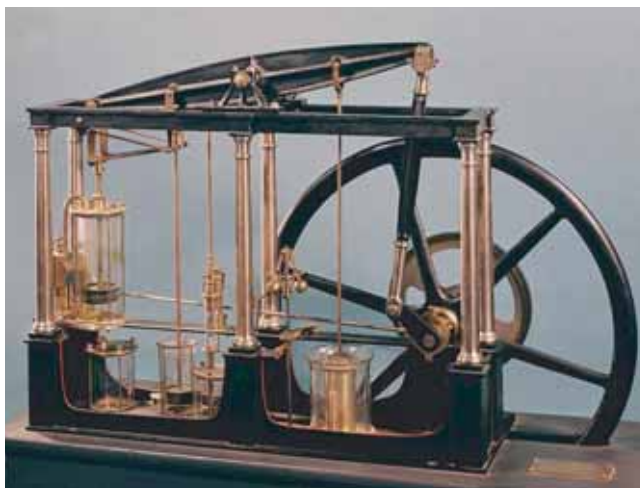


Рис. 15.2. Парова машина Джеймса Уатта

Теплові машини набули широкого використання на транспорті, у виробництві, сільському господарстві, теплоенергетиці, житлово-комунальному господарстві.

За призначенням теплові машини поділяються на два основних типи: теплові двигуни та холодильні установки.

**ККД ТЕПЛОВИХ МАШИН.** У курсі фізики сьомого класу ви ознайомилися з поняттям «коефіцієнт корисної дії» (ККД) на прикладі роботи простих механізмів. Нагадаємо, що ККД механізму — це фізична величина, що показує ефективність його роботи і чисельно дорівнює відношенню корисної роботи до витраченої (повної) роботи:  $\eta = \frac{A_K}{A_B} \cdot 100\%$ . Конструкторам вдається

створювати машини та механізми з ККД, що дорівнює 98—99 %.

Разом із тим ККД теплових машин порівняно невисокий. Як правило, він не досягає 50 %. Так, ККД більшості поршневих теплових двигунів не перевищує 35 %, а теплових турбін — 40 %. На практиці це означає, що більше половини енергії, яка виділяється під час згоряння палива, втрачається.

Однією з основних причин низького ККД теплових машин порівняно з іншими механізмами є особливості конструкції їхнього теплового двигуна. Теплова енергія згоряння палива не може повністю перетворюватися в механічну енергію. Відповідно, механічна робота не буде максимальною. Газ, який отримує енергію внаслідок згоряння палива, не може її цілком перетворити в механічну енергію. Після виконання механічної роботи при розширенні газ, що виводиться з двигуна, має досить високу температуру й, відповідно, значний запас внутрішньої енергії. Ця внутрішня енергія передається в навколишнє середовище.

Отже, принципово неможливо всю теплову енергію, отриману під час згоряння палива, перетворити в механічну. Водночас розсіювання значної частини теплової енергії в навколишньому середовищі спричиняє екологічні проблеми, пов'язані з використанням теплових машин.

Одним із напрямів підвищення ККД використання енергії згоряння палива є поєднання кількох теплових машин. Наприклад, на теплових електроцентралях вдається використовувати більш як



Саді Карно  
(1796—1832)  
Французький учений,  
який уперше визначив  
максимальний ККД  
теплової машини

80 % енергії згоряння палива. Для виробництва електроенергії використовується близько 22 %, застосування гарячої газової суміші для виробничих потреб становить близько 18 %, на обігрів житлових і виробничих приміщень надходить близько 40 % енергії згоряння палива.

Проблема підвищення ККД теплових машин є однією з найактуальніших для теплоенергетики та техніки. У 1824 р. французький учений Саді Карно визначив загальну схему створення теплової машини. Будь-яка теплова машина має складатися з *нагрівника* (джерело теплоти), *робочого тіла*, що виконує роботу (пара, газ), і *охолоджувача* (в багатьох випадках це навколишнє середовище — атмосфера) (рис. 15.3).

С. Карно науково обґрунтував, що в кожній тепловій машині можна отримати корисну роботу тільки тоді, коли енергія завдяки теплообміну переходить від гарячого до холодного тіла. При цьому лише частина теплової енергії може використовуватися на виконання механічної роботи. Тобто теплова машина може виконувати роботу лише тоді, коли температура нагрівника буде більшою за температуру охолоджувача. Виконана тепловою машиною робота  $A$  дорівнюватиме

$$A = Q_1 - Q_2,$$

де  $Q_1$  — кількість теплоти, передана робочому тілу нагрівником;  $Q_2$  — кількість теплоти, віддана робочим тілом охолоджувачу, причому завжди  $Q_2 < Q_1$ .

Тоді ККД теплової машини визначатиметься за формулою:

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

Як бачимо з цього рівняння, ККД теплової машини завжди менший за одиницю, або за 100 %. Вищого ККД за таких значень температури нагрівника та охолоджувача отримати неможливо. У реальних умовах ККД є істотно нижчим унаслідок різноманітних втрат енергії:  $\eta < \eta_{\max}$ .

\* У 1851 р. англійський фізик В. Томсон (лорд Кельвін) сформулював твердження, важливе для конструювання теплових ма-



Рис. 15.3. Загальна схема теплової машини С. Карно

шин: у природі неможливий процес, єдиним результатом якого є виконання механічної роботи лише за рахунок охолодження джерела теплоти.

Це означає, що неможливо створити «вічний двигун», який би міг перетворити в роботу всю надану йому теплову енергію.

### Головне в цьому параграфі

Тепловими називають машини, в яких енергія згоряння палива перетворюється в механічну роботу.

За призначенням теплові машини поділяються на два основних типи: теплові двигуни та холодильні установки.

Будь-яка тепла машина має складатися з нагрівника (джерело теплоти), робочого тіла, яке виконує роботу (пара, газ), і охолоджувача (часто це навколишнє середовище — атмосфера).

ККД теплової машини визначається як:

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

ККД теплового двигуна завжди менший за одиницю.

У природі неможливий процес, єдиним результатом якого є виконання механічної роботи лише за рахунок охолодження джерела теплоти. Неможливо створити «вічний двигун», який би міг перетворити в роботу всю надану йому теплову енергію.

### Запитання для самоперевірки

1. У чому полягає закон збереження й перетворення енергії в механічних і теплових процесах?
2. Що називають тепловими машинами? Який принцип покладений в основу їхньої дії?
3. Яке значення мало винайдення теплової машини в розвитку техніки? Де використовувалися найпростіші теплові машини?
4. Назвіть основні типи теплових машин.
5. За якою формулою можна розрахувати ККД теплової машини?
6. Чому теплові машини мають порівняно низький ККД?
7. Які основні шляхи підвищення ККД теплових машин?

### Вправа до § 15

- 1(п). Поясніть, які перетворення енергії відбуваються під час пострілу з гармати.
- 2(п). Чи можна створити теплову машину, в якій для виконання механічної роботи 1 Дж витрачається внутрішня енергія 1 Дж?
- 3(с). Обчисліть ККД теплової машини, що для виконання корисної роботи 250 МДж витрачає 0,87 ГДж енергії.



- 4(с).** Двигун теплової машини виконав корисну роботу, що дорівнює  $2,6 \cdot 10^8$  Дж. Визначте енергію витрачену двигуном, якщо ККД двигуна 27 %.
- 5(д).** Обчисліть ККД двигуна ідеальної теплової машини, якщо він отримує від нагрівника щосекунди 14 200 кДж теплоти, а віддає холодильнику 12 800 кДж.
- 6(д).** Двигун теплової машини виконав корисну роботу, що дорівнює  $3,6 \cdot 10^8$  Дж, і використав 40 кг вугілля. Обчисліть ККД двигуна.
- 7(в).** Двигун теплової машини потужністю 36 кВт за годину роботи витратив 14 кг гасу. Визначте ККД двигуна.

## § 16. Теплові двигуни.

### Двигун внутрішнього згорання

- ▶ *Принцип дії теплових двигунів*
- ▶ *Двигун внутрішнього згорання*

**ПРИНЦИП ДІЇ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ.** Теплові машини, використовувані для різних цілей, мають різноманітну конструкцію. Але незалежно від цього за призначенням вони поділяються на два основних типи: теплові двигуни та холодильні установки. Усі теплові двигуни виконують одне й те саме завдання: забезпечують перетворення внутрішньої енергії в механічну. Холодильні установки використовують для того, аби за рахунок виконання роботи (наприклад, двигуном холодильника) відбирати певну кількість теплоти від холодного тіла й підтримувати його низьку температуру.

В основу роботи теплового двигуна покладено принцип *перетворення внутрішньої енергії в механічну роботу*, з яким ви ознайомилися в попередньому параграфі.

*Тепловий двигун — пристрій, у якому отримана під час згорання палива енергія, перетворюється в механічну енергію.*

За допомогою передавального механізму цю енергію отримує робоче тіло й виконується механічна робота. Найпоширенішими, зокрема на транспорті, є поршневі теплові двигуни, в яких нагрітий газ тисне на поршень та переміщує його в циліндрі.

*У поршневих теплових двигунах використовується здатність нагрітого газу (або пари) під час розширення виконувати роботу.*

Конструкція теплових двигунів забезпечує передавання енергії, що виділяється під час згорання палива або внаслідок ядерних реакцій, шляхом теплообміну до деякого газу (наприклад, пари в парових машинах). Нагрітий газ розширюється, він виконує роботу проти зовнішніх сил і зумовлює рух того чи іншого механізму.



Рис. 16.1. Одна з перших машин із тепловим поршневим двигуном

Поршневі двигуни, в яких використовувався процес перетворення внутрішньої енергії стиснутого газу в механічну енергію рухомого колеса, стали першими тепловими двигунами, сконструйованими людиною (рис. 16.1). Теплові поршневі двигуни встановлювалися на парових потягах, пароплавах, парових молотарках тощо.

**ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ.** Під час створення теплових поршневих двигунів доводилося розв'язувати проблеми, пов'язані із забезпеченням отримання нагрітого та стиснутого газу (пари), по черговим та своєчасним (для певного положення поршня) введенням газу в циліндр, своєчасним виведенням газу з циліндра та підготовкою до наступного циклу роботи.

Наприклад, для нагрівання робочого тіла (пари) до високої температури потрібно передбачити окремий пристрій, скажімо, паровий котел, який є досить громіздким. Тому в сучасній техніці використовують теплові двигуни, де нагрівання робочого тіла здійснюється безпосередньо всередині камери згоряння.

*Двигун внутрішнього згоряння — теплова машина, що в ній як робоче тіло використовуються гази високої температури, які утворюються під час згоряння рідкого або газоподібного палива безпосередньо всередині поршневого двигуна.*

У поршневих двигунах внутрішнього згоряння застосовується один із найпростіших способів перетворення внутрішньої енергії хімічного палива в механічну енергію. Робоче тіло (суміш повітря та хімічного палива) нагрівається внаслідок хімічної реакції горіння, що відбувається в циліндрі двигуна.

Розглянемо будову та принцип дії поршневого двигуна внутрішнього згоряння (рис. 16.2). Його основними елементами є: циліндр 1, у якому переміщується поршень 2, поршень з допомогою шатуна 3 з'єднаний з колінчатим валом 4. У верхню частину циліндра вмонтовано два клапани 5 і 6, які в процесі ро-

боти двигуна періодично відкриваються і закриваються. Клапан 5 називають впускним. При його відкриванні в циліндр двигуна надходить порція горючої суміші, яка після закриття клапана запалюється за допомогою свічки запалення 7. Клапан 6 називають випускним. Через нього відпрацьована робоча суміш видаляється з циліндра. Щоб клапан не спрацював самовільно, він утримується пружиною 10. Колінчатий вал містить маховик 11 і через систему зубчатих передач 9 з'єднується з розподільчим валом 8 та стартером 12.

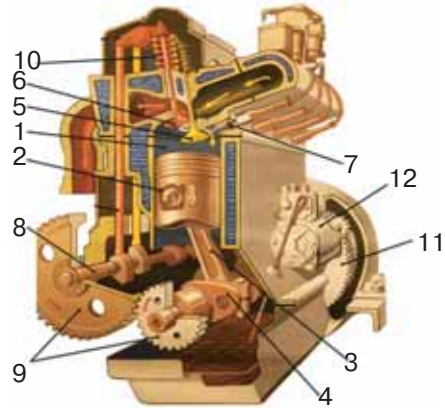
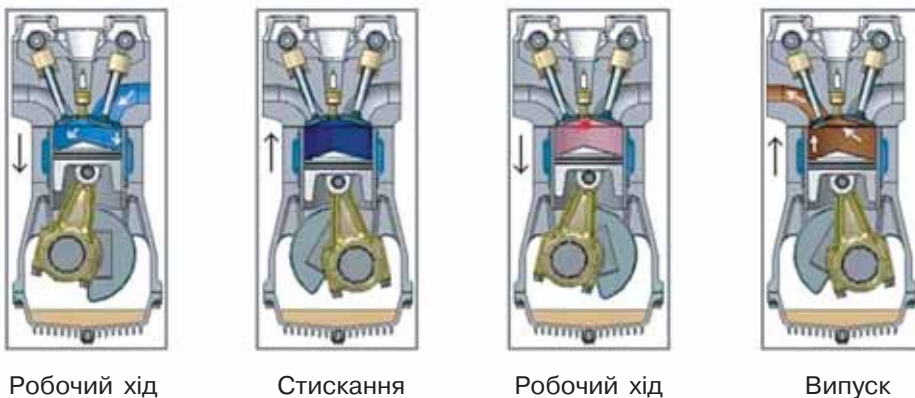


Рис. 16.2. Будова поршневого двигуна внутрішнього згорання

У циліндрі двигуна при згорянні палива повітря нагрівається до 1600—1800 °С. Тиск газів на поршень при цьому різко зростає, що спричиняє його поступальний рух. Рухомий поршень зумовлює обертання колінчастого вала й системи зубчатих передач, передаючи механічну енергію механізмам (станкам, на колеса автомобіля тощо), які, у свою чергу, виконують механічну роботу.

Крайні положення поршня в циліндрі називають мертвими точками. Відстань, яку проходить поршень, рухаючись між верхньою і нижньою мертвими точками, називають ходом поршня.

Один робочий цикл у двигуні відбувається за 4 такти (ходи поршня), які отримали такі назви: впуск робочої суміші, стискання, робочий хід, випуск відпрацьованих газів (рис. 16.3). Тому ці двигуни називають чотиритактними.



Робочий хід

Стискання

Робочий хід

Випуск

Рис. 16.3. Робочий цикл чотиритактного двигуна внутрішнього згорання



Етьєн Лєнуар  
(1822—1900)  
Французький  
винахідник першого  
поршневого двигуна  
внутрішнього згоряння

За повний цикл роботи чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння здійснюється тільки один робочий такт — робочий хід, інші такти є підготовчими. Тобто самостійно розпочати роботу такий двигун не може. Вал двигуна потрібно розкрутити, для чого використовується стартер.

Перший поршневий двигун внутрішнього згоряння винайшов у 1860 р. французький інженер Е. Лєнуар. Автомобіль із газовим двигуном його конструкції проїхав відстань 9 км від Парижа до Жонвіль-ле-Пон за 3 години.

У 1877 р. німецький інженер та винахідник Н. Отто запатентував чотиритактний двигун внутрішнього згоряння, який упродовж наступних десяти років був випущений у кількості 30 000 штук. Цей

двигун є основою сучасного автомобільного транспорту. Поршневі двигуни внутрішнього згоряння зазвичай працюють на бензині або природному газі. Вони встановлюються на автомобілях та іншому автотранспорті (рис. 16.4).

Компактні двотактні поршневі двигуни внутрішнього згоряння встановлюють, наприклад, на мотокосарках та бензопилах (рис. 16.5).

У сучасній техніці широко застосовуються двигуни внутрішнього згоряння, які працюють на важчих типах рідкого палива (гас, нафта тощо). Такі двигуни отримали назву дизельних за ім'ям німецького інженера-винахідника Р. Дизеля, який у 1897 р.



Рис. 16.4. Автомобільний двигун внутрішнього згоряння



Рис. 16.5. Компактні двигуни внутрішнього згоряння встановлюють на різноманітних механізмах

сконструював перший двигун потужністю 20 кінських сил. З 1898 р. розпочалися промислове виробництво і використання дизельних двигунів.

Важливою конструктивною особливістю дизельного двигуна є відсутність свічки запалювання. Робоча суміш пального та повітря нагрівається при швидкому стисканні й займається. Робочий хід і випуск спрацьованих газів дизельного двигуна відбуваються так само, як і бензинового чи газового (карбюраторного двигуна). Дизельні двигуни, як правило, потужніші та масивніші, тому їх встановлюють на тракторах, автомобілях-тягачах. Нині сконструйовано компактні дизельні двигуни для легкових автомобілів.

Відпрацьовані гази випускаються з двигунів внутрішнього згорання при температурі 500—600 °С. Достатньо висока температура газу на виході знижує ККД двигунів. ККД карбюраторних двигунів досягає 20—25 %, а дизельних — 30—36 %.

### Головне в цьому параграфі

Тепловий двигун — пристрій, у якому отримана під час згорання палива енергія, перетворюється в механічну енергію.

Двигун внутрішнього згорання — теплова машина, що в ній як робоче тіло використовуються гази високої температури, які утворюються під час згорання рідкого чи газоподібного палива безпосередньо всередині поршневого двигуна або газової турбіни.

Один робочий цикл у чотиритактних двигунах відбувається за 4 такти (ходи поршня): впуск робочої суміші, стискання, робочий хід, випуск відпрацьованих газів.

ККД карбюраторних двигунів досягає 20—25 %, а дизельних — 30—36 %.

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають тепловим двигуном?
2. Наведіть приклади використання теплових двигунів у техніці.
3. Які теплові машини називають двигунами внутрішнього згорання?
4. Які основні відмінності двигунів внутрішнього згорання від інших теплових двигунів?
5. Які фізичні явища відбуваються в кожному такті робочого циклу чотиритактного двигуна внутрішнього згорання?
6. Чому в техніці набули широкого використання чотиритактні двигуни внутрішнього згорання?
7. Які особливості має дизельний двигун внутрішнього згорання?



## Домашній експеримент

За технічними характеристиками двигуна автомобіля ваших батьків або автомобіля батьків ваших друзів, вказаними виробником (потужність, витрати палива на 100 км шляху за відповідної середньої швидкості), визначте ККД двигуна. За можливості спробуйте розрахувати ККД двигуна експериментально, зафіксувавши витрати палива під час поїздки, відстань та час поїздки. Порівняйте отримані значення. Технічні характеристики автомобіля відповідної марки можна знайти за допомогою пошукових систем на сайті виробника.

## Вправа до § 16

- 1(с). Поясніть, чому на сучасних транспортних засобах використовують теплові двигуни внутрішнього згоряння.
- 2(с). У потужних двигунах внутрішнього згоряння застосовують водяне охолодження, а не повітряне. Поясніть, чому.
- 3(д). Обчисліть масу бензину, яку витрачає за годину двигун мотоцикла, що розвиває потужність 6 кВт, якщо його ККД дорівнює 15 %.
- 4(в). Визначте потужність двигуна автомобіля, якщо витрати бензину становлять 38 л на 100 км шляху за умови, що середня швидкість руху дорівнює 35 км/год. ККД двигуна 22,5 %.

## Це цікаво

### ЯКІ Є ТИПИ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ ТА ДЕ ЇХ ВИКОРИСТОВУЮТЬ?

Ви щойно ознайомилися з принципом дії та будовою поршневого двигуна внутрішнього згоряння. У сучасній авіаційній та космічній техніці використовують реактивні й газореактивні двигуни, в яких робоче тіло нагрівається безпосередньо всередині камери згоряння. Тому ці безпоршневі двигуни також належать до типу двигунів внутрішнього згоряння.

У камері згоряння такого двигуна внаслідок взаємодії рідкого або твердого ракетного палива та окиснювача (як паливо може використовуватися зріджений водень, а як окиснювач — кисень) утворюється суміш із високим тиском та температурою, яка зі значною швидкістю витікає із сопла. Реактивна сила, що діє на сопло, рухає двигун у напрямі, протилежному до напрямку витікання газової суміші. У реактивному двигуні внутрішня енергія палива безпосередньо перетворюється в енергію рухомого апарату. Реактивні двигуни використовують у ракетах і реактивних літаках.

Українські вчені та дослідники зробили вагомий внесок у розвиток реактивної техніки. Так, конструктором одного з перших серійних реактивних двигунів був талановитий вітчизняний інженер-конструктор В. П. Глушко (рис. 16.5).



Україна як одна з провідних космічних держав світу має повний цикл виробництва сучасних реактивних двигунів. На виробничому об'єднанні «Південний машинобудівний завод імені О. М. Макарова» (ПІВДЕНМАШ) у м. Дніпропетровську розробляють і виготовляють усі основні комплектуючі деталі та вузли реактивних систем, які збираються та випробовуються на унікальній виробничій базі (рис. 16.6).

Парові та газові турбіни теж є тепловими двигунами. Їхній принцип дії, так само, як і всіх інших теплових машин, полягає в перетворенні теплової енергії в механічну: *внутрішня енергія пари перетворюється в механічну енергію обертання лопатей турбіни.*

Конструкцію парової турбіни запропонував у 1882 р. шведський учений Г. Лаваль. Промислові паросилові установки складаються з парової турбіни, з'єднаної з ротором генератора електричного струму. Основною робочою частиною парової турбіни є вал 1, на якому закріплено диски 3 з лопатями 4 (рис. 16.7).



В. П. Глушко  
(1908—1989)  
Видатний  
український  
конструктор  
реактивних двигунів



Рис. 16.5. Реактивний двигун РД-108 конструкції В. П. Глушка для ракети-носія Р-7 С. П. Корольова



Рис. 16.6. Сучасні реактивні двигуни вітчизняного виробництва використовуються для запуску космічних апаратів багатьох країн світу

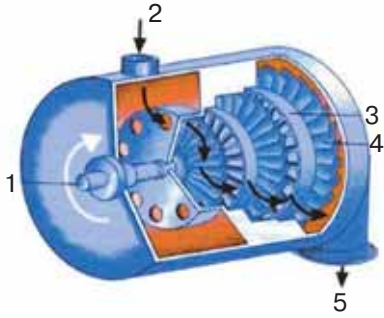


Рис. 16.7. Схема промислової парової турбіни

Через паропровід 2 струмини пари з великою швидкістю спрямовуються на лопаті й обертають ротор турбіни. Через вихідний паропровід 5 відпрацьована пара виводиться з турбіни. Внутрішня енергія пари перетворюється в механічну енергію обертання її ротора. Принцип дії парової турбіни ґрунтується на явищі, при якому *гарячий газ (пара) розширюється під час виходу із сопла й, виконуючи механічну роботу, охолоджується.*

Конструкції парових турбін постійно вдосконалюються, але, незважаючи на це, їхній ККД не перевищує 40 %. Основні втрати енергії в паровій турбіні виникають унаслідок неповного використання внутрішньої енергії пари. Пара, яка залишає парову турбіну, є досить гарячою. Її внутрішня енергія менша, ніж пари на вході в турбіну. Разом із тим цієї енергії достатньо, щоб її використати, наприклад, для обігріву приміщень. Втрати енергії в паровій турбіні будуть тим менші, чим більша різниця температур між паром, що входить до сопла, і паром, яка виходить із турбіни.

Промислові парові турбіни є тепловими двигунами великої потужності й використовуються на теплових і атомних електростанціях. Теплова енергія згоряння палива на теплових електростанціях або енергія ядерних реакцій на атомних електростанціях у спеціальних котлах чи в системі охолодження реактора перетворюється у внутрішню енергію пари, яка обертає ротор турбіни, з'єднаної з генератором електричного струму. Крім електростанцій парові турбіни можуть приводити в рух гвинти великих надводних морських суден та підводних човнів. Сучасні парові турбіни електростанцій мають робочу потужність до 1300 МВт.

На відміну від парових, у газових турбінах ротор обертається під тиском гарячої газової суміші, яка утворюється внаслідок згоряння рідкого палива в самій турбіні. Її конструкція є простішою, оскільки відбувається спрощений процес перетворення внутрішньої енергії газу в механічну енергію рухомого ротора турбіни. Це дає можливість обходитися без котла, де утворюється пара високої температури під час нагрівання води.

У камеру згоряння газової турбіни за допомогою компресора подається повітря при температурі близько 200 °С та під великим тиском впорскується рідке паливо (гас, мазут). Унаслідок згоряння суміші утворюється розжарений до температури 1500—2200 °С газ, який з великою швидкістю та під значним тиском подається на лопаті турбіни й обертає її. Газові турбіни мають кілька роторів. Переходячи від одного до іншого ротора, газ поступово віддає свою внутрішню енергію, яка перетворюється в механічну енергію обертання ротора турбіни.

Сучасні газові турбіни розвивають потужність близько 150 МВт. Вони використовуються в газотурбінних силових генераторах теплових електростанцій, двигунах, що встановлюються на літаках.



Рис. 16.8.  
Потужні промислові  
багаступінчаті турбіни  
виробництва «Турбоатом»  
(м. Харків)

Україна має повний завершений цикл виробництва надпотужних парових та газових турбін. Турбіни виробництва публічного акціонерного товариства «Турбоатом» (м. Харків) для теплових та атомних електростанцій успішно працюють у Болгарії, Ісландії, Китаї, Мексиці, Фінляндії та багатьох інших країнах (рис. 16.8).

## § 17. Екологічні проблеми використання теплових машин

- ▶ *Вплив теплових машин на довкілля*
- ▶ *Шляхи зменшення наслідків негативного впливу використання теплових машин*

**ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ МАШИН НА ДОВКІЛЛЯ.** Зростання потреби людства в енергоносіях прискорює бурхливий розвиток теплоенергетики. Одним із найважливіших недоліків використання теплових машин є забруднення навколишнього середовища. Теплові двигуни різної конструкції, використовувані на автомобільному залізничному, повітряному, морському транспорті та в ракетобудуванні, спричиняють хімічне, фізичне, теплове та шумове забруднення навколишнього середовища.

Сучасні надпотужні теплові електростанції спалюють мільйони тонн кам'яного вугілля та мільярди кубометрів природного газу щороку. При цьому в повітря викидаються шкідливі речовини,



Рис. 17.1. Під час спалювання органічного палива на теплових електростанціях в атмосферу щороку викидаються тисячі тонн шкідливих речовин

навіть попри багатоступеневі системи очистки димових відходів (рис. 17.1).

Наприклад, під час роботи теплових електростанцій у повітря викидаються оксиди сірки, азоту, фтористі сполуки, чадний газ, метан, етилен, п'ятиокис ванадію. Одна тепла електростанція за рік викидає в атмосферу більше трьох тисяч тонн оксидів сірки та майже дві тисячі тонн оксидів азоту. Більшість цих речовин є токсичними й негативно впливають на довкілля. Змішуючись із водою у хмарах, вони випадають згодом у вигляді кислотних дощів. Величезних втрат від кислотних опадів зазнають щороку країни Європи та Америки через знищення хвойних лісів, зниження врожайності зернових культур.

Значну частку шкідливих викидів у атмосферу становлять продукти роботи двигунів внутрішнього згорання. Особливо сильно забруднюють атмосферу реактивні двигуни літаків і ракет. Викидаються шкідливі речовини в атмосферу й під час роботи котлів опалювальних систем.

Теплові двигуни, спалюючи органічне паливо (вугілля, газ, нафту), поступово вичерпують природні ресурси, отримані людством від попередніх геологічних епох.

Із розвитком теплової енергетики вчені пов'язують теплове забруднення атмосфери й так зване *глобальне потепління*. «Холодильником» для теплових двигунів є атмосфера, куди передається «відпрацьоване» тепло. Крім того, до атмосфери потрапляють дуже дрібні частинки викидів, які зависають у ній і відбивають теплові промені, що випромінюються земною поверхнею. Відбувається так званий *парниковий ефект*, у результаті якого підвищується температура атмосфери, що виявляється у змінах клімату з непередбачуваними наслідками.



Деякі види теплових двигунів викидають в атмосферу речовини, що зумовлюють, наприклад, зменшення товщини озонового шару, який захищає все живе на Землі від ультрафіолетового випромінювання Сонця.

Не менш актуальним є й шумове забруднення. Робота теплових двигунів супроводжується шумами, які негативно впливають на біологічні об'єкти.

Тому перед людством, зокрема в останні десятиріччя, постають глобальні екологічні проблеми, розв'язання яких потребує усунення шкідливих чинників дії теплових машин.

**ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ НАСЛІДКІВ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ МАШИН.** Виокремлюють два основних напрями зменшення негативного впливу використання теплових машин на довкілля. Перший пов'язаний з удосконаленням технологій виготовлення та експлуатації теплових машин, що працюють на традиційних джерелах теплової енергії, тобто на органічному паливі. Зокрема, підвищення ККД теплових машин, створення та використання сучасних багатоступеневих систем фільтрації шкідливих викидів, які утворюються в процесі їхньої роботи, перехід на екологічно більш чисті види органічного палива (природний газ, спирт, водень).

Перспективним напрямом є поступова відмова від використання теплових машин на традиційних джерелах палива та запровадження новітніх технологій прямого перетворення теплової енергії в електричну. Наприклад, заміна теплових двигунів електричними, використання екологічно чистих джерел енергії (води, сонця, вітру), розвиток геотермальної енергетики.

Сьогодні в Україні, як і в усьому світі, активно розвивається альтернативна, або відновлювальна, енергетика. Щороку на сонячних електростанціях виробляється понад 500 млн кВт·год електричної енергії. Популярності набувають сонячні міні-електростанції, які забезпечують електроенергією окремі домогосподарства та постачають її надлишок державі (рис. 17.2).



Рис. 17.2. Одна з перших в Україні малих сонячних електростанцій (с. Солонка на Львівщині)



Рис. 17.3. Вітрові турбіни Новоазовської вітрової електростанції

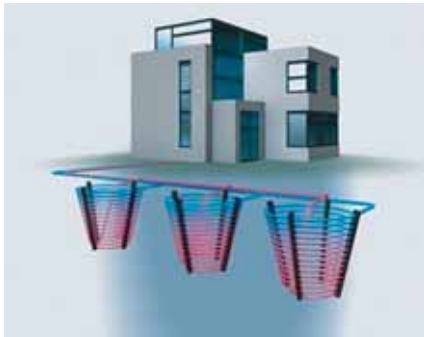


Рис. 17.4. Геотермальні енергетичні кошики

Потужність Новоазовської вітрової електростанції (с. Безіменне на узбережжі Азовського моря) становить 107,5 МВт (рис. 17.3).

Одним із найперспективніших напрямів розвитку теплової енергетики є використання геотермальної енергії. Сучасні теплосистеми дають можливість застосовувати теплову енергію, акумульовану в надрах земної кулі, як для виробництва електричної енергії, так і для опалення, гарячого водопостачання, поверхневого охолодження.

Геотермальні електростанції розміщують близько до вулканічного кратера, де магма максимально підходить до земної кори. У спеціальних свердловинах розташовують турбіни, які працюють за рахунок величезної температури та тиску магми й генерують електричний струм. Робочим елементом геотермальної електростанції є також металеві труби з водою, занурені близько до поверхні магми, температура якої становить майже 450 °С. Вода перетворюється на пару та подається до парових турбін, що обертають генератори.

Поширення набувають геотермальні теплові насоси побутового призначення. Вони використовують геотермальну енергію для опалення приміщень, нагрівання води, кондиціонування повітря. В умовах, коли глибоке буріння неможливе, застосовують так звані геотермальні енергетичні кошики (рис. 17.4).

Геотермальні енергетичні кошики призначені для експлуатації на глибині від 4 до 5 м. За рахунок сезонного перепаду температури ґрунту в 7—13 °С, який є ідеальним джерелом енергії для теплового насоса, енергетичні кошики використовують як високопотенційне джерело природного охолодження. Україна має



значні запаси геотермальної енергії. Геотермальні ресурси теплоенергетичних вод становлять майже 27,3 млн м<sup>3</sup>/добу, а їхній теплоенергетичний потенціал еквівалентний 12 млн тонн умовного палива або близько 10 млрд м<sup>3</sup> природного газу. Перспективними районами для розвитку вітчизняної геотермальної енергетики є Крим, Керченський півострів, Львівська та Закарпатська області, Дніпрово-Донецька западина, на території якої розташовані Чернігівська, Полтавська, Харківська, Луганська області.

Однією з важливих проблем використання геотермальної енергії є утилізація відпрацьованої води. Оскільки вона містить велику кількість солей токсичних металів (наприклад, бору, свинцю, цинку, кадмію, миш'яку) і хімічних сполук (аміаку, фенолів), термальні води не можна скидати у природні водні системи.

### Головне в цьому параграфі

Одним із найважливіших недоліків використання теплових машин є забруднення навколишнього середовища.

Основними видами забруднення навколишнього середовища, пов'язаними з використанням теплових машин, є хімічне, фізичне, теплове, шумове забруднення.

До шляхів зменшення наслідків негативного впливу роботи теплових машин належать удосконалення технологій їх виготовлення й експлуатації, підвищення ККД, створення та використання сучасних багатоступеневих систем фільтрації шкідливих викидів, що утворюються в процесі роботи теплових машин, перехід на екологічно більш чисті види органічного палива (природний газ, спирт, водень), запровадження новітніх технологій прямого перетворення тепла в електричну енергію, заміна за можливістю теплових двигунів електричними, використання екологічно чистих джерел енергії (води, сонця, вітру), розвиток геотермальної енергетики.

### Запитання для самоперевірки

1. Як впливають на довкілля теплові машини?
2. Які шкідливі речовини викидаються в атмосферу в процесі роботи теплових електростанцій?
3. Які основні шляхи зменшення негативного впливу використання теплових машин?
4. Як розвивається відновлювальна енергетика в Україні?
5. Які проблеми, пов'язані з використанням нових видів екологічно чистих джерел енергії, постають перед енергетикою?

## ВЧИМОСЯ РОЗВ'ЯЗУВАТИ ФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ НА ТЕПЛОВІ МАШИНИ РАЗОМ

Для вправного розв'язування фізичних задач із теми «Теплові машини» зверніть увагу на основний навчальний матеріал параграфів 1—17, зокрема рубрику «Головне в цьому параграфі», та повторіть основні закони і формули.

Вам також стануть у пригоді знання, набуті під час вивчення попередніх тем (внутрішня енергія та способи її зміни, розрахунок кількості теплоти, отриманої та відданої тілом, рівняння теплового балансу тощо), а також із таких тем курсу фізики сьомого класу, як «Робота», «Потужність», «Тиск».

Зверніть увагу, що для опису теплових процесів, які відбуваються під час роботи теплових двигунів, важливе коректне застосування закону збереження повної енергії (насамперед варто враховувати ту особливість, що закон виконується в замкнених теплоізолюваних системах).

Якщо для розв'язування задачі потрібні значення питомих теплоємностей, питомої теплоти пароутворення, конденсації, плавлення, кристалізації або згоряння речовин, зверніться до відповідних параграфів підручника та використайте таблиці. Якщо в них немає необхідних даних, зверніться до інших джерел. У таблицях значення можуть подаватися з використанням префіксів (наприклад, КДж або МДж), враховуйте це під час обчислень.

Оскільки під час розв'язування задач із цієї теми вам потрібно буде складати рівняння теплового балансу та розв'язувати їх, будьте уважними, складаючи пропорції та визначаючи з них фізичні величини. Бажано спочатку вивести кінцеву формулу, а вже потім виконувати обчислення. Це зменшить похибки обчислень, наприклад, під час округлень.

Обов'язково проаналізуйте отриманий результат. Зверніть увагу, чи мають одержані величини фізичний зміст (наприклад, потрібно пам'ятати, що ККД будь-якого теплового двигуна не може дорівнювати або перевищувати 100 %. Крім того, ККД поршневих двигунів внутрішнього згоряння, як правило, не перевищує 40 %). Це дасть можливість вчасно помітити помилку та виправити її.

Бажано переходити до розрахункових фізичних задач вищого рівня складності після розв'язування й перевірки простіших задач, а також якісних та експериментальних задач, які пропонуються у підручнику. Це допоможе глибше усвідомити фізичний зміст явищ і процесів, які розглядаються в задачах на теплові машини, та дібрати найоптимальніший варіант їх розв'язування.

Оформлюйте задачі в зошиті згідно з правилами. Основні етапи розв'язування розрахункової фізичної задачі потрібно записувати з відповідними коментарями, що дасть можливість самоконтролю та повнішого оцінювання вчителем.

**Задача 1.** Яку масу нафти треба спалити в котельній установці з коефіцієнтом корисної дії 60 %, щоб 4,4 т води, яка надходить із водопроводу при 7 °С, нагріти до 100 °С і 10 % всієї води перетворити при 100 °С на пару?

<i>Дано:</i>	7 °С	<i>Розв'язок</i>
$t_1 = 7 \text{ °С}$	100 °С	$Q_1 = Q_2 + Q_3;$
$t_2 = 100 \text{ °С}$	0,1	$Q_1$ — кількість теплоти, яку необхідно отримати від нагрівника на нагрівання та випаровування води:
$n = 0,1$	$4,4 \cdot 10^3 \text{ кг}$	
$m_1 = 4,4 \text{ т}$	$2256 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_1 = \eta \cdot q \cdot m_2;$
$r = 2256 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$	$m_2 = \frac{Q_1}{\eta \cdot q};$
$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$	0,6	$Q_2$ — кількість теплоти, потрібна для нагрівання води до температури кипіння:
$\eta = 0,6$	$44 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$Q_2 = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1);$
$q = 44 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$		
$m_2$ — ?		

$$Q_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \cdot 4,4 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 93 \text{ °С} = 1718,64 \text{ МДж};$$

$Q_3$  — кількість теплоти, необхідна для перетворення 10 % взятої води на пару.

$$Q_3 = n \cdot r \cdot m_1; \quad Q_3 = 0,1 \cdot 2256 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 4,4 \cdot 10^3 \text{ кг} = 992,64 \text{ МДж};$$

$$m_2 = \frac{1718,64 \text{ МДж} + 992,64 \text{ МДж}}{0,6 \cdot 44 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}} = 102,7 \text{ кг}.$$

**Відповідь:**  $m_2 = 102,7 \text{ кг}$ .

**Задача 2.** Яку масу коксу потрібно спалити, щоб 10 т чавуну, взятого при температурі 10 °С, переплавити в печі, ККД якої 20 %? Температура плавлення чавуну 1160 °С; питома теплоємність 460 Дж/(кг · °С); питома теплота плавлення 140 000 Дж/кг; питома теплота згоряння коксу 29 МДж/кг.

Дано:

$$m_{\text{ч}} = 10 \text{ т}$$

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

$$t_2 = 1160 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c = 460 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$$

$$q = 29 \text{ МДж/кг}$$

$m$  — ?

Розв'язок

Складемо рівняння теплового балансу.

$$Q_1 + Q_2 - Q_3 = 0,$$

де  $Q_1 = cm_{\text{ч}}(t_2 - t_1)$  — нагрівання чавуну від температури  $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , до температури плавлення  $t_2 = 1160 \text{ }^\circ\text{C}$ , питома теплоємність чавуну  $c = 460 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ ; маса чавуну  $m_{\text{ч}} = 10 \text{ т}$ . Кількість теплоти, потрібна для плавлення чавуну  $Q_2 = \lambda m_{\text{ч}}$ , питома теплота плавлення

$\lambda = 140\,000 \text{ Дж/кг}$ ; кількість теплоти, що виділяється під час згоряння коксу  $Q_3 = -qm$ , питома теплота згоряння коксу  $q = 29 \text{ МДж/кг}$ .

Складемо рівняння з урахуванням ККД та визначимо масу коксу:  $cm_{\text{ч}}(t_2 - t_1) + \lambda m_{\text{ч}} - qm \cdot 0,2 = 0$ . Розв'яжемо одержане рівняння та виразимо з нього шукану величину:

$$m = \frac{cm_{\text{ч}}(t_2 - t_1) + \lambda m_{\text{ч}}}{0,2q}$$

Підставивши відповідні значення одержимо, що  $m = 1153 \text{ кг}$ .

**Відповідь:**  $m = 1153 \text{ кг}$ .

**Задача 3.** Холодильник, що споживає потужність  $20 \text{ кВт}$ , охолодив до нуля градусів Цельсія  $200 \text{ кг}$  продуктів, узятих при температурі  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Питома теплоємність продуктів  $2500 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ . За який час виконана ця робота, якщо холодильник виділив у приміщення  $70 \text{ МДж}$  теплоти? Теплоємністю холодильника можна знехтувати.

Розв'язок

Двигун холодильника виконує роботу  $A = P\tau$ . За рахунок цієї роботи від холодильної шафи відбирається кількість теплоти  $Q_1 = cmt$ , де  $c$  — питома теплоємність продуктів. Кількість теплоти, виділена в кімнату, за законом збереження енергії дорівнюватиме

$$Q = A + Q_1 = P\tau + cmt.$$

З цього рівняння визначимо час:

$$\tau = \frac{Q - cmt}{P};$$

$$\tau = \frac{70\,000\,000 \text{ Дж} - 2500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}} \cdot 200 \text{ кг} \cdot 20 \text{ }^\circ\text{C}}{20\,000 \text{ Вт}} = 3000 \text{ с}.$$

**Відповідь:**  $\tau = 50 \text{ хв}$ .

## ВИКОНУЄМО НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЕКТ РАЗОМ

Шановні друзі! Ви ознайомилися з особливостями перебігу теплових процесів та їх використанням у техніці. Досягнення фізики в цій галузі дали можливість людству створити різноманітні теплові машини, які широко застосовуються в побуті та техніці. Разом із розвитком науково-технічного процесу виникла необхідність вирішення важливих проблем, пов'язаних із ефективним використанням теплової енергії, розробленням енергозберігаючих технологій та зменшенням негативного впливу теплових машин на екологію.

Пропонуємо вам спробувати використати набуті знання з розділу «Теплові явища» у процесі виконання навчальних проектів і запропонувати власні способи розв'язання екологічних проблем теплоенергетики та теплокористування, запровадження енергоощадних технологій, ефективного використання теплових машин.

Наведемо основні питання, які можуть бути розвинені у проекті.

**1. Холодильні машини.** З підручника ви дізналися, що теплові машини поділяються на два основних типи: теплові двигуни та холодильні установки. За звичайних умов теплота самочинно не може переходити від менш нагрітих до більш нагрітих тіл. Для того щоб теплоту або внутрішню енергію від менш нагрітого тіла передати більш нагрітому тілу, потрібно виконати роботу. З цією метою використовують спеціальні пристрої — холодильні машини, або холодильники.

У холодильних машинах енергія передається від одного до іншого тіла за рахунок витрат енергії третього тіла, тоді як теплові двигуни виконують роботу за рахунок внутрішньої енергії палива. Тобто холодильна машина працює за принципом, зворотним до принципу дії теплового двигуна (рис. 17.5).

Найпоширенішими холодильними машинами в побуті та на виробництві є парокомпресорні холодильники, де робочим тілом, що охолоджується, є зріджені гази (в рідкому стані киплять за температури від  $-15$  до  $-20$  °С і нижче). У старих моделях холодильників використовували аміак або фреон. У сучасних холодильних установках застосовують спеціальні суміші екологічно більш чистих газів.

Сьогодні поширені холодильники нового покоління із системою «Без інею» («No frost»), яка

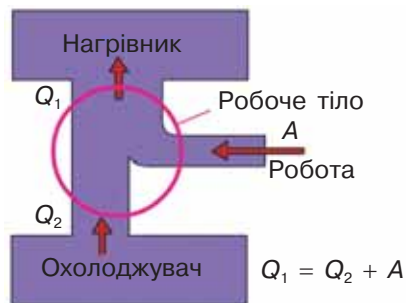


Рис.17.5. Принцип дії холодильної машини

запобігає утворенню інею на внутрішніх робочих поверхнях і необхідності ручного розморожування. У таких холодильниках випаровувачі розміщують у нижній чи верхній частині морозильної камери або за нею. За допомогою турбіни (потужного вентилятора) забезпечується циркуляція повітря, яке охолоджується випаровувачем та по спеціальних повітряних каналах подається в морозильну та холодильну камери.

У побутових холодильниках підтримується температура від 0 до  $-6$  °С, у морозильних камерах — до  $-20$  °С, а у великих промислових холодильниках — до  $-40$  °С. Для отримання низьких температур у лабораторних умовах як охолоджувач використовують рідкий гелій, що за нормального атмосферного тиску кипить при температурі  $-269$  °С (4 К).

Одним із поширених сьогодні видів холодильних машин є кондиціонери. Вони працюють *за принципом холодильної машини й використовуються для охолодження повітря.*

Сучасні кондиціонери мають різні розміри та функціональне призначення. Вони застосовуються в побуті та на виробництві. Поширення набувають мобільні кондиціонери, які не потребують встановлення зовнішнього блоку і легко переміщуються за потреби.

**2. Теплові насоси.** Сучасні технології дають можливість створювати теплові машини з розширеними функціональними можливостями. Одним із прикладів таких машин є теплові насоси. Ці пристрої забезпечують передавання тепла від середовища з нижчою температурою до середовища з вищою температурою. Тепловий насос працює за принципом, оберненим принципу дії теплової машини Карно. Вперше схему теплового насосу, що мав практичне значення, запропонував у 1852 р. лорд Кельвін, який назвав цей прилад «помножувачем тепла». Прикладом теплового насосу є кондиціонер, який працює в режимі обігрівача. При цьому холодовий агент тече в протилежному напрямі, ніж під час кондиціювання повітря.

Важливою особливістю теплових насосів є те, що вони забезпечують можливість використання низькопотенціальної енергії навколишнього середовища, наприклад, повітря, землі, стічних вод, для генерації тепла з метою опалення будинків і нагрівання води, а також холоду для охолодження будинків. При цьому не потрібно використовувати газ та інші види органічного палива, що надзвичайно важливо з огляду на екологічні проблеми, пов'язані з експлуатацією теплових машин.

Дедалі популярнішими як альтернативні джерела теплової енергії стають ґрунтові та водні геотермальні теплові насоси.





Рис. 17.6. Принцип дії ґрунтового геотермального теплового насосу

Принцип їхньої дії ґрунтується на тому, що труби з незамерзаючим рідким тепловим агентом розміщують у свердловинах або водоймищах поблизу будівель (рис. 17.6).

Україна має повний цикл розроблення та виготовлення теплових машин нового покоління. Важливі дослідження в цьому напрямі здійснюються в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, який працює в м. Києві з 1963 р. В інституті виконуються фундаментальні науково-дослідні роботи з питань тепло- й масообміну в дисперсних системах при дискретно-імпульсному введенні енергії; теплофізики високофорсованих процесів у теплоенергетичному обладнанні; наукових основ теплометрії та теплофізичного приладобудування.

Практичним результатом наукових досліджень інституту стало створення та налагодження промислового виробництва енергоощадних теплонасосних технологій із застосуванням альтернативних відновлюваних джерел енергії. Теплові геотермальні насоси вітчизняного виробництва використовують теплову енергію землі за допомогою свердловин глибиною до 25 м, а також енергію води (рис. 17.7).

**Тепловий насос «повітря – рідина» IVT, 17 кВт**



**Тепловий насос VDE TH-6, 6,3 кВт**

**Теплові насоси «ґрунт – рідина» IVT 6 та 11 кВт**



**Теплонасосна установка EES24 «Євроенергосервіс» 7,2 кВт**



**Спліт-система, 2 кВт**

Рис. 17.7. Теплові насоси, розроблені Інститутом технічної теплофізики НАН України





## Головне в розділі 1

Вивчивши розділ «Теплові явища. Теплові машини і механізми», ви ознайомилися з фізичними основами теплових явищ та процесів, особливостями їх перебігу і використання в побуті й техніці.

1. Невпорядкований (хаотичний) рух молекул, атомів, електронів називають тепловим рухом, або теплою. Безпосереднім експериментальним підтвердженням теплового руху в газах, рідинах і твердих тілах є явища дифузії та броунівського руху.

2. Температура є характеристикою середньої кінетичної енергії хаотичного руху молекул і атомів тіла. Під час теплообміну більш нагріті тіла віддають тепло менш нагрітим. У природі у процесі теплообміну теплота переходить від більш нагрітих тіл до менш нагрітих. За звичайних умов теплота самочинно не може переходити від менш нагрітих до більш нагрітих тіл.

3. Одна й та сама речовина може перебувати в таких основних станах: твердому, рідкому та газоподібному. Четвертим станом речовини є плазма.

4. Наноматеріалами називають матеріали, основні фізичні характеристики яких визначаються властивостями нанооб'єктів, що містяться в них; кристалічні або аморфні системи з розміром частинок меншими за 100 нм.

5. За основну одиницю температури Міжнародної системи одиниць (СІ) прийнято Кельвін (К). 1 кельвін дорівнює 1 градусу Цельсія ( $1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

6. Лінійні розміри тіла, температура якого змінилася на величину  $\Delta t$ , обчислюються за формулою  $l = l_0 \cdot (1 + \alpha_l \cdot \Delta t)$ . Об'єм рідкого тіла, температура якого змінилася на величину  $\Delta t$ , обчислюється за формулою:  $V = V_0 (1 + \alpha_V \cdot \Delta t)$ .

7. Внутрішня енергія тіла є сумою кінетичної енергії хаотичного руху та потенціальної енергії взаємодії всіх його мікрочастинок. Внутрішня енергія тіла змінюється при зміні температури тіла та переході речовини з одного агрегатного стану в інший. Основними способами зміни внутрішньої енергії є механічна робота, теплопровідність, конвекція, променевий теплообмін.

8. Кількісною характеристикою теплообміну є кількість теплоти  $Q$ , що вимірюється так само, як і робота та енергія, у джоулях (Дж).

9. Питомою теплоємністю речовини називають фізичну величину, що показує, яка кількість теплоти необхідна для зміни температури речовини масою 1 кг на  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

10. Щоб обчислити кількість теплоти, потрібну для нагрівання тіла, або віддану ним під час охолодження, слід питому теплоємність речовини ( $c$ ) помножити на масу цього тіла ( $m$ ) та зміну його температури ( $\Delta t$ ):  $Q = cm\Delta t$ .

11. Тепловим балансом називають порівняння кількості теплоти, одержаної та відданої тілами в теплових процесах. У замкнутій теплоізольованій системі сумарна кількість теплоти, отримана одними тілами, дорівнює сумарній кількості теплоти, відданих іншими:  $Q_1^+ + Q_2^+ + Q_3^+ + \dots + Q_n^+ = Q_1^- + Q_2^- + Q_3^- + \dots + Q_m^-$ .

Прийнято вважати, що кількість теплоти, отримана тілом під час теплообміну, є додатним числом, а кількість теплоти, віддана тілом під час теплообміну, — від'ємним числом.

12. Під час процесу плавлення (кристалізації) речовини її температура не змінюється. Фізичну величину, що показує, яка кількість теплоти необхідна для повного перетворення 1 кг кристалічної речовини з твердого стану в рідкий за сталої температури плавлення, називають питомою теплотою плавлення:  $\lambda = \frac{Q}{m}$ . Для

плавлення кристалічного тіла масою  $m$  йому потрібно надати кількість теплоти, що пропорційна масі тіла:  $Q = \lambda m$ .

13. Кипіння — процес утворення пари не тільки на поверхні рідини, а й у її об'ємі. Температуру, за якої рідина кипить, називають температурою кипіння. У процесі кипіння температура рідини не змінюється. Чим більший зовнішній тиск, тим вища температура кипіння.

14. Кількість теплоти, яку необхідно витратити, щоб повністю випарувати  $m$  кг речовини, обчислюють за формулою:  $Q = rm$ , де  $r$  — питома теплота пароутворення. Конденсуючись, пара віддає стільки ж енергії, скільки отримала під час пароутворення.

15. Загальна кількість теплоти  $Q$ , що виділяється при згорянні  $m$  кг палива, обчислюється за формулою:  $Q = qm$ .

16. Повна енергія замкнутої системи тіл є сумою механічної та внутрішньої енергії:  $E_{\text{повна}} = E_{\text{мех}} + U = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} + U = \text{const}$ .

17. Тепловими називають машини, в яких енергія згорання органічного палива перетворюється в механічну роботу. За призначенням теплові машини поділяються на два основних типи: теплові двигуни та холодильні установки.

18. В основу роботи теплових двигунів покладено принцип перетворення теплової енергії в механічну роботу. ККД теплового двигуна визначається за формулою

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

ККД теплового двигуна завжди менший за одиницю.



19. Двигуном внутрішнього згоряння називають теплову машину, в якій робочим тілом є гази високої температури, що утворюються під час згоряння рідкого або газоподібного палива безпосередньо всередині поршневого двигуна чи газової турбіни.

20. Холодильною машиною, або холодильником, називають пристрій, у якому внутрішня енергія забирається в менш нагрітого тіла й передається тілу з вищою температурою. У холодильних теплових машинах внутрішня енергія тіла, що охолоджується, зменшується за рахунок виконання роботи іншим тілом.

21. Тепловий насос — пристрій, який працює за принципом, протилежним холодильній машині, передаючи тепло від середовища з меншою температурою до середовища з вищою температурою.

22. Одним із найважливіших недоліків використання теплових машин є забруднення навколишнього середовища. Основними видами забруднення навколишнього середовища, пов'язаними з використанням теплових машин, є хімічне, фізичне, теплове, шумове забруднення. До шляхів зменшення наслідків негативного впливу роботи теплових машин належать: удосконалення технологій їх виготовлення та експлуатації; підвищення ККД; створення й застосування сучасних багатоступневих систем фільтрації шкідливих викидів, що утворюються в процесі роботи теплових машин; перехід на екологічно більш чисті види органічного палива (природний газ, спирт, водень); запровадження новітніх технологій прямого перетворення тепла в електричну енергію; заміна по можливості теплових двигунів електричними; використання екологічно чистих джерел енергії (води, сонця, вітру); розвиток геотермальної енергетики.

## Розділ 2

# ЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ



Усім вам добре відомі слова «електрика», «електричний струм», «електричні явища». Значення фізичних процесів, що з ними пов'язані, важко переоцінити. Побут сучасної людини неможливо уявити без використання електрики: світіння електричних ламп, роботи електричних двигунів, мобільних телефонів, комп'ютерів тощо. Перша згадка про електрику датується VI ст. до н. е., коли Фалес Мілетський, натираючи шматок бурштину сухою тканиною, отримав статичну електрику (від грец. *elektron* — бурштин). Проте стрімкий розвиток науки про електричні явища розпочався з винайденням у 1799 р. гальванічного елемента італійським фізиком Алессандро Вольта. Вивчаючи цей розділ фізики, ви ознайомитеся з будовою та принципом дії різноманітних електричних приладів, які використовуються в побуті та техніці, глибше зрозумієте явища навколишнього світу.



## § 18. Електричні явища. Електризація тіл

- ▶ *Електричні явища*
- ▶ *Електричний заряд*
- ▶ *Електризація тіл*
- ▶ *Закон збереження електричного заряду*

**ЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА.** Дивне й незрозуміле завжди приваблювало людину. Ще легіонери Юлія Цезаря та моряки Христофора Колумба помітили, що поблизу вістер списів і загострених частин щогл кораблів під час негоди іноді з'являються дивні світіння блакитного, зеленого або фіолетового кольору, які супроводжуються потріскуванням (рис. 18.1). Згодом подібні світіння моряки стали називати вогнями святого Ельма. Оскільки вогні зазвичай з'являлися тоді, коли пік шторму вже позаду, моряки раділи їм і сприймали як щасливий знак, вірячи, що святий Ельм узяв корабель під своє заступництво і він обов'язково повернеться в рідну гавань.

На стінах давньоєгипетських храмів можна побачити зображення священної риби яка вражає жертву на відстані, — нільського сома (рис. 18.2, а). Подібну здатність має й електричний скат (рис. 18.2, б), що може паралізувати невеликих риб, які пропливають повз нього.

У північних країнах та в Арктиці можна спостерігати дивне й красиве електричне явище — полярне сяйво (рис. 18.3). Добре знайоме вам потріскування під час знімання синтетичного одягу — це також електричне явище.



Рис. 18.1. Вогні святого Ельма



а



б

Рис. 18.2.

Риби,  
здатні виробляти  
електрику:  
а) нільський сом;  
б) електричний скат



Рис. 18.3 Полярне сяйво в Норвегії

Наразі важко уявити наше життя без електричних явищ. Вони забезпечують людині тепло, світло, допомагають у побуті, дають можливість спілкуватися на великих відстанях. Електричні явища застосовуються під час лікування та урізноманітнюють наше дозвілля. Людина винайшла багато способів одержання електричної енергії, навчилася зберігати її, передавати на великі відстані й використовувати для різних потреб. Проте, перш ніж навчитися користуватися електричними явищами, необхідно було їх ретельно вивчити.

Багато видатних учених досліджували електричні явища. Французький фізик Ш. Кулон встановив основний закон електростатики. Італійський вчений А. Вольта винайшов принципово нове джерело постійного струму, яке відіграло вирішальну роль у подальших дослідженнях електричних і магнітних явищ. Англійський дослідник М. Фарадей відкрив явище електромагнітної індукції, покладене в основу сучасного виробництва електроенергії. Англієць Дж. Максвелл створив теорію електромагнітного поля.

Вивченню електричних явищ присвячена наукова діяльність і багатьох українських учених. Серед них М. Боголюбов, В. Бар'яхтар, М. Голоняк, З. Храпливий, М. Леонтович, І. Пулюй та багато інших. Їхні наукові здобутки відомі далеко за межами України.

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД.** З досвіду вам відомо, що під час розчісування волосся пластмасовим гребінцем він набуває властивості притягувати до себе волосся, маленькі шматочки паперу тощо.



Рис. 18.4. Гребінець притягує волосся та дрібненькі шматочки паперу; скляна паличка, потерта об шовк та повітряна кулька натерта об хутро відхиляють тоненький струмінь води

Подібні властивості виявляються й у багатьох інших тіл, наприклад, скляної палички, потертої об шовк, ебонітової палички, потертої об сукно, повітряної кульки, натертої хутром. Напевно, ви звертали увагу, що волосини під час розчісування притягуються до гребінця, але відштовхуються між собою (рис. 18.4).

Наведені явища є проявом електромагнітної взаємодії, яка відбувається між зарядженими тілами, тобто тілами, що мають електричний заряд. Чим більшого значення заряду набувають тіла, тим інтенсивніше вони притягуються або відштовхуються між собою.

**Електричний заряд — це фізична величина, яка характеризує властивості фізичних тіл або частинок речовини вступати в електромагнітну взаємодію.**

Електричний заряд є джерелом і мірою електромагнітної взаємодії. Можуть існувати тіла та частинки без заряду, проте заряд без тіла чи частинки існувати не може. Електричний заряд позначається латинською літерою  $q$  (від англ. *quantity* — кількість). Одиницею електричного заряду в СІ є кулон (Кл), названий на честь французького вченого Ш. Кулона, тобто

$$[q] = \text{Кл}.$$

Досліди показують, що під час електризації всі тіла, що беруть участь у цьому процесі, отримують електричний заряд. Наприклад, як скляна паличка, так і шовк, набувають властивості притягувати шматочки паперу.

Розрізняють два види електричного заряду. Фізики домовилися називати заряд, що виникає на склі при натиранні його шовком, **позитивним** і позначати знаком «+», а заряд, що виникає при натиранні ебоніту або бурштину хутром чи вовною, вважати **негативним** і позначати знаком «-» (рис. 18.5). Вибір назви цих зарядів був історичною випадковістю. Так, заряд, який названо позитивним, з тим самим успіхом можна було б назвати і негативним.



Рис. 18.5. Позитивний заряд утворюється на склі, потертому об шовк, негативний — на ебоніті, потертому об хутро



Рис. 18.6. Взаємодія зарядів

Термін «заряд» часто вживають для позначення маленького зарядженого тіла чи зарядженої частинки. Яким же чином взаємодіють між собою електричні заряди? *Однйменні* (ті, що мають однакову назву) *заряди відштовхуються, а різнйменні притягуються* (рис. 18.6).

**ЕЛЕКТРИЗАЦІЯ ТІЛ.** Розглянуті вище фізичні явища, в результаті яких тіла набувають властивості притягуватися, називають електризацією.

**Електризацією називають процес, у результаті якого тіла набувають електричного заряду.**

Тіло може набувати електричного заряду не тільки внаслідок тертя, а й під час дотику до нього іншим, наелектризованим, тілом. При цьому частина електричного заряду переходить з одного тіла на інше. Отже, наелектризувати тіло можна внаслідок тертя з іншим тілом або стикання електрично нейтрального тіла (яке не має електричного заряду) з наелектризованим. Є й інші способи електризації тіл, наприклад, нагріванням, опроміненням тощо. Про них ви дізнаєтеся у подальшому.

Ви вже знаєте з курсу фізики сьомого класу, що атом складається з ядра (воно має позитивний заряд), навколо якого рухаються негативно заряджені електрони. Атомне ядро утворюється з *протонів* (частинок, що мають позитивний заряд) та *нейтронів* (електрично нейтральних частинок). Крім того, заряд протона за значенням дорівнює зарядові електрона.

За нормальних умов атом є електрично нейтральною частинкою, оскільки сумарний заряд усіх електронів дорівнює заряду ядра, тобто кількість електронів у атомі збігається з кількістю протонів у його ядрі (нагадаємо, що для цього достатньо визна-



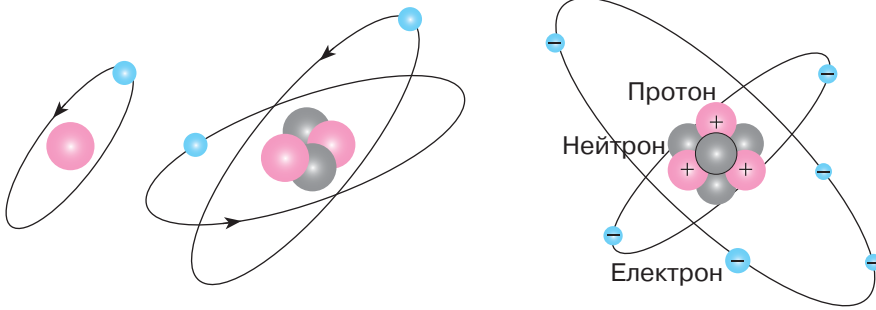


Рис. 18.7. Будова атомів: а) Гідрогену; б) Гелію; в) Карбону

чити порядковий номер хімічного елемента в таблиці Менделєєва) (рис. 18.7).

Таким чином, щоб електрично нейтральний атом перетворити на заряджену частинку, необхідно порушити баланс між протонами і електронами. Це може відбутися внаслідок того, що атом або втратить електрони, або набуде надлишкових електронів.

*Якщо атом втрачає частину електронів, то перетворюється на позитивно заряджену частинку — позитивний йон (рис. 18.8).*

*Коли атом набуває надлишкових електронів, він перетворюється на негативний йон.*

*Тобто йон — це заряджена частинка, яка утворилася з атома внаслідок втрати ним електронів або набуття надлишкової їх кількості. Зверніть увагу, що в процесі електризації тіл протони не можуть залишати атоми, оскільки утримуються в ядрі силами, що в сотню разів перевищують сили електромагнітної взаємодії. Отже, у процесі електризації тіло або втрачає частину електронів, або набуває надлишкових.*

З огляду на це заряд, якого набуває тіло внаслідок електризації, можна визначити як добуток заряду електрона  $e$  та кількості електронів  $N$ , яких набуло чи втратило тіло:

$$q = eN.$$

Значення електричного заряду електрона:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Під час щільного контакту тіл одне тіло набуває електронів, а друге — втрачає. Виявляється, що під час тертя з різними речовинами одна і та сама речовина може набувати заряду різних знаків. Наприклад, під час тертя скла і шовку скло набуває позитивного заряду, а шовк негативного. Якщо скло терти об азбест,

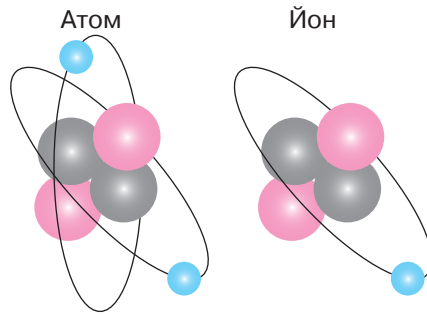


Рис. 18.8. Атом та йон Гелію

то воно набуде негативного заряду. При цьому заряд азбесту буде позитивним. Причиною такого явища є те, що в різних речовинах електрони по-різному притягуються до ядра: в одних сильніше, в інших — слабше. Ті атоми, в яких електрони перебувають далі від ядра й слабше ним утримуються, легше втрачаються. Такі атоми перетворюються на позитивні йони.

**ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ.** В результаті взаємного тертя електрично нейтральних тіл, які утворюють замкнуту систему, заряди перерозподіляються між тілами. На скільки зменшиться кількість електронів у одному тілі, на стільки ж збільшиться в іншому. Повний заряд такої системи не зміниться і надалі дорівнюватиме нулю. Під час стикання зарядженого тіла з електрично нейтральним заряд перерозподілиться між тілами, проте сумарний заряд тіл лишиться сталим. Отже справедливим є закон збереження електричного заряду.

*Повний (сумарний) електричний заряд тіл, що утворюють замкнену систему, залишається сталим:*

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

де  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — електричні заряди тіл, частинок тощо.

### Головне в цьому параграфі

Електричний заряд — це фізична величина, яка є кількісною мірою властивості фізичних тіл або частинок речовини вступати в електромагнітну взаємодію.

Електричний заряд позначається латинською літерою  $q$ .

Одиницею електричного заряду в СІ є кулон (Кл), тобто  $[q] = \text{Кл}$ .

Заряд, що виникає на склі під час натирання його шовком, домовились називати позитивним і позначати знаком «+»; заряд, що виникає при натиранні ебоніту (бурштину) шерстю, домовилися вважати негативним і позначати знаком «-».

Одноіменні заряди відштовхуються, а різноіменні притягуються.

Якщо атом втрачає частину електронів, то він перетворюється на позитивно заряджену частинку — позитивний йон. Якщо атом набуває надлишкових електронів, то перетворюється на негативний йон.

Заряд, якого набуває тіло внаслідок електризації, можна визначити як добуток заряду електрона  $e$  та кількості електронів  $N$ , яких набуло чи втратило тіло:

$$q = eN.$$

Значення електричного заряду електрона становить  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Сумарний електричний заряд тіл у замкненій системі залишається сталим:  $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$ .

**Запитання для самоперевірки**

1. Наведіть приклади електричних явищ.
2. Що називають електричним зарядом?
3. Які види електричного заряду існують у природі?
4. Що називають електризацією?
5. Назвіть способи електризації тіла.
6. Як визначити кількість електронів у атомі?
7. Яка частина атома несе негативний заряд, а яка — позитивний?
8. Чим можна пояснити електризацію тіл під час тертя? Під час дотику зарядженого тіла з електрично нейтральним?

**Домашній експеримент**

1. Візьміть пластмасовий гребінець і розчешіть ним волосся або потріть його об хутро чи сукно. Піднесіть його до маленьких шматочків паперу. Опишіть та поясніть явище, яке спостерігається при цьому.

2. Візьміть надуту повітряну кульку. Потріть її об папір. Піднесіть кульку до стіни або стелі кімнати. Якщо кульку гарно наелектризувати, вона «прилипне» до стіни або до стелі (рис. 18.9). Поясніть це явище.



Рис. 18.9. Електростатичні повітряні кульки

**Вправа до § 18**

- 1(п). Поясніть, що відбудеться з атомом Оксигену, коли він втратить два електрони. Назвіть частинку, що утворилася внаслідок цього, та вкажіть її заряд.
- 2(п). Вкажіть, на якому рисунку графічно зображено атом, позитивний іон, негативний іон.
- 3(с). Поясніть, як теоретично зміниться маса тіла, зарядженого позитивним зарядом, якщо до нього доторкнуться негативно зарядженою ебонітовою паличкою.
- 4(с). Поясніть, чи може тіло мати електричний заряд  $1 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл.
- 5(д). Модуль заряду однієї з двох однакових металевих кульок у 3 рази більший за модуль заряду іншої. Кульки доторкнули одну до одної, після чого повернули до початкових положень. Вкажіть, як зміниться модуль заряду кожної з кульок після дотику.



Розгляньте випадки, коли кульки заряджені: а) однойменно; б) різнойменно.

**6(д).** Чому під час переливання бензину з однієї канистри в іншу він може загорітися, якщо не вжити спеціальних заходів безпеки?

**7(в).** Під час електризації тертям ебонітова паличка набула  $4 \cdot 10^{12}$  електронів. Визначте електричний заряд на паличці. На скільки збільшилася маса палички? Маса електрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

## § 19. Закон Кулона

Із попередніх параграфів вам вже відомо, що електрично заряджені тіла взаємодіють одне з одним. Цілком логічно постає запитання: «Від чого ж залежить сила взаємодії електрично заряджених тіл?». Вперше закон взаємодії нерухомих електричних зарядів установив англійський фізик Генрі Кавендіш, однак свої дослідження він не оприлюднив і вони стали відомі науковій громадськості вже після того, як у 1785 р. французький фізик Шарль Огюстен Кулон незалежно від Кавендіша визначив закон взаємодії електричних зарядів.

У своїх дослідях Кулон вимірював сили притягання й відштовхування заряджених кульок за допомогою сконструйованого ним приладу — крутильних терезів (рис. 19.1), які мали надзвичайно високу чутливість. Наприклад, коромисло терезів поверталось на  $1^\circ$  під дією сили лише  $10^{-9}$  Н. Вимірюючи за шкалою кут повороту рухомого заряду, можна визначати силу взаємодії між зарядами.

Ідея вимірювань ґрунтувалась на блискучій здогадці Кулона про те, що *під час контакту двох однакових кульок, одна з яких заряджена, а друга електрично нейтральна, заряд розділиться між кульками порівну*. Так було знайдено спосіб змінювати заряд кульки у два, три і більше разів.



Шарль Огюстен Кулон (1736—1806)  
Французький фізик, військовий інженер, винахідник основного закону електростатики — закону Кулона.



Рис. 19.1. Крутильні терези Кулона

Кулон вимірював у дослідах взаємодію між кульками, розміри яких набагато менші за відстань між ними. Такі заряджені тіла називають точковими зарядами.

**Точковим зарядом називають заряджене тіло, розмірами якого в умовах певної задачі можна знехтувати.**

У результаті досліджень Кулон встановив закон, який носить його ім'я:

**Сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів прямо пропорційна чисельному значенню добутку цих зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними та напрямлена вздовж прямої лінії, що з'єднає ці заряди:**

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

де  $q_1, q_2$  — модулі зарядів;  $r$  — відстань між точковими зарядами;  $k$  — коефіцієнт пропорційності, значення якого залежить від обраної системи одиниць.

У СІ коефіцієнт пропорційності в законі Кулона під час взаємодії точкових зарядів у вакуумі  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ . Фізичний зміст цього коефіцієнта такий: він показує, з якою силою взаємодіють два точкові заряди по 1 Кл, коли перебувають на відстані 1 м. Напрямок сил кулонівської взаємодії між точковими зарядами зображено на рис. 19.2.

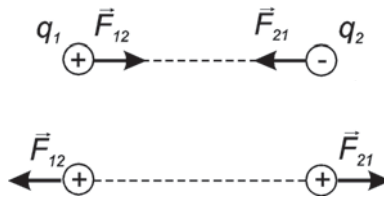


Рис. 19.2. Напрямок сили Кулона під час взаємодії одно- та різнойменних зарядів

Взаємодію нерухомих електричних зарядів називають *електростатичною*, або *кулонівською*, *взаємодією*.

Розглянемо приклади розв'язування задач на використання закону Кулона.

**Задача 1.** Дві однаково заряджених порошинки перебувають на відстані 12 мм одна від іншої та взаємодіють із силою 1 мН. Визначте заряд кожної з порошинок.

Дано:

$$r = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$F = 4 \text{ мН} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$$

$$q = ?$$

Розв'язок

Для розв'язку цієї задачі скористаємося законом Кулона

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

За умовою задачі електричні заряди є однаковими, тому закон Кулона можна записати у вигляді  $F = k \frac{q^2}{r^2}$ , звідки електричний заряд може бути визначено за формулою

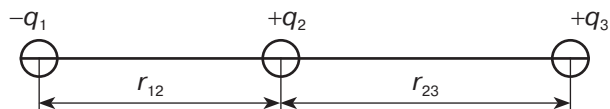
$$q = r \sqrt{\frac{F}{k}}.$$

Обчислимо шукане значення електричного заряду:

$$q = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ Н}}{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}.$$

Відповідь:  $q = 4 \text{ нКл}$ .

**Задача 2.** Три точкові заряди розташовані вздовж прямої на відстанях  $r_{12} = 4 \text{ см}$  та  $r_{23} = 6 \text{ см}$  один від одного.



Обчисліть результуючі кулонівських сил, що діють на кожен із цих зарядів, якщо значення зарядів  $q_1 = -20 \text{ нКл}$ ,  $q_2 = 30 \text{ нКл}$ .

Дано:

$$q_1 = -20 \text{ нКл} = -2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 30 \text{ нКл} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r_{12} = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_{23} = 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$F_1 = ?$$

$$F_2 = ?$$

$$F_3 = ?$$

Розв'язок

Відповідно до закону Кулона перше й друге тіла притягуються із силою

$$F_{12} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}^2}.$$

Друге і третє тіла відштовхуються із силою

$$F_{23} = k \frac{q_2 \cdot q_3}{r_{23}^2}.$$



Перше та третє тіла притягуються із силою, модуль якої визначається за формулою:  $F_{31} = k \frac{q_1 \cdot q_3}{(r_{12} + r_{23})^2}$ .

Запишемо рівнодійну сил, які діють на кожен із точкових зарядів.

Сили, прикладені до першого заряду, напрямлені в один бік, тому модуль їх рівнодійної сили дорівнює сумі модулів цих сил:

$$F_1 = F_{12} + F_{13} = kq_1 \left( \frac{q_2}{r_{12}^2} + \frac{q_3}{r_{13}^2} \right).$$

Підставивши відповідні значення, одержимо, що

$$F_1 \approx 4,3 \text{ мН.}$$

Сили, прикладені до другого заряду, також напрямлені в один бік, тому модуль їх рівнодійної сили дорівнює сумі модулів цих сил:

$$F_2 = F_{12} + F_{23} = kq_2 \left( \frac{q_1}{r_{12}^2} + \frac{q_3}{r_{23}^2} \right).$$

Обчисливши, одержимо, що  $F_2 \approx 7,1 \text{ мН.}$

Сили, прикладені до третього заряду, напрямлені в протилежні боки, тому модуль їх рівнодійної сили дорівнює різниці модулів цих сил і спрямований у бік більшої сили:

$$F_3 = F_{23} - F_{13} = kq_3 \left( \frac{q_2}{r_{23}^2} - \frac{q_1}{r_{13}^2} \right),$$

$$F_3 \approx 2,8 \text{ мН.}$$

**Відповідь:**  $F_1 = 4,3 \text{ мН}$ ,  $F_2 = 7,1 \text{ мН}$ ,  $F_3 = 2,8 \text{ мН}$ .

### Головне в цьому параграфі

Під час контакту двох однакових тіл, одне з яких заряджене, а друге електрично нейтральне, заряд розподілиться між тілами порівну.

Точковим зарядом називають заряджене тіло, розмірами якого в умовах певної задачі можна знехтувати.

Закон Кулона: сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів прямо пропорційна чисельному значенню добутку цих зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними і напрямлена вздовж прямої лінії, що з'єднує ці заряди.

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

де  $|q_1|$ ,  $|q_2|$  — модулі зарядів;  $r$  — відстань між точковими зарядами;  $k$  — коефіцієнт пропорційності.

У СІ коефіцієнт пропорційності  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Які заряди називають точковими?
2. Сформулюйте закон Кулона.
3. Поясніть фізичний зміст величин, що входять до формули, яка виражає закон Кулона.
4. Що називають кулонівською взаємодією?

### Домашній експеримент

Візьміть дві надуті повітряні кульки. Одну з кульок наелектризуйте, потерши її об папір, другу — об вовняну тканину чи хутро. Підвісьте кульки на нитках на певній відстані одна від одної. Простежте, як залежить сила притягання між кульками від відстані між ними та від величини електричного заряду.

### Вправа до § 19

- 1(с). Поясніть, як зміниться сила взаємодії двох точкових зарядів, якщо відстань між ними збільшити у 3 рази.
- 2(с). Поясніть, як зміниться сила взаємодії між двома зарядженими точковими тілами, якщо заряд кожного з них збільшити у 2 рази.
- 3(д). Дві дощові хмари мають електричні заряди 12 і 20 Кл. Хмари перебувають на відстані 3 км одна від одної. Обчисліть силу кулонівської взаємодії між хмарами, вважаючи їх точковими зарядами, оскільки розміри хмар значно менші за відстані між ними.
- 4(д). Обчисліть відстань, між двома точковими зарядами 10 нКл і 3 нКл, якщо сила їх взаємодії становить  $24 \cdot 10^{-5}$  Н.
- 5(д). Два однакових точкових позитивних заряди перебувають на відстані 10 мм один від одного. Заряди взаємодіють із силою  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Н. Визначте величини цих зарядів.
- 6(в). Дві однакові маленькі заряджені кульки перебувають на відстані 40 см одна від одної. Заряд однієї з них 8 нКл, а другої — 2 нКл. Кульки привели в дотик і повернули в початкове положення. Знайдіть силу взаємодії кульок до та після дотику.
- 7(в). Точкові заряди 20 нКл і 40 нКл закріплені на відстані 10 см один від одного у вакуумі. Посередині між ними розміщують точковий заряд — 5 нКл. Обчисліть модуль і напрям результуючої сили, яка діє на цей заряд.

## § 20. Електричне поле

- ▶ *Електричне поле*
- ▶ *Графічне зображення електричного поля*

**ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ.** Вам уже відомо, що тіла, які мають електричний заряд взаємодіють, між собою. Разом із тим на дослідах встановлено, що взаємодія заряджених тіл відбувається не тільки в повітрі або в будь-якій речовині, а й у вакуумі (коли повітря відкачано або тіла розміщено у відкритому космосі). Видатні англійські вчені Дж. Максвелл та М. Фарадей встановили, що взаємодія точкових зарядів відбувається за допомогою електричного поля, що утворюється в просторі навколо електричних зарядів.

Оскільки електричне поле не діє безпосередньо на наші органи чуття, його досить складно уявити та сприйняти. Упевнитися в існуванні електричного поля можна за його діями. Основним чинником, що підтверджує наявність електричного поля, є його дія на будь-яке заряджене тіло або заряд, вміщені в нього.

Так, взаємодія електрично заряджених кульок здійснюється за допомогою електричного поля. Коли одна заряджена кулька потрапляє в електричне поле другої, у результаті чого кульки відхиляються від положення рівноваги (рис. 20.1).

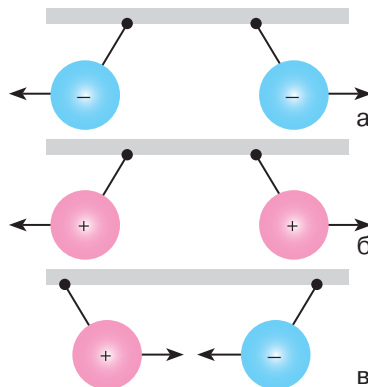


Рис. 20.1.  
Взаємодія електрично заряджених кульок здійснюється за допомогою електричного поля



Джеймс Клерк  
Максвелл  
(1831—1879)  
Шотландський вчений,  
який створив теорію  
електромагнітного  
поля



Майкл Фарадей  
(1791—1867)  
Англійський  
фізик і хімік,  
основоположник  
вчення про  
електромагнітне  
поле

**Електричне поле — особлива форма матерії, що існує навколо заряджених тіл або частинок і діє з певною силою на інші частинки або тіла, які мають електричний заряд.**

**Сила, з якою електричне поле діє на внесені в нього заряджені тіла або частинки, називають електричною.**

Важливою особливістю електричного поля є його матеріальність: хоча ми не можемо його спостерігати безпосередньо, воно існує. Пригадайте, у підручнику сьомого класу описувалося, як можна «побачити» за допомогою фотокамери мобільного телефону невидиме для людського ока, але матеріальне інфрачервоне випромінювання пульта дистанційного керування телевізора.

Ми живемо у справжньому павутинні, зітканому з величезної кількості електричних полів. Тривалий час вважалося, що вони не впливають на живі організми. Проте тривала дія зовнішнього електричного поля людину може спричиняти негативні наслідки: зміни гормонального фону та біострумів мозку, погіршення пам'яті, втомлюваність, загострення захворювань нервової, серцево-судинної, імунної та інших систем організму.

Послабити шкідливий вплив електричного поля можна, зменшивши час його впливу або підвищивши вологість повітря чи застосувавши антистатиками.

Наразі відомо, що клітини й тканини організму також створюють навколо себе електричні поля. Вимірювання та реєстрацію цих полів широко застосовують для діагностування різних захворювань (електроенцефалографія, електрокардіографія, електроретинографія тощо).

**ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.** Для наочного зображення електричного поля використовують силові лінії, які ще називають лініями напруженості електричного поля. Особливістю силових ліній є те, що вони мають напрям, який збігається з напрямом сили, що діє на пробний позитивний заряд, вміщений в електричне поле.

Силові лінії окремого точкового заряду — це радіальні прямі, проведені через точку, в якій перебуває цей заряд, оскільки в будь-якій точці навколишнього простору сила, що діє на пробне тіло, спрямована по прямій, яка з'єднує центри заряджених тіл. Якщо заряд тіла позитивний, силові лінії спрямовані від центра тіла (рис. 20.2, а), якщо негативний — до центра тіла (рис. 20.2, б).

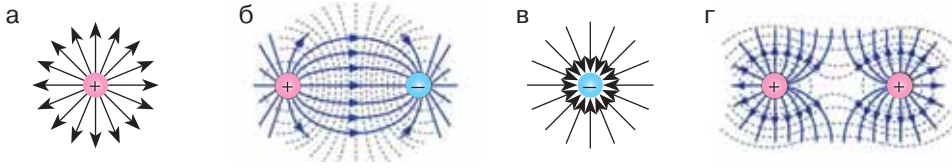


Рис. 20.2. Силові лінії поля точкових зарядів: а) позитивного; б) негативного; в) двох різнойменних; г) двох однойменних

### Головне в цьому параграфі

Електричне поле — особлива форма матерії, що існує навколо електрично заряджених тіл або частинок і діє з певною силою на інші частинки або тіла, які мають електричний заряд.

Сила, з якою електричне поле діє на вміщене в нього заряджене тіло або частинку, називається електричною.

Джерелом електростатичного поля є заряд, без нього поле не існує.

### Запитання для самоперевірки

1. Якими дослідями можна довести існування електричного поля?
2. Сформулюйте визначення електричного поля.
3. Як змінюється дія електричного поля у разі віддалення від електричного заряду, що його створює?
4. Що називають силовими лініями електричного поля та для чого їх використовують?

### Вправа до § 20

- 1(п). Поясніть, чи будуть взаємодіяти близько розташовані електричні заряди у вакуумі біля космічного корабля, наприклад, на орбіті навколо Землі, де немає атмосфери.
- 2(с). Одним зі способів очищення повітря від пилу є застосування електрофільтрів, у яких повітря проходить крізь заряджені стрижні. Поясніть, на чому ґрунтується принцип дії таких електрофільтрів.
- 3(с). У електричне поле зарядженої кулі помістили два тіла із різними за модулем зарядами. Порівняйте значення електричної сили, яка діє на кожне з двох тіл. Укажіть, як зміниться електрична сила, що діє на заряджені тіла, якщо заряд кулі, який утворює поле, збільшити вдвічі.

## § 21. Взаємодія заряджених тіл.

### Провідники та непровідники електрики

- ▶ Заряджання й розряджання тіл. Провідники електрики
- ▶ Діелектрики. Електризація через вплив
- ▶ Напівпровідники

### ЗАРЯДЖАННЯ Й РОЗРЯДЖАННЯ ТІЛ. ПРОВІДНИКИ ЕЛЕКТРИКИ.

Ви вже знаєте, що у процесі електризації відбувається перерозподіл електричного заряду. Заряджання та розряджання тіл зумовлено переходом певних заряджених частинок частинок з одного тіла на інше. Якщо тіло має надлишок електронів, воно заряджене негативно. Якщо ж протонів більше, ніж електронів, тіло заряджене позитивно. Коли кількість позитивно та негативно заряджених частинок однакова, тіло є електрично нейтральним.

Електрично заряджені тіла вивчають за допомогою спеціальних приладів. Одним із них є *електроскоп* — прилад для виявлення електричних зарядів (рис. 21.1).

Електроскоп складається з металевого корпусу 1 зі склом 2. Всередині корпусу розміщено металевий стрижень 3 з прикріпленими до нього легко рухомими паперовими або алюмінієвими смужками 4. Від металевого корпусу приладу стрижень ізольовано пластмасовою втулкою 5. До верхньої частини стрижня прикріплено металеву порожнисту кулю 6, яку називають *кондуктор*.

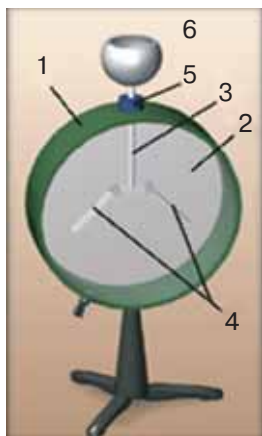


Рис. 21.1.  
Електроскоп

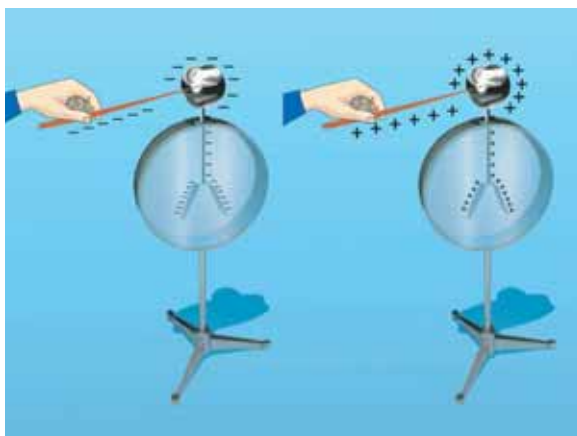


Рис. 21.2.  
Принцип дії електроскопа



Якщо до кондуктора доторкнутися зарядженим тілом, електричний заряд через провідний стрижень потрапить на кожну смужку. Оскільки, однойменно заряджені тіла відштовхуються, то нижні кінці смужок розійдуться в різні боки (рис 21.2). Чим більший заряд матиме тіло, яким доторкнулися до кондуктора, тим більшим буде кут розходження між смужками. Отже, за кутом між смужками можна зробити висновок про величину заряду досліджуваного тіла.

Коли до зарядженого електроскопа піднести тіло, яке має заряд протилежного знака, то кут між його смужками почне зменшуватися. Таким чином, електроскоп дає можливість визначити знак заряду наелектризованого тіла. Спробуйте пояснити, чому так відбувається.

Окрім електроскопа, для виявлення та вимірювання електричних зарядів використовується *електрометр*. Він працює за таким самим принципом, як і електроскоп. Відмінністю електрометра є наявність легкої алюмінієвої стрілки, яка може обертатися навколо горизонтальної осі, а також проградуєваної шкали на передній стінці корпусу, що дає можливість використовувати прилад не тільки для якісних, а й для кількісних вимірювань. За кутом відхилення стрілки можна зробити висновок про величину електричного заряду, якого було надано електрометру (рис. 21.3).

Ви вже знаєте, що під час електризації, наприклад, дотиком, електричні заряди можуть переходити від одних тіл до інших. Виконаємо дослід. За допомогою натертої об шовк скляної палички зарядимо електрометр. При цьому стрілка, яка отримує від стрижня такий самий заряд, відхиляється. Якщо до кульки електрометра, що заряджений позитивно, доторкнутися рукою, він розрядиться.

На електрометр через тіло людини перейде із землі певна кількість негативного заряду, що компенсує його позитивний заряд. Подібне явище можна спостерігати, якщо доторкнутися до зарядженого електрометра залізним предметом. Якщо ж повторити дослід, але взяти в руку пластмасу, суху деревину або одягнути гумову рукавичку, заряджене тіло не розряджається.

Тобто рух електричних зарядів у речовині залежить від її природи. Загалом речовини різноманітні за електричними властивостями. Розрізняють провідники електрики, напівпровідники, а також речовини, що не проводять її, — діелектрики.



Рис. 21.3.  
Заряджений  
електрометр

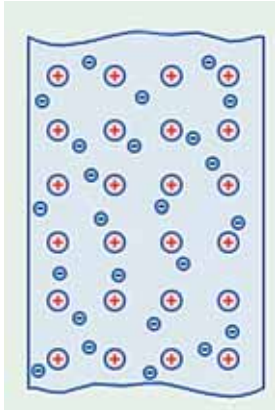


Рис. 21.4.

Носіями заряду в металах є електрони провідності, які вільно рухаються між позитивними йонами кристалічних ґраток

**Провідниками** називають речовини, які мають заряджені частинки, здатні рухатися по всьому об'єму тіла. Ці частинки називають *вільними електричними зарядами*. Провідниками є всі метали, окремі хімічні сполуки, водні розчини солей, кислот, лугів, розплави солей тощо.

У металах вільними носіями електричного заряду є електрони, які також називають *вільними електронами*, або *електронами провідності*. До вільних електронів належать електрони останнього валентного шару, що перебувають порівняно далеко від позитивно зарядженого ядра, тому слабо пов'язані з ним і можуть вільно рухатися по всьому об'єму металу в будь-якому напрямі (рис. 21.4).

Якщо немає зовнішнього електричного поля, негативний заряд електронів металевого провідника компенсується позитивним зарядом йонів. Такий провідник буде електрично нейтральним, тобто не матиме електричного заряду.

Якщо провідник внести в електричне поле, всередині нього виникне впорядкований рух вільних носіїв електричного заряду.

**ДІЕЛЕКТРИКИ. ЕЛЕКТРИЗАЦІЯ ЧЕРЕЗ ВПЛИВ.** *Діелектриками*, або ізоляторами, називають речовини, які за певних умов не мають вільних носіїв електричного заряду і не проводять електрику. Проте якщо умови змінюються, наприклад, під час нагрівання, у діелектрику можуть виникнути вільні електричні заряди. Отже, поділ речовин на провідники й діелектрики є умовним.

До діелектриків належать усі гази за нормальних умов, рідини (гас, спирти, ацетон, дистильована вода та ін.), тверді тіла (скло, пластмаси, сухе дерево, папір, гума тощо).

Якщо діелектрик помістити в електричне поле, то його молекули починають орієнтуватися у напрямку силових ліній (рис. 21.5).

У результаті на поверхні діелектрика виникає досить тонкий шар зарядів, знак яких протилежний заряду, що створює електричне поле. У досліді з наелектризованою ебонітовою паличкою та клаптиками паперу електричне поле зарядженої палички діє на молекули, з яких складається папір. На поверхні клаптиків паперу утворюється тонкий шар електричного заряду, протилеж-

ного за знаком заряду палички. Тому клаптики притягуються до палички.

Спробуйте відповісти на запитання: чи можна зарядити електрично нейтральне тіло не натираючи його та не торкаючись до нього? Виконаємо дослід. Піднесемо до незарядженого електрометра, не торкаючись його кондуктора, позитивно заряджену скляну паличку. Стрілка електрометра відхилиться на певний кут від стрижня (рис. 21.6).

Ви вже знаєте, що під впливом зовнішнього електричного поля відбувається рух електричних зарядів усередині речовини. Частина провідника, на якій зосереджуються надлишкові електрони, набуває негативного заряду, а частина, яку залишили електрони, — позитивного заряду. Під впливом електричного поля, створюваного позитивно зарядженою паличкою, вільні електрони зі стрілки та стрижня переміщуються ближче до зарядженої палички у верхню частину електрометра. Отже, у стрілці та нижній частині стрижня утворюється нестача електронів. Тому стрілка й нижня частина стрижня набувають позитивного заряду й відштовхуються, внаслідок чого стрілка повертається на певний кут.

У разі наближення до електрометра зарядженого тіла кут відхилення стрілки збільшується, віддалення — зменшується.

Оскільки у цьому досліді не було безпосереднього контакту між зарядженою паличкою й електрометром, такий спосіб надання тілу електричного заряду називають *електризацією через вплив*, або *електростатичною індукцією*.

**НАПІВПРОВІДНИКИ.** Речовини, які за здатністю проводити електрику посідають проміжне місце між провідниками та діелектриками, називаються напівпровідниками. До напівпровідників належать, наприклад, кремній, германій, селен та інші речовини. На відміну від провідників, у яких наявні вільні носії заряду, напівпровідники не проводять електрику за порівняно низьких температур і відсутності зовнішніх впливів (наприклад, освіт-

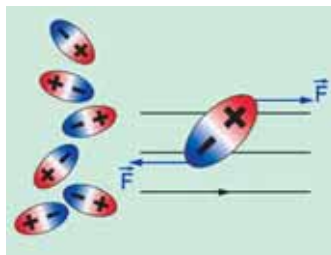


Рис. 21.5. Діелектрики в електричному полі

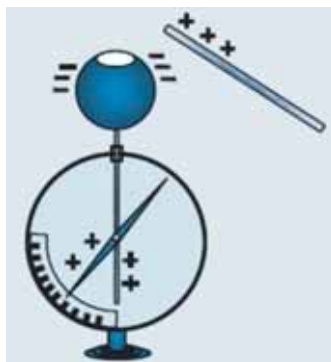


Рис. 21.6. Відхилення стрілки електрометра під впливом електричного поля

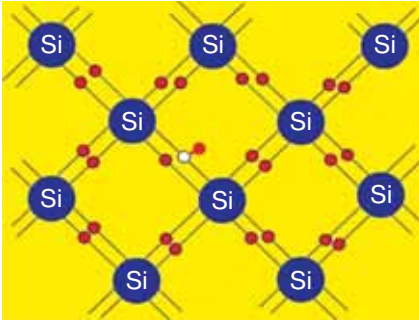


Рис. 21.7.  
Утворення вільного електрона та «дірки» в кремнієвому напівпровіднику



Рис. 21.8.  
Процесори мобільних пристроїв виготовляють із напівпровідникових матеріалів

лення), оскільки всі електрони є зв'язаними (зовнішні електрони мають досить міцні зв'язки з ядрами).

Разом із тим зв'язок електронів із атомами в напівпровідниках не такий міцний, як у діелектриках. Тому навіть за незначного підвищення температури або освітлення напівпровідника деякі електрони відриваються від своїх атомів і стають вільними носіями заряду, тобто можуть переміщатися по всьому напівпровіднику.

Коли електрон відривається від атома, його електрична нейтральність порушується: на місці електрона з'являється надлишковий позитивний заряд, який у фізиці називають «діркою». При цьому в напівпровіднику виникають негативні (вільні електрони) та позитивні (дірки) носії заряду (рис. 21.7). Тобто напівпровідник стає провідником електричного заряду.

Якщо напівпровідник помістити в зовнішнє електричне поле, то рух носіїв заряду стає впорядкованим. При цьому напрям руху електронів буде протилежним напрямку руху «дірок».

Завдяки своїм унікальним властивостям напівпровідники набули широкого використання в сучасній електроніці. Так, однією з головних частин вашого комп'ютера або смартфона є процесор — мініатюрний напівпровідниковий пристрій (рис. 21.8).

### Головне в цьому параграфі

Зарядження та розрядження тіл зумовлене переходом певних заряджених частинок з одного тіла на інше.

Провідниками називають речовини, які мають заряджені частинки, що здатні рухатися по всьому об'єму тіла (їх називають вільними електричними зарядами).

Діелектриками називають речовини, які не містять вільних носіїв електричного заряду і не проводять електрику.

Спосіб надання електрично нейтральному тілу електричного заряду без безпосереднього контакту із зарядженим тілом називають електризацією через вплив.

Напівпровідники — це речовини, які за здатністю проводити електрику посідають проміжне місце між провідниками та діелектриками.

Носіями електричного заряду в напівпровідниках є електрони і дірки, які з'являються внаслідок розривання ковалентних зв'язків, наприклад, під час нагрівання або освітлення напівпровідника.

У напівпровіднику без домішок електричний струм створюється електронами та дірками, що рухаються в протилежних напрямках.

### Запитання для самоперевірки

1. Поясніть, чим зумовлено заряджання та розряджання тіл.
2. Поясніть принцип дії електроскопа й електрометра. Що спільного вони мають та які їхні відмінності?
3. Які речовини називають провідниками?
4. Поясніть, що відбувається з провідником при вміщенні його в електричне поле.
5. Які речовини називають діелектриками?
6. Поясніть, що відбувається з молекулами діелектрика при його розміщенні в електричному полі.
7. У чому полягає особливість електризації через вплив?
8. Які речовини називають напівпровідниками?
9. Що є вільними носіями електричного заряду в напівпровідниках?

### Вправа до § 21

- 1(п). Металеву пластинку зарядили негативним зарядом. Поясніть, що відбулося при цьому з деякою частиною атомів.
- 2(с). До незаряджених металевих паличок піднесли заряджені тіла. Поясніть, як розподіляться заряди на паличках у кожному з випадків.
- 3(с). Заряджена паперова гільза підвішена на шовковій нитці. Якщо наблизити руку до гільзи, вона притягається до руки. Поясніть це явище.
- 4(д). Металеву паличку натирають вовняною тканиною. Після цього тканина починає притягувати дрібні шматочки паперу, а паличка — ні. Поясніть, чому так відбувається.
- 5(д). На тонких шовкових нитках підвішені дві однакові паперові кульки. Одна — заряджена, друга — незаряджена. Поясніть, як, не маючи жодних додаткових приладів і матеріалів, можна визначити, яка з кульок заряджена.
- 6(в). Поясніть як зміниться відхилення стрілки зарядженого електрометра, якщо піднести до нього (не торкаючись) тіло, що має однаковий заряд, а потім тіло протилежного заряду.

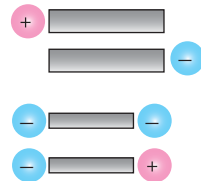


Рисунок до задачі 2

### Це цікаво

Комахи, що утворюють складноорганізовані спільноти, здатні використовувати для спілкування та передавання інформації своє статичне електричне поле. Біологи провели спостереження за домашніми бджолами, під час якого встановили, що розташовані на голові комах антени чутливі до електричного поля і відхиляються у разі його впливу.

При цьому активуються механорецептори в основі антен, які й передають інформацію про відхилення в центральну нервову систему. Виявляється, що таким чином бджоли можуть використовувати статичний заряд для того, аби передавати інформацію своїм родичам: рухи «зарядженої» бджоли впливають на антени інших комах. Статичного електричного заряду комахи набувають у результаті швидких рухів крил під час польоту.

Статична електрика може бути шкідливою для тварин та людини. Чи доводилося вам відчувати її дію?

Повітряні лайнери під час польоту зазнають впливу атмосферної електрики внаслідок тертя об повітря. Це може впливати на функціонування бортових радіоелектронних систем (рис. 21.9).

Електризація може бути причиною аварій на текстильних і прядильних, паперових фабриках, у друкарнях, у гумовій промисловості. Тому на виробництві створюють спеціальні системи електростатичного захисту для зменшення негативного впливу статичної електрики на здоров'я працівників.

За яким принципом вони працюють? При внесенні металевого провідника в електричне поле в ньому відбудеться розподіл зарядів, хоча в цілому провідник лишається електрично нейтральним. Електричні заряди, що утворюються на протилежних частинах провідника, вміщеного в електричне поле, у свою чергу також створюють електричне поле (внутрішнє). Причому вільних електронів у металах настільки багато, що

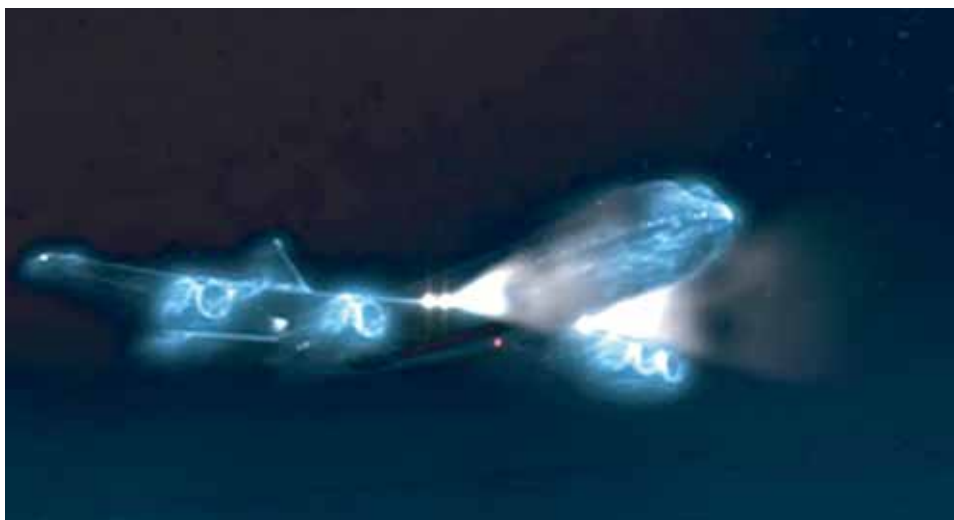


Рис. 21.9. Світіння літака в нічному небі внаслідок електризації



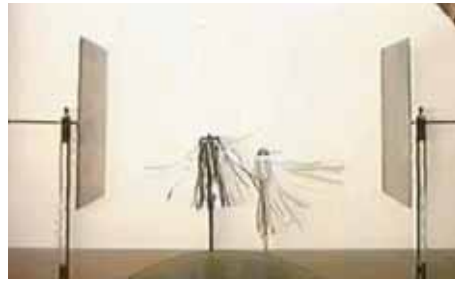
створюване ними електричне поле компенсує зовнішнє електричне поле. Така особливість використовується в системах електростатичного захисту.

Відсутність електричного поля усередині провідника використовується для створення **електростатичного захисту**. Розглянемо модель найпростішого пристрою для електростатичного захисту. Візьмемо два султани, один із яких складається з підставки та прикріплених до неї легких металевих смужок, другий — з легких паперових (рис. 21.10, а). Вмістимо ці султани між двох металевих пластин, з'єднаних із джерелом електричного поля. Коли немає електричного поля, смужки султанів звисають донизу. Якщо зарядити пластини, між ними створюється електричне поле. Смужки султанів електризуються і починають взаємно відштовхуватися (рис. 21.10, б). Якщо ж султани огородити захисною сіткою, смужки знову опускаються донизу, так само як і за відсутності електричного поля (рис. 21.10, в).

Отже, від електричного поля можна захиститися, якщо оточити тіло провідником. На практиці це використовується для захисту від потужного електричного поля радіолокаторів та радіостанцій, випромінювання яких може зашкодити здоров'ю, а також для запобігання дії електричного поля на чутливі прилади.



а)



б)



в)

Рис. 21.11. Електростатичний захист

## § 22. Дискретність електричного заряду. Електрон

- ▶ Досліди Йоффе — Міллікена. Електрон
- ▶ Дослідження дискретності електричного заряду

**ДОСЛІДИ ЙОФФЕ — МІЛЛІКЕНА. ЕЛЕКТРОН.** Вивчаючи електричні явища, фізики вже наприкінці XIX ст. дійшли висновку щодо наявності носія елементарного негативного електричного заряду, який дістав назву «електрон». Проте його існування залишалося гіпотезою, оскільки не було підтверджене експериментально.

У 1910—1911 рр. незалежно один від одного російський фізик Абрам Йоффе і американський вчений Роберт Міллікен провели експерименти з дослідження дискретності (подільності) електричного заряду та визначення заряду електрона. У своїх дослідах вчені застосовували установки, принцип дії яких зображено на рис. 22.1.

Експериментальна установка складалася із закритої ємності 2 (захисного кожуха), з відкачаним до стану вакууму повітрям. Усередині ємності перебували дві металеві пластини 3, яким можна було надавати певний заряд. За поведінкою частинок можна було спостерігати через спеціальне віконце за допомогою мікроскопа.

За відсутності електричного поля заряджені частинки у вакуумі будуть рухатися донизу, проте цей процес можна зупинити, якщо зарядити верхню пластину позитивно, а нижню негативно. Регулюючи величину заряду пластин, учені домагалися того, що часточки плавали всередині між пластинами.

Унаслідок опромінювання частинок рентгенівським або ультрафіолетовим випромінюванням частинки втрачали заряд і рухалися донизу, їх знову зупиняли, регулюючи заряд пластин. Такий процес повторювали кілька разів і за спеціальними формулами обчислювали заряд частинок.

У результаті проведених досліджень вдалося виявити, що заряд частинок завжди змінювався стрибками, на строго визначену

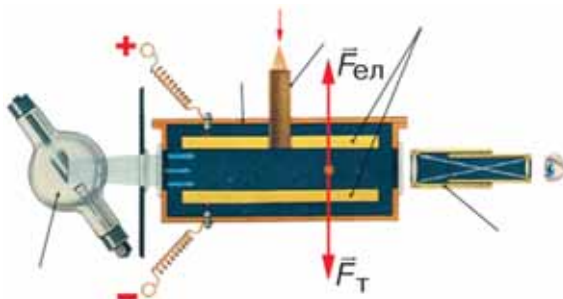


Рис. 22.1. Схема експериментальної установки дослідів Йоффе та Міллікена: 1 — спеціальний розпилувач; 2 — захисний кожух; 3 — паралельні заряджені пластини; 4 — мікроскоп; 5 — джерело світла (ліворуч від установки)

величину або кратну їй величину, тому було зроблено висновок про існування маленької частинки, що несе на собі неподільний електричний заряд. Цією частинкою є електрон. Найменший електричний заряд прийнято називати елементарним зарядом. (Слово «елементарний» походить від лат. *elementarius* — первинний, найпростіший, основний.)

Заряд електрона було визначено дослідями англійського фізика Р. Міллікена. Він установив, що електрон має негативний електричний заряд, який дорівнює:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Заряд електрона є невід’ємною його властивістю, що розглядається не сама по собі, а тільки разом із цією мікročастинкою.

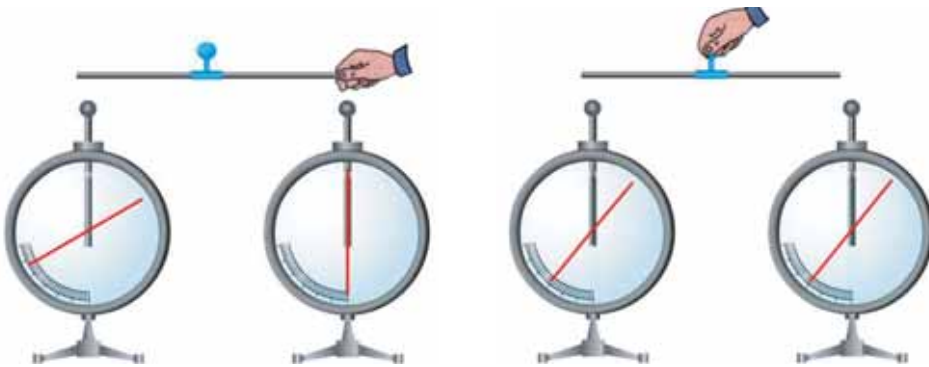
### ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ.

Дискретність (подільність) електричного заряду можна дослідити за допомогою електрометра. Виконаємо дослід. Візьмемо два однакові електрометри (рис. 22.2, а). Зарядимо один із них. Зафіксуємо кількість поділок, на яку відхилилася його стрілка. Користуючись металевим провідником із ручкою посередині, виготовленою з діелектрика, з’єднаємо ці електрометри. Під час їх з’єднання частина заряду із зарядженого електрометра переходить на незаряджений. При цьому стрілки обох електрометрів відхиляться на однаковий кут (рис. 22.2, б).

Тобто початковий заряд зарядженого електрометра поділився на дві рівні частини.

Якщо роз’єднати ці електрометри й один із них розрядити, доторкнувшись до його кульки рукою, а потім знову їх з’єднати, заряд поділиться на дві рівні частини.

Ви звернули увагу на те, що в цьому досліді використовувалися два однакові електрометри? Як ви гадаєте, чому? Виявляється, електричний заряд ділиться таким чином, що провідник із біль-



а) б)  
Рис. 22.2. Подільність електричного заряду

шою площею поверхні набуває більшого електричного заряду. Ця особливість використовується для захисту споруд від блискавок, електричних приладів від накопичення статичної електрики на їхніх корпусах тощо. Оскільки розміри Землі більші за розміри будинків, то майже весь заряд із тіл переходить на землю. Для цього застосовують металеві провідники, розташовані належним чином і з'єднані з добре провідними шарами ґрунту. Такий вид захисту називають *заземленням*.

### Головне в цьому параграфі

Електрон є носієм елементарного негативного електричного заряду, який, як установив Р. Міллікен, дорівнює:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Електричний заряд є дискретним (подільним). Якщо з'єднати два однакових провідники, один з яких має електричний заряд, а другий електрично нейтральний, то електричний заряд між ними ділиться порівну.

Для виявлення й дослідження електричних зарядів використовують електроскоп та електрометр.

Якщо з'єднати два провідники різних розмірів, один з яких заряджений, а другий електрично нейтральний, то провідник із більшою площею поверхні набуває більшого електричного заряду.

### Запитання для самоперевірки

1. Укажіть мету досліду Йоффе — Міллікена та опишіть його схему.
2. Опишіть дослід, який доводить дискретність електричного заряду.
3. Яка особливість подільності електричного заряду провідників?
4. Поясніть, чому стрижень електроскопа завжди роблять металевим, а кулю порожнистою.
5. Поясніть, чому електроскоп розряджається, якщо доторкнутися до його кульки пальцями.

### Вправа до § 22

- 1(п). Поясніть зміну відхилення стрілки зарядженого електрометра, якщо до його кондуктора піднести (не торкаючись його) металевий стрижень.
- 2(с). Поясніть, який знак зарядів утворюється на блискавковідводі й землі, коли над ними проходить позитивно заряджена хмара.
- 3(д). Якщо заряджене тіло піднести до електрометра, його стрілка відхиляється. Поясніть, що відбуватиметься з електрометром, якщо тіло накрите металевим кожухом. Що станеться, якщо кожух заземлити?
- 4(в). Легка металева кулька висить на шовковій нитці, торкаючись електрично нейтральної металевої палички. Коли до іншого кінця металевої палички, не торкаючись її, підносять іншу заряджену кульку, кулька на нитці відхиляється (рисунок до завдання на с. 159). Поясніть це явище.

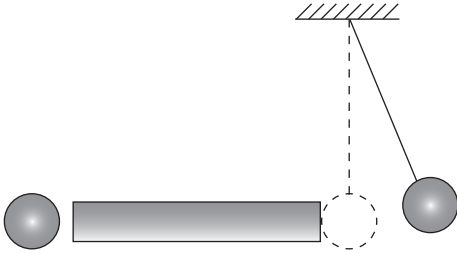


Рисунок до завдання 4

### ЦЕ ВАРТО ЗНАТИ

Блискавка — гігантський електричний розряд, що виникає внаслідок електризації атмосфери (рисунок). Проблеми атмосферної електрики досліджують спеціалісти лабораторій та геофізичних обсерваторій.

Електричні розряди блискавки несуть постійну загрозу людям. Проходження її заряду через людину найчастіше закінчується миттєвою смертю у зв'язку з термічним ураженням внутрішніх органів. У деяких випадках можливе короткочасне припинення дихання. Дотримання простих правил поведінки унеможливить трагічне зіткнення з грозовим розрядом.

**Якщо ви перебуваєте на відкритій місцевості, то:**

1. Не ховайтеся в невеликих спорудах, хатинах, будинках, наметах, тим більше, серед острівців дерев. Краще в такому разі заховатись у якійсь заглибині.

2. Якщо вас двоє, троє чи більше, — не скупчуйтеся в укритті разом, а ховайтеся поодиноці.

3. Переміщуватися до сховища потрібно повільно й злегка пригнувшись, а не у весь зріст, тому що розряди проходять через вищу точку.

4. Під час грози ніколи не ховайтеся біля металевих споруд, конструкцій, під залізними опорами електропередач і мостів, не торкайтеся дротяних огорож та інших об'єктів із металу.

5. Якщо негода застала вас на човні або ви плавали в цей час у річці, то найнебезпечнішим рішенням є вибратися з води на



Рисунок. Електростатична енергія вивільняється під час блискавки

берег, повільно, спокійно, не розмахуючи руками. Якщо це неможливо, то намагайтеся сидіти в човні нерухомо.

**Якщо ви перебуваєте в приміщенні, то:**

1. Негайно зачиніть усі квартирки, вікна, двері.

2. Вимкніть усі електроприлади.

3. Утримайтеся від користування телефоном, але якщо вже біда примусила викликати «швидку допомогу» чи пожежну бригаду, зробіть це одразу після чергового грозового розряду, швидко використавши невеличку паузу до наступного.

### ВЧИМОСЯ РОЗВ'ЯЗУВАТИ ФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ З ТЕМИ «ЕЛЕКТРОСТАТИКА»

Під час розв'язування задач з електростатики потрібно мати на увазі, що напрям електричної (кулонівської) сили залежить від знаків зарядів тіл, які взаємодіють. В окремих завданнях використовується закон збереження заряду. Потрібно також враховувати, що мінімальна порція електричного заряду (модуль заряду елементарної частинки) дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Для прикладу розглянемо декілька задач. Нагадуємо, що спочатку задачу необхідно розв'язати в загальному вигляді, а потім провести обчислення шуканої величини за одержаною кінцевою формулою.

**Задача 1.** Дві однакові провідні кульки із зарядами  $-2,5$  нКл та  $3,5$  нКл перебувають на відстані  $5$  см. Кульки приводять у дотик, а потім повертають у ті самі точки. Визначте сили взаємодії кульок до та після дотику.

Дано:

$$q_1 = -2,5 \text{ нКл} =$$

$$= -2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 3,5 \text{ нКл} =$$

$$= 3,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$F_1 - ?$$

$$F_2 - ?$$

Розв'язок

Відповідно до закону Кулона, сила взаємодії двох точкових зарядів до дотику визначається за формулою:

$$F_1 = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}.$$

Після дотику заряди кульок стануть однаковими. Їх значення обчислюємо за формулою:

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}.$$

Силу взаємодії точкових зарядів після дотику визначимо за формулою:

$$F_2 = k \frac{q^2}{r^2}.$$



Обчислимо шукані величини:

$$F_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{|-2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}| |3,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}|}{(5 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2} = 3,15 \cdot 10^{-5} \text{ Н} = 31,5 \text{ мкН.}$$

$$q = \frac{-2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} + 3,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{2} = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$F_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{(0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл})^2}{(5 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2} = 0,45 \cdot 10^{-5} \text{ Н} = 4,5 \text{ мкН.}$$

Відповідь:  $F_1=31,5$  мкН,  $F_2=4,5$  мкН.

**Задача 2.** Порошинка, що має  $20 \cdot 10^{10}$  надлишкових електронів, зависла в електричному полі, коли над нею на відстані 4 см розмістили позитивний точковий заряд 2 нКл. Визначте масу порошинки.

Дано:

$$N = 20 \cdot 10^{10}$$

$$q_2 = 2 \text{ нКл} =$$

$$= 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m - ?$$

Розв'язок

На порошинку, завислу в електричному полі, діють сили тяжіння

$$F_T = gm,$$

і кулонівська сила взаємодії двох точкових зарядів

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

Заряд порошинки можна записати як добуток заряду електрона  $e$  та кількості надлишкових електронів  $N$ , яких вона набула внаслідок електризації:

$$q_1 = eN,$$

де  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — значення електричного заряду електрона.

Оскільки сила тяжіння за умовою задачі врівноважується кулонівською, справедливим є рівняння

$$F = F_T; \quad k \frac{|eN| |q_2|}{r^2} = gm.$$

Розв'яжемо рівняння відносно шуканої величини та обчислимо масу порошинки:

$$m = k \frac{|eN| |q_2|}{gr^2};$$

$$m = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot |-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 20 \cdot 10^{10}| \cdot |2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}|}{9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} (4 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2} \approx 36 \cdot 10^{-6} \text{ кг} = 36 \text{ мг}$$

Відповідь:  $m = 36$  мг.

## ВИКОНУЄМО НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЕКТ РАЗОМ.

У попередніх параграфах підручника ви ознайомилися з електричними явищами та основами електростатики. Вам пропонується попрацювати над навчальними проектами на теми: «Електрика в житті людини», «Сучасні побутові та промислові електричні прилади», «Електризація в природі та техніці».

У процесі виконання проектів зверніть увагу на розмаїття електричних явищ у природі, їх важливість для людини, використання в сучасній техніці і технологіях, перспективи подальших досліджень та досягнення вітчизняних вчених-фізиків і наукових установ.

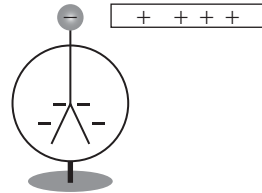
Врахуйте, що особливий науковий інтерес становлять проблеми впливу електричних явищ на живі організми та методи зменшення їх шкідливих наслідків.

Готуючи проект, використовуйте науково-популярні джерела та інформаційно-пошукові системи, а також спробуйте запропонувати власні розробки відповідних пристроїв.

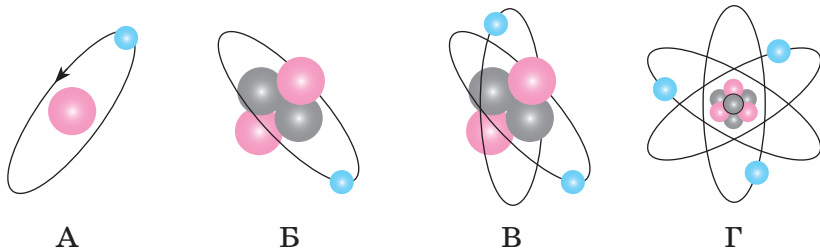
## ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ З ТЕМИ «ЕЛЕКТРОСТАТИКА»

- 1(п).** Вкажіть прилад для визначення наявності електричного заряду тіла:
- А) манометр;
  - Б) електроскоп;
  - В) барометр;
  - Г) динамометр.
- 2(п).** Вкажіть правильне продовження речення: «Електростатичне (електричне) поле діє...»:
- А) тільки на нерухомі заряди;
  - Б) на рухомі й нерухомі заряди;
  - В) тільки на рухомі заряди;
  - Г) в одних випадках на нерухомі, в інших — на рухомі заряди.
- 3(п).** Вкажіть, яке з наведених тверджень пояснює явище електризації тертям:
- А) усі тіла втрачають електрони;
  - Б) усі тіла набувають електронів;
  - В) у тілах виникають позитивні й негативні заряди;
  - Г) одне тіло втрачає електрони, друге — стільки ж їх набуває.
- 4(п).** Вкажіть правильне продовження речення: «Якщо до легкої гільзи, яка висить на шовковій нитці, піднести, не торкаючись, негативно заряджену паличку, то на найближчому до палички боці гільзи утворюється...»:

- А) надлишок електронів, і він набуде позитивного заряду;  
 Б) надлишок електронів, і він набуде негативного заряду;  
 В) нестача електронів, і він набуде позитивного заряду;  
 Г) нестача електронів, і він набуде негативного заряду.
- 5(п). Визначте, як зміниться сила взаємодії між зарядами, якщо відстань між ними зменшити в 3 рази:  
 А) збільшиться в 3 рази;  
 Б) збільшиться в 9 разів;  
 В) зменшиться в 9 разів;  
 Г) зменшиться в 3 рази.
- 6(п). Вкажіть правильне продовження речення: «Внаслідок електризації тіло може набути заряду, кратного...»:  
 А)  $1/2$  заряду електрона; В)  $1,5$  заряду електрона;  
 Б)  $1/3$  заряду електрона; Г) подвоєному заряду електрона.
- 7(с). Дві однакові маленькі кульки, що мають електричні заряди 18 і  $-10$  нКл, привели в дотик. Визначте заряд, кожної з кульок після дотику:  
 А) 28 нКл;  
 Б) 8 нКл;  
 В) 14 нКл;  
 Г) 4 нКл.
- 8(с). Як зміниться кут розходження листочків негативно зарядженого електроскопа при наближенні до нього позитивно зарядженого тіла?  
 А) збільшиться;  
 Б) зменшиться;  
 В) спочатку збільшиться, а потім зменшиться;  
 Г) не зміниться.



- 9(д). Визначте відстань між електричними зарядами 4 і 9 нКл, на якій вони відштовхуються з силою  $8,1 \text{ мкН}$ :  
 А) 40 мм;  
 Б) 2 см;  
 В) 3 см;  
 Г) 2 дм.
- 10(д). Встановіть відповідність між назвою частинки та її умовним зображенням...
- |    |                   |
|----|-------------------|
| А) | 1. Іон Літію      |
| Б) | 2. Атом Літію     |
| В) | 3. Атом Гелію     |
| Г) | 4. Атом Гідрогену |
|    | 5. Іон Гелію      |



11(д). Точковий електричний заряд вміщують послідовно в точки електричного поля, позначені на рисунку. Порівняйте сили, які діють на пробний заряд у цих точках, і встановіть відповідність між точками та величиною сил.

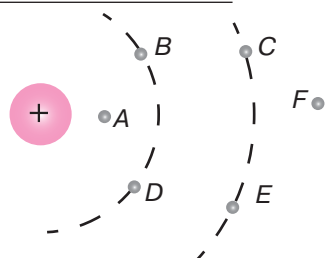


Рисунок до завдання 11

- |                     |              |
|---------------------|--------------|
| А) сила мінімальна  | 1) точка А   |
| Б) сили однакові    | 2) точки В—С |
| В) сила максимальна | 3) точка D   |
| Г) сили різні       | 4) точки С—Е |
|                     | 5) точка F   |

12(д). Визначте силу взаємодії двох однакових точкових зарядів на відстані  $r$  та розташуйте її у порядку збільшення.

	Величини точкових зарядів	Відстані $r$ , м
А	8 нКл	0,005
Б	5 нКл	0,05
В	4 мкКл	0,8
Г	2 мКл	8

- 13(в). Укажіть спосіб, за допомогою якого можна надати позитивного заряду металевій кульці, маючи лише заряджену негативно ебонітову паличку.
- 14(в). Два негативних заряди перебувають на відстані 20 мм один від одного. Заряди взаємодіють із силою  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Н. Визначте величину кожного заряду.
- 15(в). Заряд одного з точкових тіл у 5 разів більший за інший. Тіла приводять у дотик і розміщують на тій самій відстані. Визначте, як при цьому зміниться сила взаємодії тіл. Розв'яжіть задачу для двох випадків: тіла заряджені одноіменно та різноіменно.

## § 23. Електричний струм

- ▶ Електричний струм
- ▶ Умови виникнення та існування електричного струму
- ▶ Дії електричного струму

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ.** Наразі важко уявити наше життя без використання електричного струму. Він необхідний для функціонування побутової та промислової електротехніки. Тож спробуємо з'ясувати, що ж таке електричний струм.

Із попередніх параграфів ви знаєте, що в тілах наявні електрони — негативно заряджені частинки, які й зумовлюють різноманітні електричні явища.

Електричний заряд мають і значно більші частинки — йони. У металевих провідниках, наприклад, лініях електропередачі, є кристалічні ґратки, утворені атомами та позитивно зарядженими йонами. Між ними хаотично рухаються вільні електрони (рис. 23.1). Проте якщо провідник вмістити в електричне поле, то рух заряджених частинок стане напрямленим. У цьому випадку говорять, що в провіднику існує електричний струм.

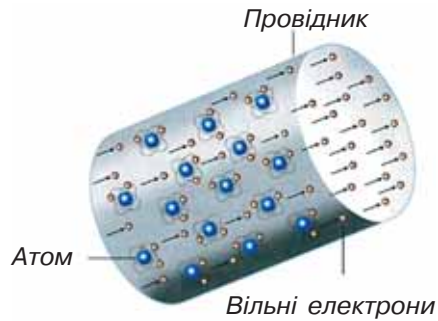


Рис. 23.1. Між йонами кристалічних ґраток металу рухаються вільні електрони

**Електричним струмом називають упорядкований (напрямлений) рух заряджених частинок.**

**УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ТА ІСНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.** Однією з важливих умов виникнення електричного струму є наявність вільних носіїв електричного заряду (заряджених частинок), наприклад, електронів або йонів. Зрозуміло, щоб заряджені частинки почали рухатися впорядковано й виник електричний струм, у провіднику потрібно створити електричне поле. Отже, друга умова: щоб електричний струм існував у провіднику, в ньому потрібно підтримувати електричне поле. Електричне поле створюється та підтримується за допомогою джерела електричного струму.

Рух електронів під дією електричного поля можна уявити собі, як рій мошок чи бджіл, що переміщується у певному напрямку під дією вітру. Швидкість напрямленого руху вільних електронів

дуже мала порівняно зі швидкістю їх хаотичного руху — лише декілька міліметрів за секунду. Разом із тим електричне поле у провіднику поширюється зі швидкістю 300 000 км/с і під його дією практично всі вільні електрони майже одночасно починають рухатись у певному напрямі. Тому кажуть, що струм виникає в усіх точках електричного кола одночасно.

Отже, *ще однією умовою існування електричного струму є наявність замкненого електричного кола*. Тобто провідник і джерело струму мають утворювати замкнену систему. Щоб по провіднику протікав електричний струм, його обидва кінці під'єднують до джерела струму. Якщо розімкнути коло, струм зникає. Саме тому всі побутові прилади вмикаються в електричну мережу за допомогою вилки з двома виводами. Таким чином створюється замкнене електричне коло, по якому проходить електричний струм.

*За напрям електричного струму приймають напрям руху позитивно заряджених частинок, тобто напрям від позитивно зарядженого полюса джерела струму до негативно зарядженого*. Це правило є досить умовним і склалося історично. Ним користуються в сучасній науці та техніці.

**ДІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.** Ми не можемо безпосередньо спостерігати впорядкований рух електронів у провіднику, який зумовлює електричний струм. Наявність електричного струму можна виявити завдяки фізичним явищам, що зумовлюють і супроводжують протікання електричного струму. Такі явища називають діями струму. Розрізняють *теплову, хімічну, магнітну, фізіологічну дії струму*.

Теплову дію струму можна спостерігати на прикладі нагрівання спіралей електричної лампи розжарювання, електропраски, електроплити, електричного обігрівача (рис. 23.2). Металевий провідник, по якому проходить електричний струм, нагрівається. Електрична енергія перетворюється на внутрішню енергію провідника, і його температура збільшується. В електричних лампах розжарювання вольфрамова нитка нагрівається до яскравого світіння.



Рис. 23.2. Теплова дія електричного струму

*Хімічна дія струму* полягає в тому, що під час проходження електричного струму через водні розчини кислот, лугів і солей на електродах, занурених у розчин, спостерігається виділення певних речовин. Так, при пропусканні струму через розчин мідного ку-



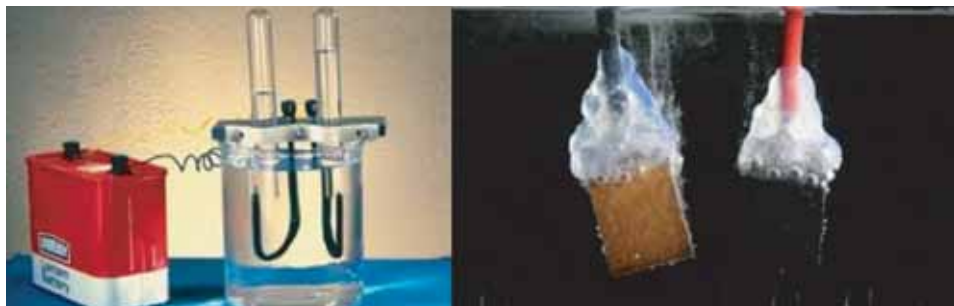


Рис. 23.3. Хімічна дія струму.

поросу ( $\text{CuSO}_4$ ) на негативно зарядженому електроді виділяється мідь (рис. 23.3).

Якщо на залізний стрижень намотати ізольований мідний дріт, а кінці провідника під'єднати до полюсів джерела струму, то дрібні металеві предмети будуть притягуватися до стрижня (рис. 23.4). Це явище зумовлене магнітною дією електричного струму, який проходить через провідник, намотаний навколо стрижня.

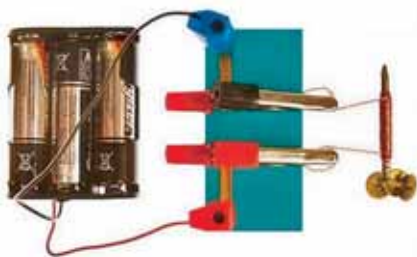


Рис. 23.4. Магнітна дія струму

Вперше вплив електричного струму на магніт було доведено у 1820 р. данським ученим-фізиком Гансом Кристіаном Ерстедом. Зокрема, електричний струм, що проходить провідником, спричиняє відхилення магнітної стрілки, розташованої поблизу цього провідника. На відміну від теплової та хімічної, магнітна дія електричного струму спостерігається завжди, незалежно від того, який провідник: твердий, рідкий чи газоподібний.

Історично першою була виявлена фізіологічна дія електричного струму. Це явище у XVIII ст. описав голландський фізик Пітер ван Мушенбрук після відчуття дії електричного струму на організм. Фізіологічна дія електричного струму на організм людини може виявлятися в судомних скороченнях м'язів, опіках, порушеннях біологічних функцій, електролізі крові. Негативний вплив на організм людини пропорційний тривалості дії. Потрібно чітко дотримуватися правил безпеки під час проведення дослідів з електричним струмом та використання побутових електроприладів.

Разом із тим фізіологічна дія електричного струму може бути й корисною. У відновлювальній медицині широко використовують електрофорез. Електроди медичного пристрою для електрофорезу (рис. 23.5) обгортаються спеціальним матеріалом, який просочу-



Рис. 23.5.  
Використання  
фізіологічної дії струму  
під час електрофорезу

ваного електричного струму (електрофорезу) виконав у 1801 р. наш співвітчизник Стефан Стубелевич, професор Вільнюського університету.

### Головне в цьому параграфі

Електричним струмом називають упорядкований (напрямлений) рух заряджених частинок.

Для існування електричного струму потрібна наявність:

- вільних носіїв електричного заряду (заряджених частинок), наприклад, електронів або йонів;
- електричного поля, яке постійно підтримується джерелом живлення;
- замкненого електричного кола.

За напрям електричного струму приймають напрям руху позитивно заряджених частинок, тобто від позитивно зарядженого полюса джерела струму до негативно зарядженого.

Основними діями електричного струму є теплова, хімічна, магнітна та фізіологічна.

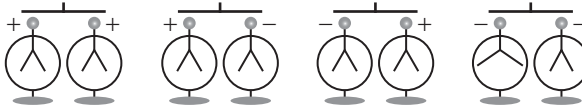
На відміну від теплової та хімічної, магнітна дія електричного струму спостерігається завжди, незалежно від виду провідника.

### Запитання для самоперевірки

1. Що таке електричний струм?
2. За яких умов виникає та існує електричний струм?
3. Як визначають напрям електричного струму?
4. Які основні дії електричного струму ви знаєте?
5. Де використовують теплову дію електричного струму?
6. У чому полягає хімічна дія електричного струму?
7. Які особливості магнітної дії струму?
8. Як впливає на організм фізіологічна дія електричного струму?

**Вправа до § 23**

- 1(п).** Назвіть, які дії чинить електричний струм під час проходження через спіраль лампи розжарювання.
- 2(п).** Поясніть, чому рухається стрілка компаса під час вмикання і вимикання струму в провіднику, розташованому поблизу компаса.
- 3(с).** Розгляньте рисунок та вкажіть, у яких випадках і в якому напрямі проходитиме електричний струм по металевій паличці, що з'єднує два заряджені електроскопи.



- 4(с).** Поясніть, чому напрямлений рух електронів у провіднику, який з'єднує два заряджених тіла, швидко припиняється. Що необхідно для одержання тривалого безперервного електричного струму в провіднику?
- 5(д).** Назвіть дії електричного струму, використовувани в електропробових приладах, які є у вас вдома (наприклад, електропраска, електричний чайник, пральна машина тощо).
- 6(в).** Два тіла, що мають електричний заряд 10 мКл і 18 мКл, з'єднують провідником. Визначте кількість електронів, що проходить по провіднику.

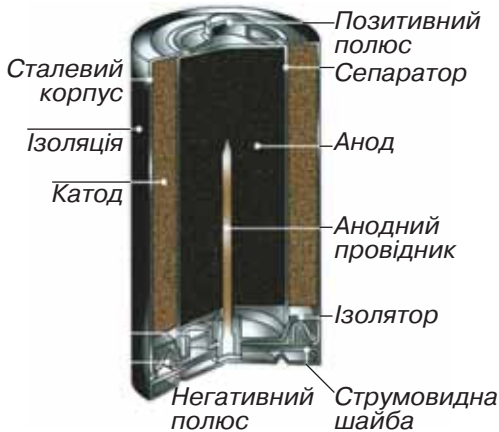
**§ 24. Електричне коло та його основні елементи**

- ▶ Джерела живлення та інші складові електричного кола
- ▶ Електрична схема

**ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ТА ІНШІ СКЛАДОВІ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА.** З попередніх параграфів ви вже знаєте, що для виникнення й підтримання електричного струму в провіднику використовують джерело електричного струму.

**Джерела електричного струму — це пристрої, в яких відбувається перетворення різних видів енергії (механічної, хімічної, теплової, енергії електромагнітного випромінювання) в електричну.**

Джерела електричного струму різних видів працюють за принципом, який полягає у виконанні роботи різними силами для розподілу позитивних і негативних зарядів. Поліус джерела струму, заря-



а)

б)

Рис. 24.1. Гальванічні елементи:

а) будова гальванічного елемента;

б) гальванічні елементи для побутових пристроїв

дженено позитивно, позначають «+» і називають анодом, негативно заряджений полюс джерела позначають «-» і називають катодом.

Джерела електричного струму поділяють на два основні види: хімічні та фізичні. У хімічних джерелах електрична енергія отримується завдяки окислювально-відновлювальним хімічним реакціям. Фізичні джерела забезпечують перетворення інших видів енергії в електричну.

Найпоширенішими хімічними джерелами електричного струму є гальванічні елементи й акумулятори. Гальванічний елемент (рис. 24.1) складається зі сталевих корпусу, всередині якого розміщено катод (суміш двоокису магнію та титану), а також анод (желеподібна суміш цинкового порошку та електроліту). Катод і анод розділені сепаратором. Металевий корпус гальванічного елемента є позитивним полюсом і вкритий ізоляційною плівкою. Під час хімічної реакції цинку з електролітом на полюсах гальванічного елемента виникає електричне поле.

До гальванічних джерел струму належать також електричні акумулятори (рис. 24.2). Щоб акумулятор став джерелом струму, його потрібно зарядити. У процесі зарядження внаслідок хімічних реакцій один електрод акумулятора стає позитивно зарядженим, а другий — негативно, а отже, акумулятор починає нагадувати гальванічний елемент, який працює доти, доки його електроди не відновляться до початкового (чистого) стану. Потім акумулятор потрібно знову зарядити.

Іншим прикладом джерела електричного струму є електрофорна машина, пристрій, у якому механічна енергія перетворюється в електричну. Під час обертання її дисків відбувається неперерв-



Рис. 24.2. Акумулятори:  
а) акумулятор автомобіля;  
б) акумулятори мобільного телефону та ноутбука

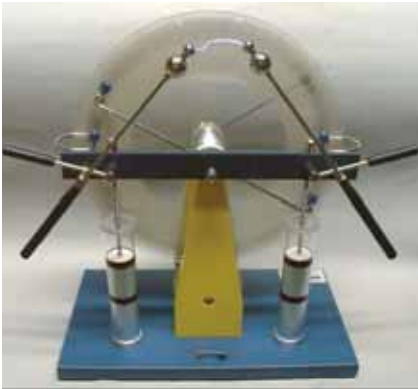


Рис. 24.3.  
Електрофорна машина



Рис. 24.4. Внутрішня енергія нагрітника перетворюється в електричну

не розділення електричних зарядів і між електродами виникає електричний струм — газовий розряд (рис. 24.3).

Ще одним видом джерела живлення є термоелемент, у якому внутрішня енергія нагрітника перетворюється в електричну. Найпростішим термоелементом є дві спаяні дротини з різних металів (термопара). Якщо нагріти місце спая, то в провіднику протікатиме електричний струм, який відхилить стрілку гальванометра (рис. 24.4).

Досить перспективним джерелом живлення є фотоелектричні джерела (рис. 24.5). Основною їхньою функціональною частиною



Рис. 24.5. Фотоелектричні джерела електричного струму



Рис. 24.6. Елементи електричного кола

є фотоелементи, які перетворюють енергію світла в електричну. Виявляється, що під час освітлення певних речовин, наприклад, селену, окису міді, вони втрачають негативний електричний заряд, а отже, створюється електричне поле.

Окрім джерела живлення до складу електричного кола входять споживачі електричного струму — пристрої, які перетворюють електричну енергію в інші

види (наприклад, теплову, механічну). Споживачами є електродвигуни, електричні лампи, нагрівальні прилади, радіоприймачі, телевізори, мікрохвильові печі, ноутбуки, телефони тощо.

Для передавання електричної енергії від джерела живлення до споживача використовують з'єднувальні провідники. Якщо в якомусь місці провідник обірветься, то струм у колі припиниться. На цьому ґрунтується принцип дії вимикачів електричного струму. До них належать ключі, кнопкові вимикачі, рубильники, тобто пристрої, які замикають і розмикають електричні кола.

Нарешті, щоб вимірювати параметри електричного струму в колі, використовують електровимірювальні прилади (рис. 24.6).

Отже, *електричне коло утворюють джерело струму, споживачі електричної енергії, пристрої для вмикання та вимикання електричного струму, електровимірювальні пристрої, з'єднані між собою за допомогою провідників.*

**ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА.** Способи з'єднання електричних приладів у коло зображуються на кресленнях, які називають *електричними схемами*. Прилади на схемах позначаються умовними знаками (рис. 24.7).

Схемц простого електричного кола наведено на рис. 24.8.

Використання електричних схем дає можливість зображати компактно навіть досить громіздкі електричні кола, що значно полегшує роботу інженерів, конструкторів і фахівців з обслуговування та ремонту електричних приладів.

\* **Розгалужені електричні кола.** На відміну від простого в розгалуженому електричному колі є так звані вузлові точки (точки з'єднання трьох і більше провідників), які розділяють його на окремі гілки (рис. 24.9).



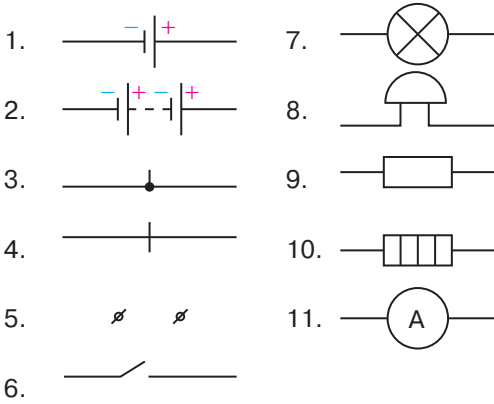


Рис. 24.7. Умовні позначення елементів електричних кіл:  
 1 — гальванічний елемент або акумулятор;  
 2 — батарея гальванічних елементів або акумуляторів;  
 3 — з'єднання провідників;  
 4 — перетин провідників (без з'єднання);  
 5 — затискувачі для під'єднання споживача електричного струму (клеми);  
 6 — вимикач (електричний ключ);  
 7 — електрична лампа розжарення;  
 8 — електричний дзвоник;  
 9 — провідник, що має певний опір (резистор);  
 10 — нагрівальний елемент;  
 11 — електровимірювальний прилад (амперметр)

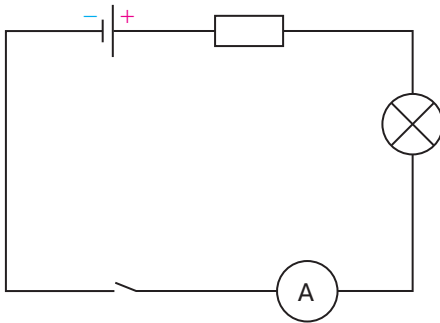


Рис. 24.8. Схема простого електричного кола

Важливою особливістю простого електричного кола є те, що в усіх його елементах тече однаковий струм. Тому для визначення електричного струму в простому колі достатньо виміряти його величину на одній із ділянок (визначити струм, який тече через будь-який елемент).

У кожній гілці розгалуженого електричного кола струм, може відрізнятися за значенням. Тому його визначають за спеціальними правилами, з якими ви ознайомитеся пізніше.

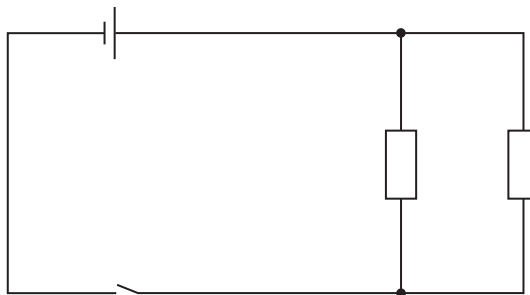


Рис. 24.9. Електричне коло розгалужене

## Головне в цьому параграфі

Джерела електричного струму — це пристрої, в яких відбувається перетворення різних видів енергії (механічної, хімічної, теплової, енергії електромагнітного випромінювання) в електричну.

Електричне коло утворюють джерело струму, споживачі електричної енергії, пристрої для вмикання та вимикання електричного струму, електровимірювальні пристрої, які з'єднані між собою за допомогою провідників.

Споживачами електричного струму є електродвигуни, електричні лампи, нагрівальні прилади, радіоприймачі, телевізори, мікрохвильові печі, ноутбуки, телефони тощо.

З'єднання електричних приладів у колі зображуються на кресленнях, які називаються електричними схемами.

## Запитання для самоперевірки

1. Що називають джерелом електричного струму?
2. Назвіть види джерел електричного струму.
3. Яке призначення має джерело електричного струму?
4. Яким чином електрична енергія від джерела надається споживачам електричного струму?
5. Наведіть приклади споживачів електричного струму.
6. Що називають електричним колом? Назвіть його основні елементи.

## Домашній експеримент

Найпростіше хімічне джерело електричного струму ви можете виготовити, вставивши мідний та залізний електрод у половинку лимона (рис. 24.10).

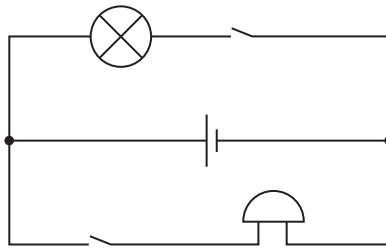
Унаслідок хімічних реакцій один з електродів, що перебувають у кислотному середовищі лимона, стає позитивно зарядженим, а другий — негативно зарядженим. Якщо ці електроди з'єднати провідником виникне електричний струм. На рис. 24.10 мультиметр показує значення електричного струму, що виникає, коли до його затискачів приєднати сталевий і алюмінієвий (мідний) дроти, а другі кінці встромити в лимон або яблуко. Поясніть це явище. Перевірте, чи впливають на покази мультиметра вид овоча (картопля, помідор, цибуля тощо) та речовина дроту (мідь, сталь, алюміній).



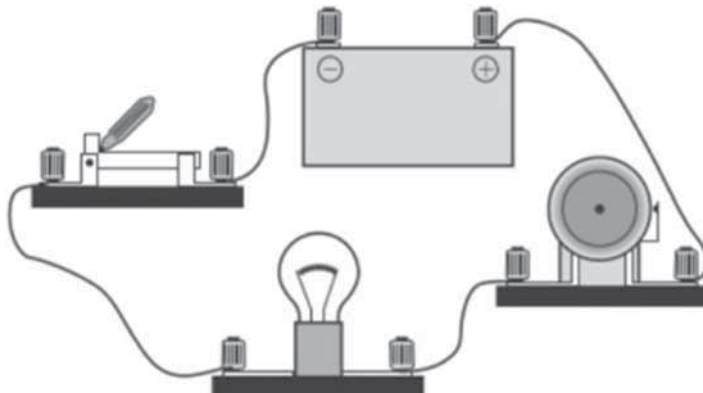
Рис. 24.10. Саморобне хімічне джерело струму

**Вправа до § 24**

- 1(п).** Назвіть перетворення енергії, що відбуваються в таких джерелах струму, як гальванічний елемент, фотоелемент, термоелемент, сонячна електробатарея. Вкажіть, у якому напрямі рухаються електричні заряди всередині джерела живлення.
- 2(п).** Назвіть основні елементи електричного кола, зображеного на рисунку.



- 3(с).** Накресліть схему електричного кола, зображеного на рисунку.



- 4(д).** Накресліть схему з'єднання гальванічного елемента, дзвоника та двох вимикачів, розташованих так, щоб можна було вмикати дзвоник із двох різних кімнат.
- 5(в).** Відомо, що трамвайна лінія та лінія живлення електропоїздів, на відміну від тролейбусної, має лише один контактний електричний провідник. Поясніть, яким чином замикається електричне коло живлення електродвигунів трамваїв та електропоїздів.

## § 25. Сила струму та її вимірювання. Амперметр

- ▶ Сила струму
- ▶ Вимірювання сили струму. Амперметр

**СИЛА СТРУМУ.** Як ви знаєте з попередніх параграфів, наявність електричного струму в металевому провіднику виявляється через його теплову, хімічну, магнітну, фізіологічну дію. Ця дія може бути або сильнішою, або слабшою. Одна й та сама електрична лампа може світитися менш або більш яскраво при підключенні до різних джерел електричного струму. Чим більше значення електричного струму в елементі електричного кола, тим сильніше виявляється дія струму. Величина електричного струму в провіднику залежить від кількості електронів (електричного заряду), що проходять через його поперечний переріз за одиницю часу, і характеризується силою струму.



Андре-Марі Ампер  
(1775—1836)

Видатний французький математик фізик і природодослідник, член Паризької академії наук. Автор наукової фізичної теорії, яка пояснює взаємозв'язок електричних і магнітних явищ.

А. М. Ампер увів поняття «електричний струм».

Учений так захоплювався фізикою, що одного разу вийшовши з дому, написав на дверях крейдою для відвідувачів «Пана Ампера немає вдома», а повернувшись додому, прочитав власний напис і пішов геть

**Силою струму  $I$  називають фізичну величину, що характеризує електричний струм у колі й дорівнює відношенню електричного заряду  $q$ , що пройшов через поперечний переріз провідника, до часу його проходження  $t$ :**

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

Одиницею сили струму є ампер [ $I$ ] = А (названий так на честь відомого французького фізика Андре Ампера)

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

Ампер є основною одиницею СІ. На Міжнародній конференції у 1948 р. було вирішено покласти в основу визначення одиниці сили струму явище взаємодії двох паралельних провідників зі струмом. Для встановлення одиниці сили струму беруть два гнучкі довгі провідники, розташовані паралельно один

одному. Ці провідники під'єднують до джерела електричного струму таким чином, щоб струм проходив по них в одному напрямі. При замиканні кола провідники будуть притягуватися один до одного з певною силою (рис. 25.1).

Якщо провідники під'єднати до джерела так, щоб струм по них протікав у різних напрямках, вони будуть відштовхуватися з такою самою силою. Сила взаємодії паралельних провідників зі струмом залежить від їх довжини, відстані між ними, сили струму в них, середовища, в якому вони розміщені. Чим більша сила струму, тим більшою буде сила взаємодії провідників.

Для практичних потреб використовують також частинні й кратні одиниці сили струму: міліампер ( $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$ ), мікроампер ( $1 \text{ mA} = 10^{-6} \text{ A}$ ), кілоампер ( $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$ ).

Через одиницю сили струму ампер визначають одиницю електричного заряду кулон:  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ с}$ . За одиницю електричного заряду приймають заряд, який проходить через поперечний переріз провідника за  $1 \text{ с}$  при силі струму  $1 \text{ A}$ .

Електричний заряд, що проходить через поперечний переріз провідника, називають також кількістю електрики:  $q = I \cdot t$ .

Електричний заряд, що проходить через поперечний переріз провідника, називають також кількістю електрики:  $q = I \cdot t$ .

Електричний заряд, що проходить через поперечний переріз провідника, називають також кількістю електрики:  $q = I \cdot t$ .

**ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ. АМПЕРМЕТР.** Для вимірювання сили струму в електричному колі використовують спеціальні прилади — амперметри (рис. 25.2).

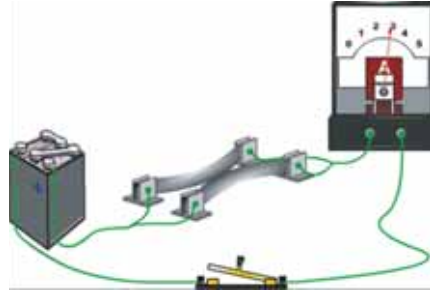


Рис. 25.1. Провідники притягуються при проходженні через них струму в одному напрямі

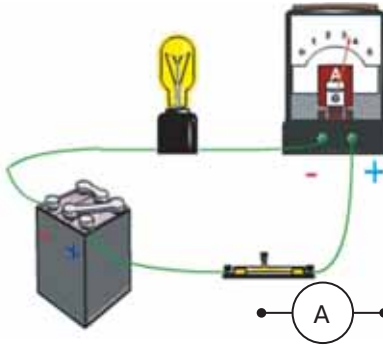


а)

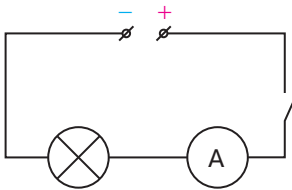
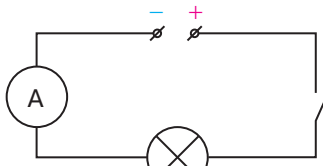
б)

в)

Рис. 25.2. Амперметри: а) демонстраційний; б) лабораторний; в) цифровий



а)



б)

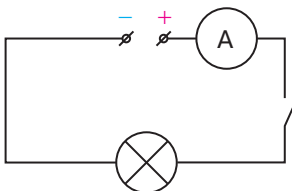


Рис. 25.3. Вимірювання сили струму амперметром:  
 а) амперметр вмикається в електричне коло послідовно;  
 б) покази амперметра в різних точках електричного кола однакові

Принцип дії амперметрів (див. рис. 25.2 а, б) ґрунтується на магнітній дії електричного струму. Стрілка амперметра кріпиться до котушки, розташованої в магнітному полі постійного магніту. При підключенні амперметра до електричного кола через котушку проходить електричний струм. Унаслідок магнітної взаємодії котушка з прикріпленою до неї стрілкою повертаються на певний кут. Чим більший струм в електричному колі, тим більшим буде кут відхилення стрілки амперметра.

Для вимірювання сили струму в певній ділянці кола потрібно його розімкнути у будь-якій точці цієї ділянки й під'єднати послідовно амперметр. На рис. 25.3 показано приклад вимірювання сили струму на ділянці кола між лампочкою та ключем. Якщо порівняти покази амперметра, підключеного до різних ділянок кола (див. рис. 25.3), виявиться, що вони будуть однаковими, оскільки через будь-який переріз кола, включно з джерелом, проходить однаковий електричний заряд.

Отже, амперметр під'єднують до джерела струму послідовно зі споживачем (резистором, електролампою тощо) таким чином, щоб знаки «+» та «-» на корпусі вимірювального приладу збігалися з відповідними полюсами джерела струму.

Розглянемо детальніше шкалу вимірювального приладу (рис. 25.4). На ній є літера А, яка вка-



зує, що цей вимірювальний прилад — амперметр.

Оскільки перед літерою А немає інших літер (наприклад, м,  $\mu$ ) то максимальне значення вимірюваної величини — 2 А. Шкала амперметра рівномірна. Загальна кількість поділок — 40 (число поділок між цифровими позначками дорівнює 10). Тоді ціна поділки шкали цього амперметра:

$$C = \frac{2\text{А}}{40 \text{ под}} = 0,05 \frac{\text{А}}{\text{под}}$$

можна визначити й таким чином. Між сусідніми позначками 0,5 та 1 шкали амперметра є 10 поділок. Тоді:

$$C = \frac{1\text{ А} - 0,5\text{ А}}{10 \text{ под}} = \frac{0,5\text{ А}}{10 \text{ под}} = 0,05 \frac{\text{А}}{\text{под}}$$

Відповідно до рис. 25.4 стрілка приладу відхилилася на 23 поділки, отже, амперметр показує силу струму:

$$I = 0,05 \frac{\text{А}}{\text{под}} \cdot 23 \text{ под} = 1,15\text{ А.}$$

У радіотехніці використовують мілі- та мікроамперметри, на шкалах яких зображено відповідно мА,  $\mu\text{А}$ . Максимальне значення сили струму, що вимірюється міліамперметром, зазвичай не перевищує, 0,5—1 А, мікроамперметром — 1 мА. Для забезпечення точності вимірювань шкала таких приладів містить 100 та більше поділок (рис. 25.5).



Рис. 25.4. Шкала амперметра



Рис. 25.5.

Мілі- та мікроамперметри використовують для вимірювання малих струмів

## Головне в цьому параграфі

Силою струму  $I$  називають фізичну величину, що характеризує електричний струм у колі й дорівнює відношенню електричного заряду  $q$ , що пройшов через поперечний переріз провідника, до часу його проходження  $t$ :

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

Один ампер відповідає такій силі струму, за якої відрізки двох паралельних провідників завдовжки 1 м, розташовані на відстані 1 м один від одного, взаємодіють у вакуумі з силою  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

Для вимірювання сили струму в електричному колі використовують спеціальні прилади — амперметри. Амперметр під'єднують до джерела струму послідовно зі споживачем (резистором, електролампю тощо) таким чином, щоб знаки «+» та «-» на корпусі вимірювального приладу збігалися з відповідними полюсами джерела струму.

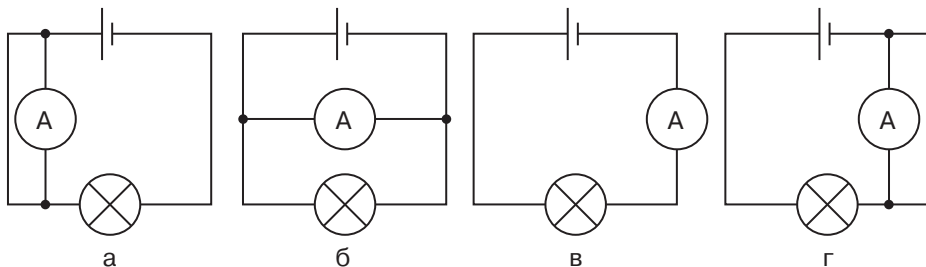
Вимірне значення сили струму в електричному колі дорівнює добутку ціни поділки шкали приладу на кількість поділок, на яку відхилилася стрілка приладу.

## Запитання для самоперевірки

1. Від чого залежить дія електричного струму?
2. Яку фізичну величину називають силою струму?
3. Як сила струму залежить від електричного заряду, що проходить через провідник, і часу?
4. Який учений-фізик увів поняття «електричний струм»?
5. В яких одиницях Міжнародної системи вимірюється сила струму? Яким чином визначають цю одиницю?
6. Яким приладом вимірюють силу струму в електричному колі?
7. Які особливості включення амперметра в електричне коло?
8. Для чого використовують мілі- та мікроамперметри?

## Вправа до § 25

- 1(п). Вкажіть електричну схему на якій правильно зображено підключення амперметра в електричне коло.



- 2(с). Назвіть прилади, зображені на рисунку на с. 181, та встановіть ціну їх поділки.



а)



б)



в)

Рисунок до завдання 2

- 3(д).** Визначте силу струму в провіднику, якщо за 20 с через поперечний переріз провідника проходить електричний заряд 68 Кл.
- 4(д).** Через електричний прилад, увімкнений в електричне коло, проходить електричний струм силою 8 мкА. Визначте електричний заряд, що проходить через цей прилад за 12 хв.
- 5(д).** Визначте час проходження електричного струму по провіднику, якщо при силі струму 0,5 А по провіднику пройшов електричний заряд 7,7 Кл.
- 6(в).** Визначте кількість електронів, що проходять за 1 с через переріз металевого провідника при силі струму в ньому 0,8 мкА.

## § 26. Електрична напруга та її вимірювання. Вольтметр

- ▶ *Електрична напруга*
- ▶ *Вимірювання напруги. Вольтметр*

**ЕЛЕКТРИЧНА НАПРУГА.** Вам уже відомо, що для існування електричного струму в речовині необхідна наявність у ній вільних зарядів та електричного поля. Під час руху вільних електричних зарядів у провіднику сили електричного поля виконують роботу, яку ще називають роботою струму. Робота струму залежить від величини заряду, що переміщується під дією електричних сил, тобто від сили струму. Чим більша сила струму, тим більшу роботу виконує струм. Пригадайте, електролампа, через яку тече більший струм, світить яскравіше. Разом із тим робота струму, а отже, і його тепла дія залежить не лише від значення сили струму. Якщо в електричну мережу увімкнути послідовно з'єднані побутову електролампу та низьковольтну електролампу від кишенькового ліхтарика, вони будуть світитися по-різному. Побутова електролампа світить значно яскравіше, ніж низьковольтна електролампа.



Алессандро Вольта  
(1745—1825)  
Видатний  
італійський фізик,  
хімік та фізіолог,  
основоположник  
учення про електрику

Оскільки сила струму в обох електролампах однакова, але струмом виконується різна робота, має існувати інша величина, від якої залежить робота струму. Цю величину, що характеризує здатність електричного поля виконувати роботу при переміщенні електричного заряду в колі, називають електричною напругою і позначають  $U$ .

**Напруга — це фізична величина, яка характеризує роботу електричного поля з перенесення заряду 1 Кл у певній ділянці кола.**

*Напруга  $U$  на ділянці кола чисельно дорівнює відношенню роботи струму до електричного заряду  $q$ , що переміщується в певній ділянці кола:*

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

Електрична напруга вимірюється у вольтах [ $U$ ] = В (названо на честь відомого італійського фізика Алессандро Вольта). 1 вольт дорівнює такій електричній нарузі на кінцях ділянки кола, коли, переміщуючи електричний заряд в 1 Кл, електричне поле виконує роботу 1 Дж:

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

Для практичних потреб використовують також частинні й кратні одиниці напруги: мілівольт ( $1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$ ), мікровольт ( $1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$ ), кіловольт ( $1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$ ), мегавольт ( $1 \text{ МВ} = 10^6 \text{ В}$ ).

**ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ.** Для вимірювання напруги на полюсах джерела струму та на будь-якій ділянці кола використовують спеціальні прилади — вольтметри (рис. 26.1).



а)



б)



в)

Рис. 26.1. Вольтметри: а) демонстраційний; б) лабораторний; в) цифровий

Вольтметри працюють за таким самим принципом, як і амперметри. Чим більша напруга на ділянці кола, тим більшим буде кут відхилення стрілки вольтметра.

На відміну від амперметра, вольтметр вмикається в електричне коло паралельно тій його ділянці, на якій потрібно виміряти напругу (рис. 26.2, а). При підключенні вольтметра електричне коло не розривається. Вольтметр, підключений до точок 1 і 2, вимірює напругу на електричній лампі, а до точок 3 і 4 — напругу на електродвигуні (рис. 26.2, б).

*Вольтметр під'єднують паралельно до затискувачів джерела струму або ділянки кола таким чином, щоб знаки «+» та «-» на його корпусі збігалися з відповідними полюсами джерела струму.*

Розглянемо детальніше шкалу вимірювального приладу (рис. 26.3).

На ній є літера V, яка вказує, що цей вимірювальний прилад — вольтметр. Оскільки перед літерою V немає жодних позначок (наприклад, m,  $\mu$ ), то максимальне значення вимірюваної величини — 6 В. Ціна поділки шкали цього вольтметра:

$$C = \frac{6 \text{ В}}{30 \text{ под}} = 0,2 \frac{\text{В}}{\text{под}}$$

Оскільки стрілка приладу відхилилася на 23 поділки, вольтметр показує напругу:

$$U = 0,2 \frac{\text{В}}{\text{под}} \cdot 23 \text{ под} = 4,6 \text{ В.}$$

У радіотехніці для вимірювання низьких напруг (наприклад, під час налагодження радіоприй-

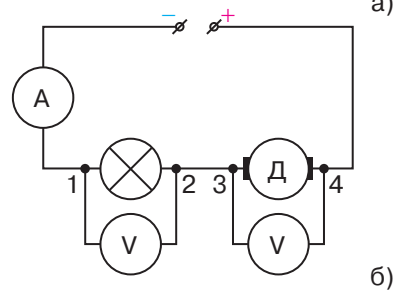


Рис. 26.2. Вимірювання електричної напруги вольтметром: а) вольтметр підключається паралельно до досліджуваної ділянки кола; б) вольтметр, підключений до точок 1 і 2, вимірює напругу на електричній лампі, а до точок 3 і 4 — напругу на електродвигуні



Рис. 26.3. Шкала вольтметра

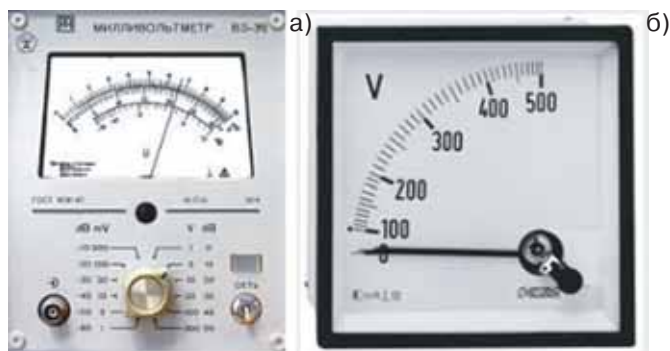


Рис. 26.4. Для вимірювання напруги використовують спеціальні вольтметри: а) мілівольтметр; б) вольтметр для вимірювання високих напруг

мачів) використовують мілівольтметри, mV (рис. 26.4, а). Максимальне значення напруги, що вимірюється такими приладами, не перевищує, як правило, 0,5—1 В. Для вимірювання високих напруг застосовуються спеціальні вольтметри (рис. 26.4, б).

### Головне в цьому параграфі

Напруга — це фізична величина, яка характеризує роботу електричного поля з перенесення заряду 1 Кл у певній ділянці кола.

Напруга  $U$  на ділянці кола чисельно дорівнює відношенню роботи струму до електричного заряду  $q$ , що переміщується в певній ділянці кола:

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

Один вольт дорівнює такій електричній напрузі на кінцях ділянки кола, коли, переміщуючи електричний заряд в один кулон, електричне поле виконує роботу один джоуль:

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

Для вимірювання напруги на полюсах джерела струму та на будь-якій ділянці кола використовують спеціальні прилади — вольтметри.

Вольтметр під'єднують паралельно до досліджуваної ділянки кола таким чином, щоб знаки «+» та «-» на його корпусі збігалися з відповідними полюсами джерела струму.

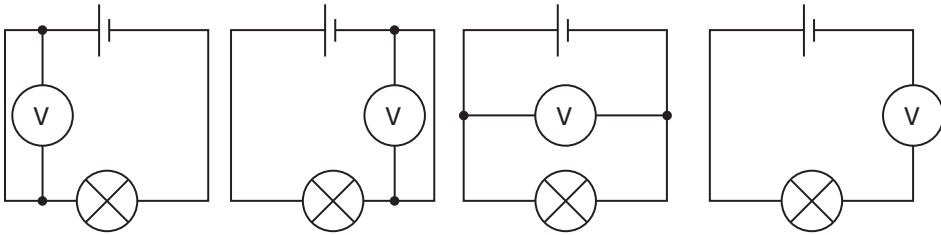
### Запитання для самоперевірки

1. Яку фізичну величину називають напругою?
2. Які найважливіші дослідження виконав учений, за ім'ям якого названо одиниці напруги?
3. В яких одиницях СІ вимірюється напруга?
4. Яким приладом вимірюють напругу на ділянці кола?
5. Які особливості включення вольтметра в електричне коло?
6. Для чого використовують мілівольтметри?



**Вправа до § 26**

- 1(п).** Вкажіть електричну схему на якій правильно зображено підключення вольтметра?



- 2(с).** Назвіть прилади, зображені на рисунку, та встановіть вимірюване ними значення напруги.



а)



б)



в)

- 3(д).** Визначте напругу на ділянці електричного кола, якщо під час перенесення заряду 50 Кл електричний струм виконав роботу 1,2 кДж.
- 4(д).** Визначте роботу електричного струму, якщо при напрузі 220 В по провіднику було перенесено заряд 40 Кл.
- 5(д).** Під час світіння лампи розжарювання електричний струм виконав роботу 3,96 кДж. Визначте електричний заряд, який пройшов через лампу, якщо вона увімкнута в мережу 220 В.
- 6(в).** Визначте, у скільки разів відрізняється напруга на двох ділянках кола, якщо під час проходження по них однакового електричного заряду в одному виконується робота 160 Дж, а в другому 400 Дж.

## § 27. Електричний опір.

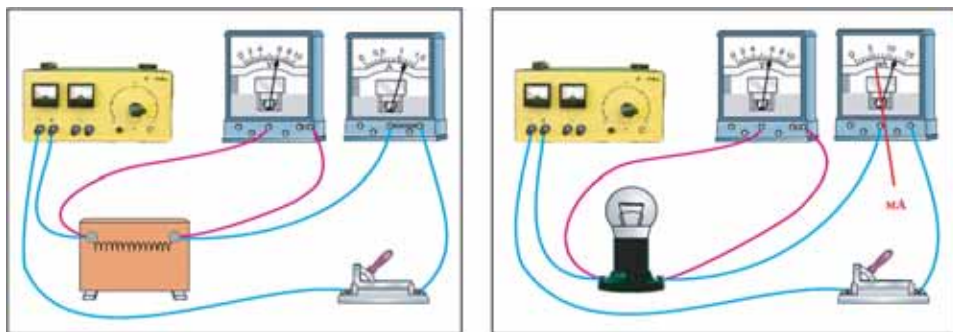
### Закон Ома для ділянки електричного кола

- ▶ Електричний опір
- ▶ Зв'язок сили струму та напруги
- ▶ Закон Ома для ділянки електричного кола

**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР.** Розглянемо електричне коло, яке складається з джерела електричного струму, металевго провідника (спіралі) та амперметра. Паралельно до провідника підключимо вольтметр. При замиканні ключа амперметр буде показувати силу струму в колі, а вольтметр — напругу на кінцях провідника. При напрузі 6 В на кінцях провідника сила струму в колі дорівнює 1,2 А (рис. 27.1, а). Під'єднаємо замість спіралі електричну лампу. При тій самій напрузі 6 В струм у лампі буде настільки малий, що для його вимірювання доведеться замість амперметра увімкнути міліамперметр, який покаже 12 мА (рис. 27.1, б).

Таким чином, за однакових умов електричний струм у нитці розжарювання лампи буде в 100 разів менший, ніж у провіднику-спіралі.

Чому ж у другому випадку сила струму значно менша, ніж у першому, адже джерело живлення й електричне поле на кінцях провідника в обох випадках однакові? Аналізуючи результати експерименту, можна зробити висновок про те, що струм у колі залежить від властивостей провідника, увімкненого в коло. Нитка розжарювання електричної лампи чинить більшу протидію напрямленому руху заряджених частинок, ніж провідник. Говорять, що вона має більший електричний опір.



а) б)

Рис. 27.1. При однаковій напрузі на кінцях різних провідників сила струму в них може відрізнятися:

- а) сила струму в провіднику-спіралі дорівнює 1,2 А;
- б) сила струму в спіралі електричної лампи у 100 разів менша і дорівнює 12 мА



Рис. 27.2. Рух вільних електронів у провіднику сповільнюється внаслідок їх взаємодії з йонами кристалічних ґраток

Таким чином, сила струму залежить від властивостей провідника, оскільки різні провідники мають неоднаковий електричний опір.

**Електричний опір — фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти проходженню електричного струму.**

Електричний опір провідника позначають літерою  $R$ . Спробуємо розібратися, у чому полягає причина електричного опору. Якби електрони у провіднику не зазнавали жодних перешкод під час руху, вони, приведені в упорядкований рух електричним полем, рухалися б за інерцією необмежено довго. Насправді електрони взаємодіють з йонами кристалічних ґраток і між собою. Це сповільнює упорядкований рух електронів і через поперечний переріз провідника за 1 с проходить менша їх кількість, тобто зменшуватиметься сила струму (рис. 27.2).

За одиницю опору приймають один Ом.  $[R] = \text{Ом}$ . Опір такого провідника, в якому при напрузі на його кінцях 1 В сила струму дорівнює 1 А:  $1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}$ .

Одиниця опору в 1881 р. на електротехнічному з'їзді в Парижі була названа на честь відомого німецького фізика Георга Ома.

Застосовують й інші одиниці опору: міліом (мОм), кілоом (кОм), мегаом (МОм):

$$1 \text{ мОм} = 0,001 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ МОм} = 1\,000\,000 \text{ Ом}.$$



Георг Ом  
(1787—1854)

Видатний німецький фізик, один з основоположників учення про електрику

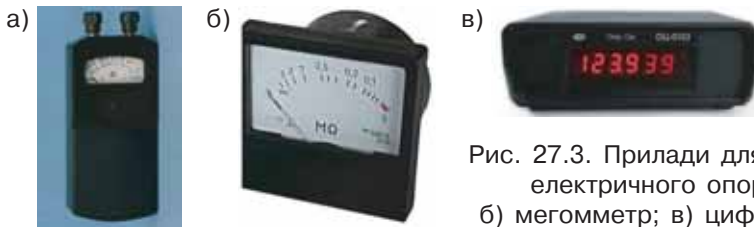


Рис. 27.3. Прилади для вимірювання електричного опору: а) омметр; б) мегомметр; в) цифровий омметр

Одним із найпоширеніших методів визначення опору провідника є використання залежності між напругою на ньому та силою струму в провіднику. На практиці для вимірювання опору провідників використовують спеціальні прилади — омметри (рис. 27.3).

**ЗВ'ЯЗОК СИЛИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ.** Сила струму, напруга і електричний опір — це три найважливіші фізичні величини, які характеризують будь-яке електричне коло. Як ці величини пов'язані між собою?

На досліді визначимо, як залежить сила струму в провіднику від напруги на ньому. Розглянемо електричне коло, що складається з послідовно з'єднаних джерела струму, металевого провідника у вигляді спіралі та амперметра. Паралельно спіралі під'єднано вольтметр (рис. 27.4, а). Встановимо напругу  $U_1 = 2$  В на металевій спіралі. Замкнемо ключ і виміряємо силу струму в провіднику амперметром. Вона становить:  $I_1 = 0,4$  А.

Збільшимо напругу на провіднику у 2 рази:  $U_2 = 4$  В, сила струму збільшиться — амперметр показує  $I_2 = 0,8$  А. Якщо напругу збільшити:  $U_3 = 6$  В, зросте й сила струму:  $I_3 = 1,2$  А (рис. 27.4, б).

Побудуємо графік залежності сили струму в провіднику від напруги на ньому (рис. 27.5).

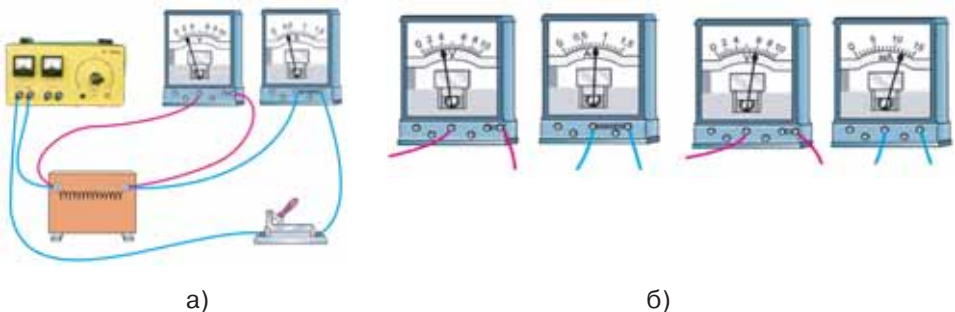


Рис. 27.4. Вимірювання сили струму та напруги на ділянці кола:  
а) при напрузі 2 В сила струму в провіднику становить 0,4 А;  
б) при збільшенні напруги до 4 та 6 В сила струму збільшиться, відповідно, до 0,8 та 1,2 А.

Таким чином, сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на кінцях провідника.

Отже, ми на досліді переконалися, що сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на його кінцях. З'ясуємо, як залежить сила струму в провіднику від його опору. Матимемо на увазі, що під час проведення фізичних дослідів, у яких визначають залежність однієї величини від другої, всі інші величини мають бути сталими. У попередньому досліді використовувався один і той самий провідник, тобто його опір був сталим. Змінювалася напруга на кінцях провідника, що, у свою чергу, зумовлювало зміну струму в провіднику.

У наступному досліді одну й ту саму напругу прикладатимемо до провідників із різним опором. Розглянемо електричне коло з послідовно з'єднаних джерела струму, магазину опорів (набір металевих провідників із різним опором) та амперметра. Паралельно до магазину опорів увімкнено вольтметр, який забезпечує контроль сталої напруги 2 В (рис. 27.6).

Вмикатимемо в електричне коло по черзі опори 1 Ом, 2 Ом, 4 Ом при сталій напрузі на кінцях провідника 2 В. Амперметр, відповідно, буде показувати 2 А, 1 А, 0,5 А. Побудуємо графік залежності сили струму в провіднику від опору провідника при сталій напрузі на його кінцях (рис. 27.7).

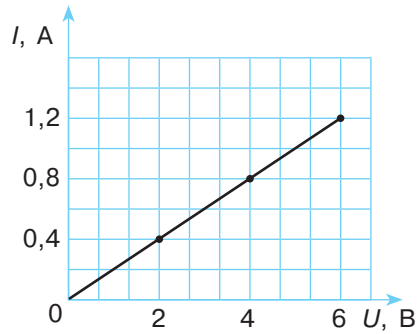


Рис. 27.5. Залежність сили струму в провіднику від напруги на його кінцях

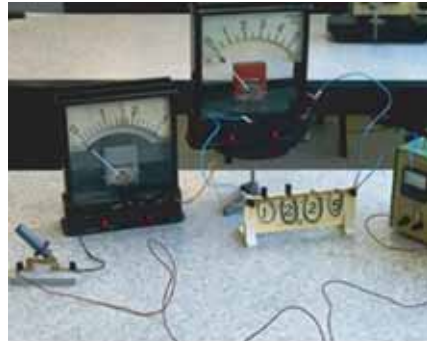


Рис. 27.6. Дослідження електричного кола з провідниками різних опорів

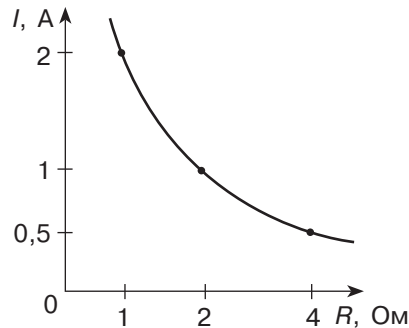


Рис. 27.7. Залежність сили струму в провіднику від опору провідника при сталій напрузі

**ЗАКОН ОМА ДЛЯ ДІЛЯНКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА.** Проаналізувавши результати розглянутого досліду, побачимо, що *сила струму в провіднику залежить від напруги на кінцях ділянки кола та її опору.*

Залежність сили струму від напруги на кінцях ділянки кола та опору цієї ділянки називається законом Ома для ділянки кола, за ім'ям німецького вченого Георга Ома, який експериментально відкрив цей закон і в 1826 р. отримав математичний вираз цієї залежності.

Закон Ома для ділянки кола формулюється таким чином:

**сила струму в однорідній ділянці кола прямо пропорційна нарузі на кінцях цієї ділянки та обернено пропорційна її електричному опору:**

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

де  $I$  — сила струму в ділянці кола;  $U$  — напруга на цій ділянці;  $R$  — опір ділянки.

За законом Ома можна розрахувати силу струму в ділянці кола  $I = \frac{U}{R}$ , напругу на її кінцях  $U = I \cdot R$  та опір ділянки кола

$R = \frac{U}{I}$ . Зверніть увагу: з останньої формули не випливає, що опір провідника залежить від напруги на його кінцях або сили струму в ньому. Ми бачили, що опір залежить від речовини, з якої виготовлений провідник, його довжини та поперечного перерізу.

Для зручності розрахунків формули, наведені вище, зводять у так званий трикутник для визначення сили струму, напруги та опору в електричному колі (рис. 27.8).

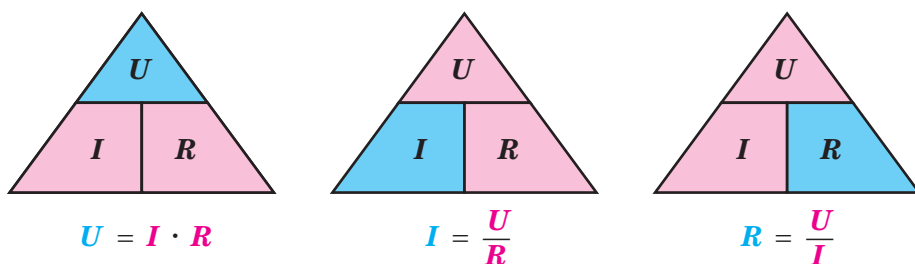


Рис. 27.8. Залежність між силою струму в провіднику, його опором і напругою на кінцях провідника



Для визначення сили струму закривають  $I$  і читають:  $\frac{U}{R}$ ; для визначення напруги закривають  $U$  і читають  $I \cdot R$ ; для визначення опору закривають  $R$  і читають  $\frac{U}{I}$ .

Формули, що впливають із закону Ома, використовуються для розв'язування фізичних задач.

**Задача.** Яку напругу потрібно прикласти до кінців ділянки кола опором 10 Ом, щоб у ділянці проходив струм 2 А?

Дано:

$$R = 10 \text{ Ом}$$

$$I = 2 \text{ А}$$

$$U \text{ —?}$$

Розв'язок

За законом Ома для ділянки кола:  $I = \frac{U}{R}$ , звідки

$$U = I \cdot R;$$

$$U = 2 \text{ А} \cdot 10 \text{ Ом} = 20 \text{ В.}$$

Відповідь:  $U = 20 \text{ В}$ .

### Головне в цьому параграфі

Електричний опір — це фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти проходженню електричного струму.

За одиницю опору приймають 1 Ом — опір такого провідника, в якому при напрузі на його кінцях 1 В сила струму дорівнює 1 А:

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

На практиці для вимірювання опору провідників використовують спеціальні прилади — омметри.

Залежність сили струму від напруги на кінцях ділянки кола та опору цієї ділянки називається законом Ома для ділянки кола: сила струму в однорідній ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки та обернено пропорційна її опору:  $I = \frac{U}{R}$ .

Опір провідника залежить від речовини, з якої він виготовлений, його довжини та поперечного перерізу й не залежить від напруги на його кінцях або сили струму в ньому.

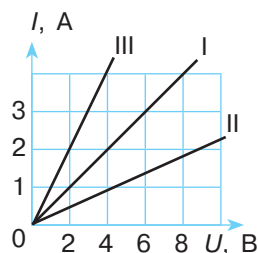
### Запитання для самоперевірки

1. Що називають електричним опором?
2. Яка одиниця опору в СІ?
3. Який метод найчастіше застосовують для визначення електричного опору провідника?
4. Які прилади використовують для вимірювання електричного опору? На чому ґрунтується принцип їх дії?
5. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.

6. Проаналізуйте формулу  $R = \frac{U}{I}$ . Чи можна вважати, що опір ділянки електричного кола залежить від сили струму в ній та напруги на її кінцях? Поясніть.

### Вправа до § 27

- 1(п). Укажіть, як зміниться сила струму в провіднику, якщо напругу на його кінцях збільшити у 2 рази.
- 2(п). Укажіть як зміниться сила струму на ділянці кола, якщо електричний опір ділянки кола зменшити у 3 рази.
- 3(с). Визначте силу струму в провіднику опором 4 Ом, якщо електрична напруга на його кінцях становить 10 В.
- 4(д). Визначте напругу на затискувачах електричної лампи під час проходження по ній струму 0,05 А, якщо при напрузі 220 В сила струму в ній дорівнює 0,1 А.
- 5(д). На рисунку подано графіки залежності сили струму в провіднику від напруги. Поясніть причину розбіжностей значень сили струму на графіках I, II, III при напрузі 2, 4, 6 В. Визначте електричний опір кожного провідника.
- 6(д). При напрузі на затискувачах резистора 220 В сила струму в ньому становить 5 А. Чому дорівнюватиме сила струму в резисторі, якщо напругу зменшити в чотири рази?
- 7(в). У провіднику за 30 хв проходить електричний заряд 1800 Кл. Визначте опір провідника, якщо напруга на ньому 12 В.



## § 28. Розрахунок опору провідника. Питомий опір

- ▶ Розрахунок опору провідника
- ▶ Питомий опір
- ▶ Резистори. Реостати

**РОЗРАХУНОК ОПОРУ ПРОВІДНИКА.** Як ви вже знаєте з попереднього параграфу, опір провідника можна розрахувати за законом Ома для ділянки електричного кола:

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

Також існують спеціальні пристрої для визначення опору — омметри. Однак не завжди зручно користуватись як першим способом (потрібно вимірювати силу струму в провіднику та напругу на його кінцях), так і другим (використання омметра) для ви-

значення опору провідника. Тому для розрахунку електричних кіл використовують формулу, яка виражає залежність опору провідника від його довжини, площі поперечного перерізу та роду речовини. Для встановлення цієї залежності розглянемо дослід (рис. 28.1).

Складемо електричне коло, в якому послідовно з'єднані джерело струму, амперметр та демонстраційна панель, на якій закріплені провідники. Два з них виготовлені з ніхрому й мають однакову довжину, але різну площу поперечного перерізу. Третій виготовлений зі сталі й має таку саму довжину, як і інші провідники, та площу поперечного перерізу, як у другого провідника з ніхрому. Прилад сконструйований таким чином, що його можна вмикати в електричне коло і як цілий провідник (контакти з лівого боку), і як його половину (один контакт із лівого боку панелі, а другий з правого).

Будемо спочатку вмикати в електричне коло цілий провідник і спостерігати за показами амперметра, а потім його половину. Помітимо, що незалежно від речовини, з якої виготовлено провідник, його довжини та площі поперечного перерізу струм при вмиканні цілого провідника вдвічі менший, ніж при включенні половини провідника. Тобто опір цілого провідника вдвічі більший, ніж його половини.

### Опір провідника прямо пропорційний його довжині.

Можна передбачити, що, чим більша довжина  $l$  провідника, тим більше електрони, що впорядковано рухаються, стикатимуться з йонами металу, а отже, більшим буде електричний опір:  $R \sim l$ .

Повторимо дослід, звертаючи увагу на покази амперметра при вмиканні провідників із ніхрому однакової довжини, але з різною площею поперечного перерізу. Помітимо, що при вмиканні провідника з більшою площею поперечного перерізу амперметр показує більший струм. Струм у провіднику з більшою площею поперечного перерізу при одній і тій самій напрузі буде більший. Отже, опір такого провідника буде менший.

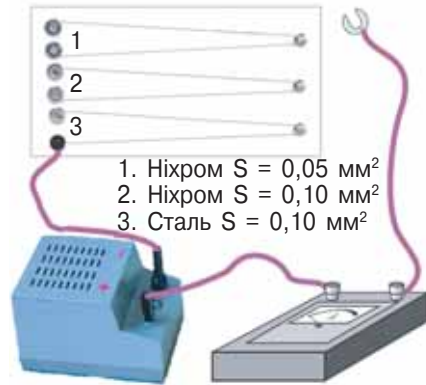


Рис. 28.1. Дослід для визначення залежності опору металевого провідника від його довжини, площі поперечного перерізу та роду речовини

**Опір провідника обернено пропорційний площі його поперечного перерізу.**

Чим більший буде поперечний переріз провідника  $S$ , тим із меншими перешкодами рухатимуться впорядковані електрони і тим менший буде електричний опір:  $R \sim \frac{1}{S}$ .

Повторимо дослід, звертаючи увагу на покази амперметра при вмиканні в електричне коло при одній і тій самій напрузі провідників із ніхрому та сталі, які мають однакову довжину та однакову площу поперечного перерізу. Помітимо, що величина струму відрізнятиметься.

**Опір провідника залежить від роду речовини, з якої він виготовлений.**

Очевидно, опір провідника залежатиме від його внутрішньої будови. Тобто від роду речовини, з якої він виготовлений, оскільки внутрішня кристалічна будова визначатиме частоту зіткнень (взаємодії) електронів із йонами кристалічної ґратки.

Таким чином, *електричний опір прямо пропорційний довжині провідника, обернено пропорційний площі його поперечного перерізу й залежить від речовини провідника.*

Формулу для розрахунку опору провідника записують у вигляді

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

де  $R$  — опір провідника;  $l$  — довжина провідника;  $S$  — площа поперечного перерізу провідника;  $\rho$  («ро») — коефіцієнт пропорційності, який залежить від матеріалу провідника. Його називають питомим опором.

**ПИТОМИЙ ОПІР.** Питомий опір характеризує не конкретний провідник, а матеріал, з якого його виготовлено. З формули для розрахунку опору питомий опір можна визначити як:  $\rho = \frac{R \cdot S}{l}$ .

За одиницю питомого опору в СІ беруть питомий опір провідника довжиною 1 м та площею поперечного перерізу 1 м<sup>2</sup>, що має опір 1 Ом.

$$1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$
$$[\rho] = \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

На практиці найчастіше площу поперечного перерізу провідника виражають у міліметрах квадратних (наприклад, поперечний переріз провідників електричної мережі у квартирі становить  $2,5 \text{ мм}^2$ ), тому користуються такою одиницею питомого опору:

$$1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Різні речовини мають різні питомі опори. У табл. 28.1 наведено питомі опори деяких речовин і сплавів при температурі  $20^\circ \text{C}$  (оскільки опір провідників залежить від температури).

Таблиця 28.1

## Значення питомого опору деяких речовин та сплавів

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	Ніхром	1,1
Вольфрам	0,055	Олово	0,12
Графіт	13	Платина	0,1
Залізо	0,1	Ртуть	0,96
Золото	0,024	Свинець	0,21
Константан	05	Срібло	0,016
Латунь	0,07—0,08	Сталь	0,10—0,14
Мідь	0,017	Цинк	0,061
Нікель	0,073	Фехраль	1,3
Нікелін	0,4	Чавун	0,5—0,8

Як бачимо з таблиці, метали (срібло, мідь, свинець, алюміній) мають порівняно невеликий питомий опір. Для провідників у електричних колах використовують дроти з міді й алюмінію.

В електричних лампах, електронагрівальних приладах найчастіше використовують сплави з великим питомим опором (нікелін, ніхром, фехраль).

Формулу  $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$  застосовують для розв'язування фізичних задач на визначення опору провідника.

**Задача.** Дві дротини мають однакову площу поперечного перерізу та довжину. Одна дротина виготовлена з міді, а друга — з нікеліну. Визначте, яка з двох дротин має менший електричний опір. Порівняйте, у скільки разів відрізняються опори провідників? Питомий опір міді:  $0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ , нікеліну:  $0,4 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

Дано:

$$S_1 = S_2 = S$$

$$l_1 = l_2 = l$$

$$\rho_1 = 0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$$\rho_2 = 0,4 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$$\frac{R_2}{R_1} \text{ — ?}$$

Розв'язок

Опори дротин можна визначити за формулами:  $R_1 = \rho_1 \cdot \frac{l}{S}$ ;  $R_2 = \rho_2 \cdot \frac{l}{S}$ .

Звідси:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{\rho_2 \cdot l \cdot S}{\rho_1 \cdot l \cdot S}; \frac{R_2}{R_1} = \frac{0,4 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}}{0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}} \approx 23,5.$$

**Відповідь:** опір мідної дротини у 23,5 разу менший за опір нікелінової дротини.

**РЕЗИСТОРИ. РЕОСТАТИ.** У сучасній радіоелектроніці широко використовують пристрої, принцип дії яких ґрунтується на законі Ома. Прилади з нерегульованим (постійним) опором називають резисторами (від лат. *resisto* — опираюсь).

Найпростіший резистор складається з каркаса 1, виготовленого з непровідного та термостійкого матеріалу, на який намотано дріт із великим питомим опором 2, або вкривають каркас тонкою плівкою з цього матеріалу, захисного шару 3 та виводів 4, за допомогою яких резистор вмикають в електричне коло (рис. 28.2, а).

Залежно від призначення резистори виготовляють різних розмірів та конструкції. На електричних схемах їх зображують у вигляді умовних позначень (рис. 28.3).

У багатьох пристроях потрібно передбачити можливість швидко змінювати силу струму в колі (наприклад, регулювання сили струму в електроінструментах, електродвигунах швейної машинки, тролейбуса або трамвая). Звичайними резисторами робити це досить складно, оскільки їх довелось би постійно випаювати та впаювати в електричні схеми. Тому для регулювання сили стру-

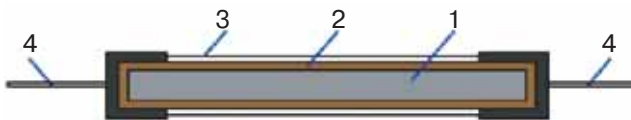


Рис. 28.2. Будова резистора

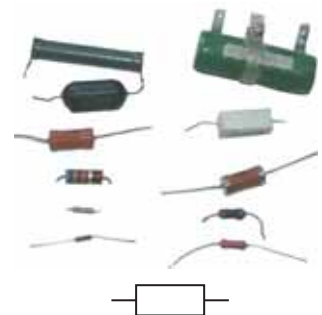


Рис. 28.3. Резистори



му в колі застосовують спеціальні прилади — реостати. Найпоширенішими та досить зручними в користуванні є повзункові реостати.

Для виготовлення такого реостата на керамічний каркас щільно намотують дріт із великим питомим опором, наприклад, константан. Для ізолювання витків дроту між собою їх вкривають тонким шаром окалини. Над обмоткою кріпиться металевий стрижень, по якому вільно може рухатися повзунк із контактами та ізолюваною ручкою, що щільно прилягають до обмотки. Під час переміщення повзунка його контакти стирають шар окалини у місцях дотику, й електричний струм проходить від дроту до повзунка та металевого стрижня. Змінюючи положення повзунка, змінюють довжину дротини, по якій проходить струм до повзунка, і, відповідно, опір активної частини реостата. Реостат вмикається в електричне коло за допомогою двох затискувачів, один з яких розташований на корпусі й з'єднаний з дротиною, а другий — на протилежному кінці металевого стрижня, по якому рухається повзунк (рис. 28.4).

Опір реостата можна зменшувати від певного максимального значення практично до 0 (при цьому сила струму в колі згідно із законом Ома стрімко зростає). Тому, вмикаючи реостат в електричне коло, його повзунк переміщують у середнє положення відносно активної частини, щоб не вийшли з ладу інші елементи кола.

Реостати вмикають в електричне коло, наприклад, послідовно з джерелом струму та амперметром (рис. 28.5).



а)



б)

Рис. 28.4. Реостати:  
а) лабораторний повзунковий реостат;  
б) демонстраційний повзунковий реостат із захисним кожухом

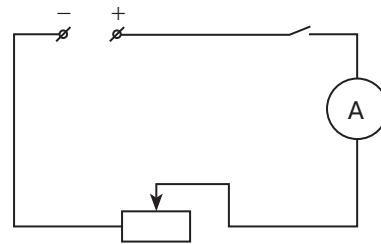


Рис. 28.5. Електричне коло з реостатом

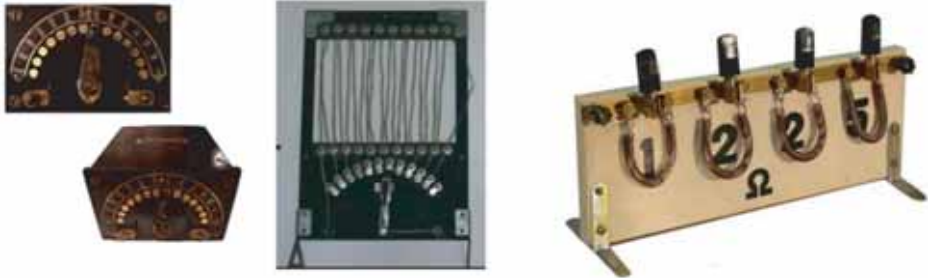


Рис. 28.6. Різні типи реостатів

Використовують реостати й іншої конструкції. Якщо опір в електричному колі не потрібно змінювати плавно, як повзунковим реостатом, то може застосовуватися важільний реостат. Його опір і, відповідно, опір електричного кола, змінюється стрибкоподібно. Якщо сила струму в колі невелика, використовують реостати у вигляді набору резисторів — магазини резисторів. Виймаючи або вставляючи мідні стрижні — штепселі, збільшують чи зменшують опір цього реостата (рис. 28.6).

### Головне в цьому параграфі

Електричний опір прямо пропорційний довжині провідника, обернено пропорційний площі його поперечного перерізу й залежить від речовини провідника.

Формулу для розрахунку опору провідника записують у вигляді

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}.$$

Питомий опір характеризує не конкретний провідник, а матеріал, з якого його виготовлено. За одиницю питомого опору в СІ беруть питомий опір провідника завдовжки 1 м та площею поперечного перерізу 1 м<sup>2</sup>, що має опір 1 Ом:

$$1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Для регулювання сили струму в колі використовують спеціальні прилади — реостати. Вмикаючи реостат в електричне коло, його повзунок переміщують у середнє положення відносно активної частини, щоб не вийшли з ладу інші елементи кола.

### Запитання для самоперевірки

1. Від яких характеристик залежить опір провідника?
2. За якою формулою розраховують опір металевого провідника?
3. Що називають питомим опором?
4. В яких одиницях вимірюють питомий опір провідників?
5. Чому під час монтажу електромережі будинку використовують переважно мідні багатожильні дроти?

6. Які прилади називають резисторами? Як резистори позначають на електричних схемах?
7. Який прилад називають реостатом? Поясніть принцип його дії.
8. Як реостати позначають на електричних схемах?

### Домашній експеримент

Вдома уважно опрацюйте навчальний матеріал § 25—28 підручника. Візьміть шматок мідного ізольованого дроту та виміряйте його довжину за допомогою мірної стрічки. Змотайте дріт. Поміркуйте, яким чином можна визначити довжину ізольованого мідного дроту в мотку, не розмотуючи його. Вкажіть прилади, потрібні для цього експерименту, та накресліть схему електричного кола. У класі під керівництвом учителя перевірте запропонований спосіб та порівняйте отримане значення довжини дроту з виміряним вдома.

### Вправа до § 28

- 1(п). Один із двох провідників з однаковою площею поперечного перерізу, виготовлених з одного матеріалу, вдвічі коротший за другий. Який з провідників має більший електричний опір і в скільки разів?
- 2(с). Дві ділянки мідного дроту мають однакову довжину, але різну площу перерізу: 1,6 і 0,8 мм<sup>2</sup>. Яка ділянка має менший опір і в скільки разів?
- 3(с). Обчисліть опір залізного дроту завдовжки 1 км, якщо його поперечний переріз 10 мм<sup>2</sup>.
- 4(д). Один із двох провідників у 8 разів довший за інший, але другий має вдвічі більшу площу поперечного перерізу. Порівняйте, у скільки разів відрізняються опори провідників.
- 5(д). Опір мідного дроту завдовжки 90 м дорівнює 2 Ом. Визначте площу поперечного перерізу дроту.
- 6(д). Визначте, скільки метрів нікелінового дроту перерізом 0,1 мм<sup>2</sup> потрібно для виготовлення реостата з опором 180 Ом.
- 7(в). Визначте масу мідного дроту, довжина якого 2 км і опір 8,5 Ом. Густина міді 8,9 г/см<sup>3</sup>.

### Це цікаво

Ще у XIX ст. були винайдені матеріали з великим питомим опором. Вперше матеріал, опір якого не залежить від температури, отримав американський винахідник Едвард Вестон у 1888 р. та використав його виготовлення для котушок електровимірювальних приладів. Учений назвав його «Сплав № 2», але німецькі виробники, у яких він розмістив замовлення на виробництво дроту з нового матеріалу, дали йому найменування «Константан», під яким він і здобув популярність. Цей ма-

теріал використовується для виготовлення термопар, активного елемента тензодатчика, реостатів і електронагрівальних елементів з робочою температурою до 400—500 °С, вимірювальних приладів високого класу точності.

## ВЧИМОСЯ РОЗВ'ЯЗУВАТИ ФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ З ТЕМИ «СИЛА СТРУМУ. ЕЛЕКТРИЧНА НАПРУГА ТА ОПІР»

Розв'язуючи задачі на закони постійного струму, потрібно пригадати основні фізичні залежності між електричними характеристиками, закони, формули (сила струму, напруга, опір, закон Ома для ділянки кола, залежність опору металів від температури, закономірності, що виконуються при послідовному та паралельному з'єднанні провідників).

Не забувайте, що деякі дані, а саме питомий опір, густина тощо, містяться в таблицях фізичних величин, наведених у підручнику або інших джерелах.

Для прикладу розглянемо розв'язування декількох задач.

### Приклад розв'язування якісної фізичної задачі

1. Як будуть змінюватися покази приладів, зображених на рисунку (а, б), якщо повзунок реостата переміщувати ліворуч?

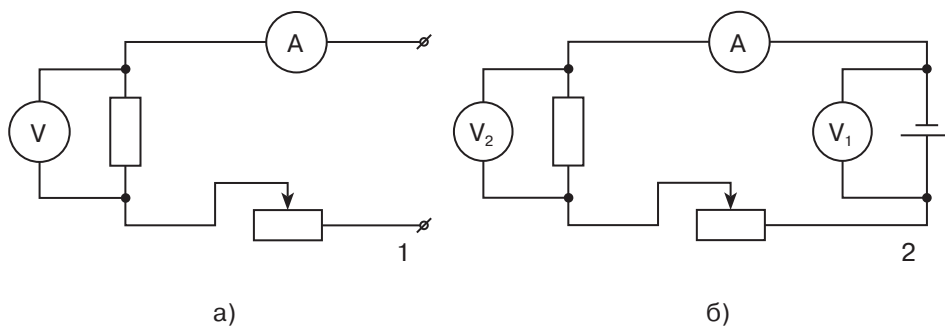


Рисунок до задачі 1

Насамперед важливо звернути увагу на те, що напруга на клеммах (рис. а) є постійною. Якщо на схемі зображено джерело струму (наприклад, батарея, рис. б), то ця умова не виконується!

### Будьте уважні!

При переміщенні повзунка реостата ліворуч, його опір збільшується — струм проходить по правій частині реостата, яка стала довшою. Отже, опір усього кола теж збільшується, тому що реостат і резистор з'єднані послідовно. Ця особливість є спільною для обох електричних кіл (рис. а, б).

Розглянемо особливості першого електричного кола (рис. а). Відповідно до закону Ома для ділянки кола при збільшенні опору сила струму зменшується: амперметр покаже зменшення струму.

Вольтметр показує напругу на резисторі. Оскільки елементи електричного кола з'єднані послідовно, сила струму в усьому колі однакова. При збільшенні опору реостата через резистор потече менший струм. Отже, і напруга на ньому зменшиться:  $U = IR$ . Вольтметр покаже зменшення напруги.

Розглянемо особливості другого електричного кола (рис. б). У коло увімкнено джерело струму, тому напруга на різних ділянках буде неоднаковою.

При збільшенні опору реостату через резистор буде проходити менший струм, а його опір залишиться незмінним. За законом Ома для ділянки кола  $U = IR$ , тому покази вольтметра  $V_2$  зменшуватимуться, як і в першому електричному колі.

Покази вольтметра  $V_1$  будуть збільшуватися, тому що опір резистора й реостата, які з'єднані послідовно, зростає.

### Приклади розв'язування розрахункових фізичних задач

**Задача 1.** Яка кількість електронів проходить крізь поперечний переріз провідника за 5 с, коли сила струму в провіднику 12 А?

Дано:

$$I = 12 \text{ А}$$

$$t = 5 \text{ с}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$N = ?$$

Розв'язок

Для розв'язування задачі скористаємося формулою, що пов'язує кількість заряджених частинок з електричним зарядом, який проходить по провіднику  $q = eN$ , а також

формулою визначення сили струму в колі  $I = \frac{q}{t}$ .

Отже

$$I = \frac{eN}{t} \Rightarrow N = \frac{It}{e},$$

$$\text{Підставляємо числа } N = \frac{12 \text{ А} \cdot 5 \text{ с}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 37,5 \cdot 10^{19}.$$

**Відповідь:**  $N = 3,75 \cdot 10^{20}$ .

**Задача 2.** Визначити масу нікелінового провідника перерізом  $1 \text{ мм}^2$ , необхідну для виготовлення реостата, в якому при напрузі 380 В проходить сила струму 25 А. Густина нікеліну  $8,8 \text{ г/см}^3$ .

Дано:

$$I = 25 \text{ А}$$

$$S = 1 \text{ мм}^2$$

$$U = 380 \text{ В}$$

$$\rho = 8,8 \text{ г/см}^3$$

$$m \text{ — ?}$$

Розв'язок

Масу нікелінового провідника можна виразити з формули для визначення густини речовини

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V.$$

Оскільки дріт можна вважати циліндром, що має велику довжину й малу площу поперечного перерізу, то об'єм провідника дорівнює об'єму циліндра, тобто  $V = l \cdot S$ .

Довжину дроту розрахуємо з формули опору провідника:

$$R = \rho_e \frac{l}{S} \Rightarrow l = \frac{R \cdot S}{\rho_e}.$$

За законом Ома опір дорівнює:  $I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I}$ .

Питомий опір нікеліну за таблицею:  $\rho = 0,4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$   
Отже, довжину провідника можна знайти за формулою:

$$l = \frac{U \cdot S}{\rho_e \cdot I}.$$

Підставляємо значення:

$$l = \frac{380 \text{ В} \cdot 1 \text{ мм}^2}{0,4 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \cdot 25 \text{ А}} = 38 \text{ м}.$$

Для зручності розрахунків об'єм вимірюємо в сантиметрах кубічних, тому  $38 \text{ м} = 3800 \text{ см}$ , а площа перерізу  $0,01 \text{ см}^2$ :

$$m = \rho S l,$$

$$m = 8,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 0,01 \text{ см}^2 \cdot 3800 \text{ см} = 334 \text{ г}.$$

Відповідь:  $m = 0,334 \text{ кг}$ .

## ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ

### З ТЕМИ «СИЛА СТРУМУ. ЕЛЕКТРИЧНА НАПРУГА ТА ОПІР»

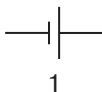
1(п). Оберіть умовне позначення резистора на електричних схемах:

А) 1;

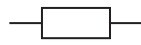
Б) 2;

В) 3;

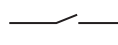
Г) 4.



1



2



3



4

2(п). Оберіть формулу, яка виражає математичний запис закону Ома для ділянки електричного кола:

А)  $I = \frac{q}{t}$ ;

Б)  $U = \frac{A}{q}$ ;

В)  $I = \frac{U}{R}$ ;

Г)  $R = \frac{\rho l}{S}$ .



3(п). Вкажіть, яка з електричних характеристик зміниться та як саме, якщо зменшити довжину провідника, увімкненого в електричне коло при постійній напрузі:

- А) сила струму в колі зменшиться;
- Б) його опір збільшиться;
- В) сила струму в колі збільшиться;
- Г) напруга на ділянці кола збільшиться.

4(п). Оберіть прилад, призначений для визначення сили струму в електричному колі:

- А) амперметр;
- Б) вольтметр;
- В) електроскоп;
- Г) омметр.

5(п). Оберіть на рис. 1 графік залежності сили струму в металевому провіднику від напруги, який відповідає провіднику з найменшим опором:

- А) 1;
- Б) 2;
- В) 3;
- Г) 4.

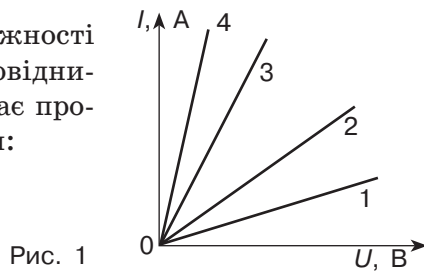


Рис. 1

6(п). Оберіть на рис. 2 електричну схему електричного кола, у якому при замиканні ключа 2 дзвінок не працює, а лампочка світиться:

- А) 1 і 2;
- Б) 3;
- В) 2;
- Г) 1, 2 і 4.

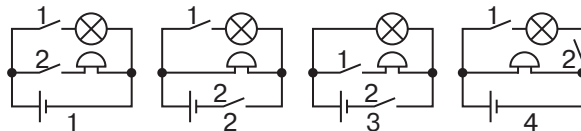


Рис. 2

7(с). У таблиці наведено результати вимірювання залежності сили струму від напруги для резисторів 1 і 2.

$U, \text{В}$	0	1	2	3	4
$I, \text{А}$ (резистор 1)	0	2	4	6	8
$I, \text{А}$ (резистор 2)	0	3	5	7	9

Виберіть правильне твердження:

- А) закон Ома експериментально підтверджується тільки для резистора 1;
- Б) закон Ома експериментально підтверджується тільки для резистора 2;
- В) закон Ома експериментально підтверджується для резисторів 1 і 2;
- Г) закон Ома експериментально не підтверджується для резисторів 1 і 2.

8(с). Вкажіть напругу на реостаті, якщо під час проходження по ньому електричного заряду 12 Кл електричне поле виконало роботу 720 Дж:

А) 20 В;    Б) 60 В;    В) 0,2 В;    Г) 8,64 кВ.

9(с). Виберіть значення опору мідного дроту завдовжки 1 км, якщо його поперечний переріз  $10 \text{ мм}^2$ :

А) 17 Ом;    Б) 1,7 Ом;    В) 170 Ом;    Г) 0,017 Ом.

10(д). Установіть відповідність між назвою джерела струму та його типом.

А) електрофорна машина	1) світлове джерело струму
Б) акумулятор	2) теплове джерело струму
В) термопара	3) механічне джерело струму
Г) сонячний елемент	4) хімічне джерело струму
	5) електромагнітне джерело струму

11(д). Установіть відповідність між силою струму та зарядом, що пройшов через провідник за вказаний час.

А) 3 А	1) 5 Кл, 10 с
Б) 5 А	2) 15 Кл, 0,2 с
В) 75 А	3) 200 Кл, 20 с
Г) 0,5 А	4) 0,5 Кл, 0,1 с
	5) 24 Кл, 8 с

12(д). Чотири провідники, виготовлені з однієї речовини, мають однако-ву довжину. Skorиставшись гра-фіками залежності сили струму від напруги (рис. 3), порівняйте площі поперечного перерізу про-відників і розташуйте їх у по-рядку збільшення.

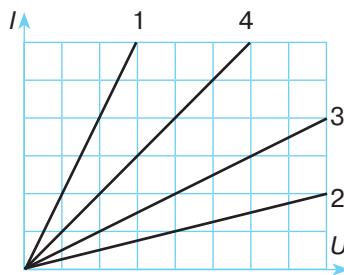


Рис. 3

13(д). Реостат виготовлено з нікелінового дроту завдовжки 2 м і площею поперечного перерізу  $0,3 \text{ мм}^2$ . Визначте напругу на реостаті, якщо сила струму в ньому 0,5 А. Питомий опір нікеліну  $0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

14(в). У спіралі електронагрівача, виготовленого з нікелінового дроту площею поперечного перерізу  $0,1 \text{ мм}^2$ , при напрузі 220 В сила струму 4 А. Визначте довжину дроту.

15(в). Скільки електронів проходить через залізний дріт протягом 10 с при напрузі на ньому 10 В. Довжина дроту 150 см, площа поперечного перерізу  $10 \text{ мм}^2$ .

## § 29. Послідовне з'єднання провідників

- ▶ *Послідовне з'єднання елементів електричного кола*
- ▶ *Сила струму при послідовному з'єднанні провідників*
- ▶ *Напруга при послідовному з'єднанні провідників*
- ▶ *Опір при послідовному з'єднанні провідників*

**ПОСЛІДОВНЕ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА.** Для того щоб скласти електричне коло, потрібно певним чином з'єднати декілька елементів: джерело струму, споживач електричної енергії, вимірювальний прилад тощо (рис. 29.1).



Рис. 29.1. Послідовне з'єднання елементів електричного кола

**З'єднання елементів електричного кола, за якого провідники з'єднуються по черзі один за одним, причому кінець одного елемента з'єднується з початком тільки одного наступного, називається послідовним.**

Наприклад, послідовно з'єднують резистори, елементи автомобільної акумуляторної батареї (рис. 29.2).



Рис. 29.2.

Приклади послідовного з'єднання елементів:

- а) послідовне з'єднання резисторів;
- б) послідовне з'єднання елементів автомобільної акумуляторної батареї

**СИЛА СТРУМУ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ З'ЄДНАННІ ПРОВІДНИКІВ.** Розглянемо електричне коло з послідовно з'єднаних джерела струму, двох електроламп, амперметра та вимикача (рис. 29.3). Замкнемо електричне коло та виміряємо силу струму  $I_1$  в ньому.



Рис. 29.3. Послідовно увімкнений амперметр вимірює силу струму в електричному колі

Розімкнемо електричне коло та під'єднаємо амперметр між електролампами. Виміряємо силу струму  $I_2$ . Проведемо аналогічні вимірювання сили струму  $I_3$  між джерелом струму та електролампами. Порівнявши отримані значення, побачимо, що сила струму в будь-яких ділянках електричного кола однакова.

*При послідовному з'єднанні елементів сила струму в усіх ділянках електричного кола однакова:  $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$ .*

### НАПРУГА ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ З'ЄДНАННІ ПРОВІДНИКІВ.

Пригадайте електричну гірлянду, яку вам доводилося прилаштувати на новорічну ялинку. Зазвичай вона складається з багатьох, послідовно з'єднаних низьковольтних електроламп, світлодіодів, розрахованих, наприклад, на декілька вольт, проте ви знаєте, що гірлянда вмикається в мережу напругою 220 В. Чому ж низьковольтні елементи світяться й не перегорають? Виявляється, що загальна напруга, яка прикладається до кінців гірлянди, розподіляється між окремими електролампами. Наприклад, щоб електролампи гірлянди, розраховані на напругу 3,5 В, не перегоріли, потрібно послідовно з'єднати  $\frac{220 \text{ В}}{3,5 \text{ В}} \approx 63$  лампи.

Розглянемо електричне коло з послідовно з'єднаних джерела струму, двох електроламп, амперметра та вимикача. Замкнемо електричне коло. Амперметр покаже силу струму в ньому. По черзі виміряємо вольтметром, під'єднуючи його паралельно до затискувачів, напругу на полюсах джерела струму  $U$  та на кожній з електроламп  $U_1$ ,  $U_2$  (рис. 29.4). Порівняємо виміряні значення напруги.



Рис. 29.4. Паралельно підключений вольтметр вимірює напругу на полюсах джерела струму

У результаті напруга на полюсах джерела струму дорівнюватиме сумі напруг на електролампах:

$$U = U_1 + U_2.$$

Таким чином, повна напруга в електричному колі (або напруга на полюсах джерела струму) при послідовному з'єднанні дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола:  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ .

**ОПІР ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ З'ЄДНАННІ ПРОВІДНИКІВ.** Розглянемо електричне коло з  $n$  послідовно з'єднаних елементів. Застосуємо закон Ома для всього кола та окремих його ділянок. Отримаємо:

$$U = I \cdot R,$$

$$U_1 = I \cdot R_1,$$

$$U_2 = I \cdot R_2,$$

$$U_n = I \cdot R_n,$$

де  $I$  — сила струму в колі;  $R, R_1, R_2, R_n$  — загальний опір кола та його ділянок. Оскільки загальна напруга на кінцях послідовного з'єднання дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола, тобто

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

$$\text{то } I \cdot R = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + \dots + I \cdot R_n.$$

Звідси:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

Загальний опір при послідовному з'єднанні дорівнює сумі опорів окремих провідників або ділянок електричного кола:

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

Цю властивість послідовного з'єднання елементів електричного кола враховують при виготовленні амперметрів. Оскільки амперметр вмикається в коло послідовно, то його опір має бути дуже малим (десяті або соті частки ома), щоб він суттєво не впливав на загальний опір і, відповідно, силу струму в колі.

Розглянемо приклад задачі та спробуємо розібратися, як формули для розрахунку електричних характеристик кіл із послідовним з'єднанням використовують для розв'язування фізичних задач.

**Задача.** Три резистори з опороми 2, 3, 5 Ом з'єднані послідовно. Амперметр, увімкнений у коло, показує струм 1 А. Визначити опір кола, напругу на кожному резисторі та повну напругу на кінцях ділянки кола.

Дано:

$$R_1 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 3 \text{ Ом}$$

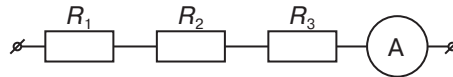
$$R_3 = 5 \text{ Ом}$$

$$I = 1 \text{ А}$$

$$R - ?$$

Розв'язок

Схема ділянки кола, яка розглядається в задачі, має вигляд:



Резистори з'єднані послідовно, тому загальний опір кола:  $R = R_1 + R_2 + R_3$ ;

$$R = 2 \text{ Ом} + 3 \text{ Ом} + 5 \text{ Ом} = 10 \text{ Ом}.$$

Сила струму при послідовному з'єднанні однакова в усіх резисторах:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I = 1 \text{ А}.$$

Напругу на кожному з резисторів визначимо за законом Ома для ділянки кола:

$$U_1 = I \cdot R_1, U_1 = 1 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом} = 2 \text{ В};$$

$$U_2 = I \cdot R_2, U_2 = 1 \text{ А} \cdot 3 \text{ Ом} = 3 \text{ В};$$

$$U_3 = I \cdot R_3, U_3 = 1 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом} = 5 \text{ В}.$$

Повна напруга в колі при послідовному з'єднанні:

$$U = U_1 + U_2 + U_3, \text{ або } U = I \cdot R,$$

$$U = 2 \text{ В} + 3 \text{ В} + 5 \text{ В} = 10 \text{ В},$$

$$\text{або } U = 1 \text{ А} \cdot 10 \text{ Ом} = 10 \text{ В}.$$

Відповідь:  $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $U_1 = 2 \text{ В}$ ,  $U_2 = 3 \text{ В}$ ,  $U_3 = 5 \text{ В}$ ,  $U = 10 \text{ В}$ .

### Головне в цьому параграфі

З'єднання елементів електричного кола, за якого провідники з'єднуються по черзі один за одним, причому кінець одного елемента з'єднується з початком тільки одного наступного, називається послідовним.

При послідовному з'єднанні елементів сила струму в усіх частинах електричного кола однакова:  $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$ .

Повна напруга в електричному колі (або напруга на полюсах джерела струму) при послідовному з'єднанні дорівнює сумі напруг на окремих ділянках кола:  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ .

Загальний опір при послідовному з'єднанні дорівнює сумі опорів окремих провідників або ділянок електричного кола:  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Яке з'єднання елементів електричного кола називають послідовним? Як його зображають на електричних схемах?
2. Як виміряти силу струму в електричному колі при послідовному з'єднанні його елементів? Чи залежить виміряне значення від точки увімкнення амперметра в електричне коло?
3. Як визначити повну напругу в електричному колі, якщо є виміряні значення напруг кожної з його ділянок, з'єднані послідовно?



4. Як визначити опір ділянки кола, що складається з декількох послідовно з'єднаних резисторів із відомими опороми?
5. Чому внутрішній опір амперметра має бути дуже малим?

### Вправа до § 29

- 1(п). Накресліть у зошиті схему електричного кола, зображеного на рис. 29.4. Які елементи електричного кола з'єднані послідовно?
- 2(с). Послідовно з вольтметром, опір якого 300 Ом, увімкнено додатковий опір 2,7 кОм. Визначте загальний опір цих елементів електричного кола.
- 3(с). Для освітлення трамвайного вагона використовуються електричні лампи, розраховані на напругу 120 В, хоча напруга в контактній мережі трамвая 600 В. Скільки ламп та яким чином мають бути увімкнені в електричну систему освітлення трамвайного вагона?
- 4(д). Порівняйте температуру ниток розжарювання двох однакових електричних лампочок  $L_1$  і  $L_2$ , зображених на електричній схемі. Як зміниться розжарювання нитки кожної з лампочок, якщо повзунок  $D$  реостата  $R$  перемістити: а) праворуч; б) ліворуч? Нагадаємо, що розжарення нитки лампочки залежить від сили струму в ній: чим більша сила струму, тим більше розжарення і навпаки.

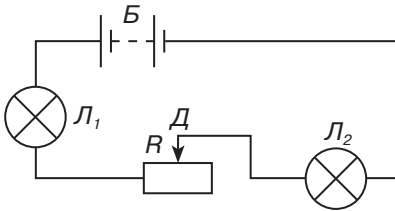


Рисунок до завдання 4

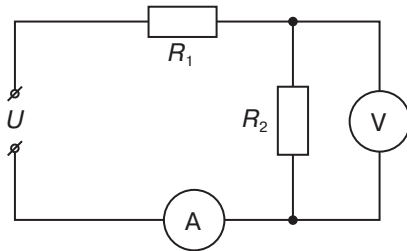


Рисунок до завдання 5

- 5(д). Опір резисторів, увімкнених в електричне коло, становить  $R_1 = 6$  Ом,  $R_2 = 12$  Ом. Покази вольтметра 6 В. Визначте напругу на резисторі опором  $R_1$  та напругу  $U$  на ділянці кола.
- 6(в). У коло увімкнено послідовно три провідники опором  $R_1 = 50$  Ом,  $R_2 = 60$  Ом,  $R_3 = 120$  Ом (див. рисунок до задачі). Яку силу струму показує амперметр і яка напруга між точками А і В, якщо покази вольтметра 12 В?

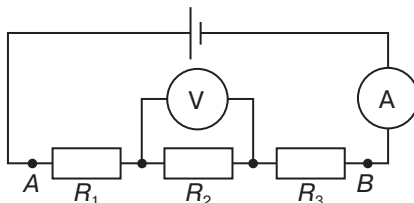


Рисунок до задачі 6

## § 30. Паралельне з'єднання провідників

- ▶ Паралельне з'єднання елементів електричного кола
- ▶ Напряга при паралельному з'єднанні провідників
- ▶ Сила струму при паралельному з'єднанні провідників
- ▶ Опір при паралельному з'єднанні провідників

**ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА.** На практиці широко використовують паралельні з'єднання провідників (рис. 30.1).

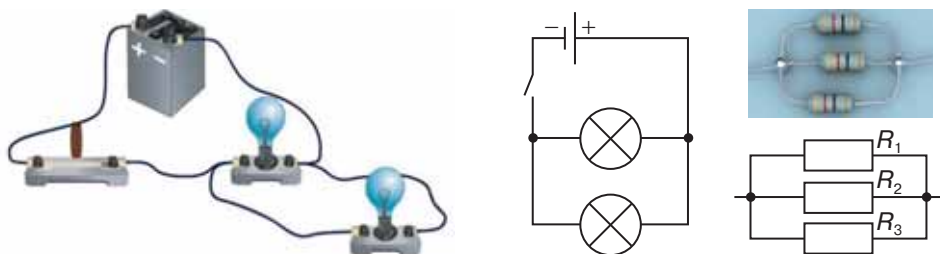


Рис. 30.1. Паралельне з'єднання елементів електричного кола

**Паралельним називають таке з'єднання елементів електричного кола, за якого одні кінці всіх провідників приєднують до однієї точки електричного кола, а інші кінці — до другої.**

При паралельному з'єднанні струм у точках з'єднання розгалужується. Всі побутові споживачі електричного струму з'єднуються паралельно (рис. 30.2). Паралельно полюсам джерела струму або затискувачам споживача електричної енергії вмикається в електричне коло вольтметр. Електричні освітлювальні лампи, телевізор, холодильник, мікрохвильова піч теж вмикаються паралельно в електромережу квартири.

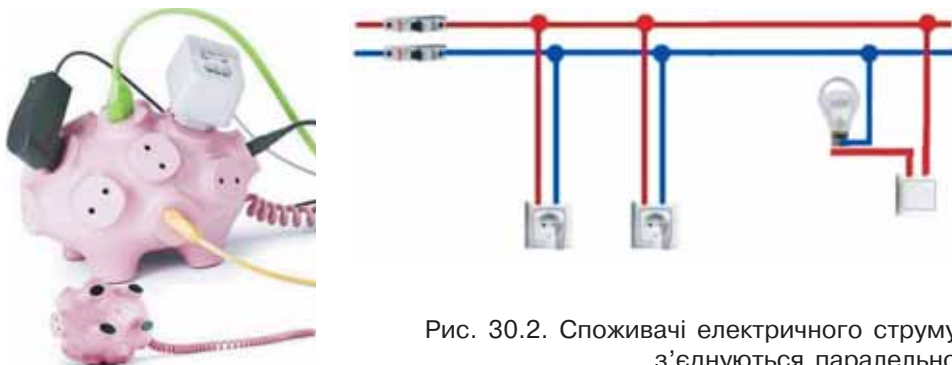


Рис. 30.2. Споживачі електричного струму з'єднуються паралельно

### НАПРУГА ПРИ ПАРАЛЕЛЬНОМУ З'ЄДНАННІ ПРОВІДНИКІВ.

Розглянемо електричне коло, що складається з двох паралельно з'єднаних низьковольтних електроламп, джерела струму, вольтметра та вимикачів (рис. 30.3).

Оскільки елементи кола з'єднані паралельно, то при розімкнених вимикачах вольтметр показує напругу на полюсах джерела струму  $U = 6$  В. Замкнемо перший вимикач. Одна електролампа почне світитися, вольтметр показує напругу на ній  $U_1 = 6$  В. Вимкнемо перший вимикач і замкнемо другий. Засвітиться друга електролампа, вольтметр показує таку саму напругу на електролампі  $U_2 = 6$  В. Замкнемо обидва вимикачі водночас. Обидві електролампи світяться однаково яскраво, а вольтметр показує напругу на ділянці кола (полюсах джерела струму)  $U = 6$  В. Таким чином, напруга на паралельно з'єднаних електролампах однакова й дорівнює напрузі на полюсах джерела струму (на кінцях ділянки):  $U_1 = U_2 = U \dots$

*При паралельному з'єднанні напруга на провідниках та кінцях ділянки однакова:  $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ .*

Завдяки такій властивості паралельного з'єднання його широко використовують у техніці та побуті. Так, усі побутові електроприлади розраховані на однакову робочу напругу 220 В, і їх умикають в електромережу паралельно. Оскільки при паралельному ввімкненні споживачі можна вмикати і вимикати незалежно один від одного, то вихід із ладу одного приладу не впливає на роботу інших.

### СИЛА СТРУМУ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНОМУ З'ЄДНАННІ ПРОВІДНИКІВ.

Розглянемо електричне коло, що складається з двох низьковольтних електроламп, увімкнених паралельно до джерела струму, амперметрів, послідовно ввімкнених з електролампами та джерелом струму, і вимикача (рис. 30.4).

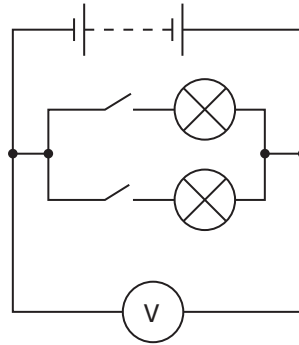
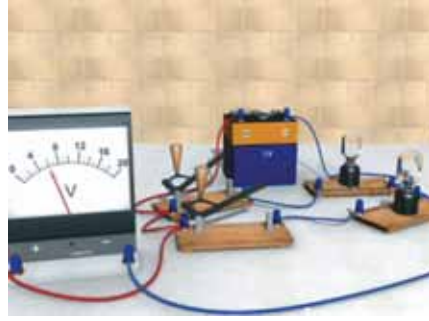


Рис. 30.3. При паралельному з'єднанні провідників напруга на всіх ділянках електричного кола однакова

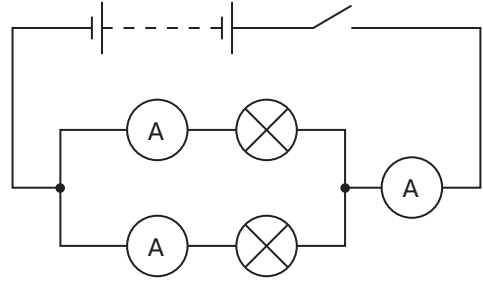


Рис. 30.4. При паралельному з'єднанні провідників струм у точках з'єднання розгалужується

Замкнемо електричне коло та виміряємо силу струму  $I$  до розгалуження (повну силу струму в колі), силу струму  $I_2$  у першій електролампі, силу струму  $I_3$  у другій електролампі. Порівняємо виміряні значення сили струму. Отримаємо, що сила струму до розгалуження дорівнює сумі сил струмів у електролампах:

$$I = I_1 + I_2.$$

**Сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів у окремих паралельно з'єднаних елементах електричного кола:**

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

**ОПІР ПРИ ПАРАЛЕЛЬНОМУ З'ЄДНАННІ ПРОВІДНИКІВ.** Розглянемо електричне коло з паралельно з'єднаних елементів. Сила струму в такому колі  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ . За законом Ома  $I = \frac{U}{R}$ , а  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ,  $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ,  $I_n = \frac{U}{R_n}$ . Тоді  $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}$ . Скоротивши на  $U$ , отримаємо:

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

*При паралельному з'єднанні елементів електричного кола величина, обернена до повного опору з'єднання, дорівнює сумі величин, обернених до опорів розгалужень:*  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ .

Оскільки вольтметр для вимірювання електричної напруги під'єднується паралельно ділянці кола, його опір роблять максимальним. Формули для визначення сили струму й опору при паралельному з'єднанні провідників використовують для розв'язування фізичних задач. Розглянемо приклад.

**Задача.** Два резистори з опорами 2 та 4 Ом з'єднані паралельно. До кінців ділянки прикладена напруга 8 В. Визначити опір кола, силу струму в кожному резисторі та повну силу струму в ділянці кола.

Дано:

$$R_1 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 4 \text{ Ом}$$

$$U = 8 \text{ В.}$$

$$R \text{ — ?}$$

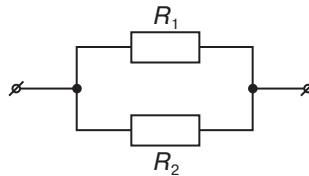
$$I_1 \text{ — ?}$$

$$I_2 \text{ — ?}$$

$$I \text{ — ?}$$

Розв'язок

Схема ділянки кола, яка розглядається в задачі, має вигляд:



Резистори з'єднані паралельно, тому напруга на кінцях ділянки дорівнює напрузі на кожному резисторі:  $U = U_1 = U_2 = 8 \text{ В}$ . Загальний опір при паралельному з'єднанні визначається із залежності:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \text{ тобто } R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad R = \frac{2 \text{ Ом} \cdot 4 \text{ Ом}}{2 \text{ Ом} + 4 \text{ Ом}} = \frac{8 \text{ Ом}^2}{6 \text{ Ом}} \approx 1,3 \text{ Ом}.$$

Силу струму в кожному з резисторів знайдемо за законом Ома для ділянки кола:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_1 = \frac{8 \text{ В}}{2 \text{ Ом}} = 4 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_2 = \frac{8 \text{ В}}{4 \text{ Ом}} = 2 \text{ А}.$$

Повна сила струму в ділянці кола при паралельному з'єднанні:

$$I = I_1 + I_2, \text{ або } I = \frac{U}{R},$$

$$I = 4 \text{ А} + 2 \text{ А} = 6 \text{ А}, \text{ або } I = \frac{8 \text{ В}}{1,3 \text{ Ом}} = 6 \text{ А}.$$

Відповідь:  $R = 1,3 \text{ Ом}$ ,  $I_1 = 4 \text{ А}$ ,  $I_2 = 2 \text{ А}$ ,  $I = 6 \text{ А}$ .

### Головне в цьому параграфі

Паралельним називають таке з'єднання елементів електричного кола, за якого одні кінці всіх провідників приєднують до однієї точки електричного кола, а інші кінці — до другої.

При паралельному з'єднанні напруга на провідниках та кінцях ділянки однакова:

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

Сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів у окремих паралельно з'єднаних елементах електричного кола:

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

При паралельному з'єднанні елементів електричного кола величина, обернена до повного опору з'єднання, дорівнює сумі величин, обернених до опорів розгалужень:

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

### Запитання для самоперевірки

1. Яке з'єднання елементів електричного кола називають паралельним?
2. Яким чином вимірюють напругу на різних ділянках електричного кола, що з'єднані паралельно?
3. Як співвідноситься сила струму в нерозгалуженій частині електричного кола зі струмами в його елементах, з'єднаних паралельно?
4. Як розраховують загальний опір розгалуження електричного кола?
5. Чому в житлових приміщеннях споживачі електричної енергії з'єднуються паралельно?

### Вправа до § 30

- 1(п). Чому допоміжні елементи електричного кола (клеми, затискачі і т. ін.) виготовляють із міді й вони мають значний поперечний переріз та малу довжину?
- 2(п). Дві дротини — залізна та мідна, однакової довжини й однакового перерізу, увімкнуті в електричне коло паралельно. У якому з дротів сила струму буде більшою?
- 3(с). Неізолюваний дріт має електричний опір 1 Ом. Визначте опір цього самого дроту, якщо його посередині розрізати й скрутити отримані половинки разом по всій довжині.
- 4(с). Ізолюваний дріт опором 10 Ом розрізали посередині й скрутили отримані половинки разом по всій довжині. Визначте опір такого провідника.
- 5(д). В електричне коло ввімкнуто паралельно два провідники. Опір одного 150 Ом, другого — 30 Ом. Визначте, у якому провіднику сила струму більша й у скільки разів.
- 6(в). Амперметр, увімкнений в електричне коло, показує силу струму 1,6 А при напрузі 120 В, опір  $R_1 = 100$  Ом. Визначте опір  $R_2$  і силу струму в кожній ділянці кола.
- 7(в). Загальний опір двох провідників при послідовному з'єднанні становить 50 Ом, а при паралельному — 12 Ом. Обчисліть опір кожного провідника.

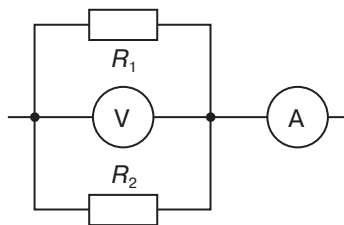


Рисунок до завдання 6



## § 31. Робота та потужність електричного струму

- ▶ *Робота електричного струму*
- ▶ *Потужність електричного струму*
- ▶ *Одиниці роботи, що використовуються на практиці*

**РОБОТА ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.** Ви вже знаєте, що електрична напруга на кінцях провідника чисельно дорівнює роботі, здійснюваній електричним полем при переміщенні по цьому провіднику електричного заряду в 1 Кл, тобто

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

Отже, роботу електричного поля  $A$  з переміщення електричного заряду  $q$  можна визначити як добуток перенесеного електричного заряду через поперечний переріз провідника та напруги  $U$  на кінцях провідника:

$$A = qU.$$

Скориставшись співвідношенням між силою струму  $I$ , електричним зарядом, який пройшов через поперечний переріз провідника  $q$ , і часом його проходження  $t$  (нагадаємо,  $q = It$ ), можна записати вираз для обчислення роботи електричного поля:

$$A = IUt.$$

**Робота електричного струму на ділянці кола дорівнює добутку сили струму, напруги на цій ділянці та часу, протягом якого виконувалася ця робота.**

У СІ одиницею роботи струму є джоуль (Дж):

$$\begin{aligned} [A] &= \text{Дж}; \\ 1 \text{ Дж} &= 1 \text{ В} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

Скориставшись законом Ома для ділянки кола ( $I = \frac{U}{R}$ ) замінимо силу струму у виразі для обчислення роботи, тоді він матиме вигляд:

$$A = \frac{U^2}{R}t.$$

Якщо із закону Ома виразимо напругу через силу струму ( $U = IR$ ), одержимо ще один вираз для обчислення роботи:

$$A = I^2Rt.$$

Зауважимо, що формула  $A = IUt$  є універсальною, тоді як  $A = \frac{U^2}{R}t$  та  $A = I^2Rt$  справедливі тільки у випадках, коли робота

струму витрачається лише на зміну внутрішньої енергії провідника, тобто його нагрівання. Крім того, формулу  $A = \frac{U^2}{R}t$  зручно використовувати при розрахунках за паралельного з'єднання провідників, оскільки напруга на провідниках лишається однаковою, а формулу  $A = I^2Rt$  — у разі послідовного з'єднання провідників, оскільки при цьому сила струму є однаковою.

Для того щоб визначити роботу електричного струму, необхідно визначити напругу, силу струму та час виконання роботи.

**ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.** Важливою характеристикою кожного електричного приладу є енергія, яка споживається ним за одиницю часу. Цю характеристику називають потужністю струму. Будь-який електричний прилад (лампа, електричний чайник, електричний двигун) розрахований на споживання певної потужності.

**Потужність електричного струму — фізична величина, що дорівнює роботі електричного поля з напрямленого переміщення електричних зарядів у провіднику в одиницю часу.**

Щоб знайти середню потужність електричного струму, потрібно роботу електричного струму  $A$  поділити на час її виконання  $t$ :

$$P = \frac{A}{t}.$$

Оскільки робота електричного струму  $A = IUt$ , то

$$P = \frac{IUt}{t} = IU,$$

тобто *потужність електричного струму дорівнює добутку напруги на кінцях провідника та сили струму в ньому:*

$$P = IU.$$

Ця формула є універсальною для обчислення потужності електричного струму.

Вам відомо, що в СІ одиницею потужності є ват (Вт):

$$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

З урахуванням формул, одержаних нами для обчислення роботи електричного струму, потужність струму можна також визначити за однією з двох формул:

$$P = I^2R,$$

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Ці залежності справедливі лише у випадку, коли робота струму повністю витрачається на нагрівання провідника.

Визначити потужність електричного струму можна, перемноживши покази амперметра та вольтметра, увімкнених в електричне коло. Проте для вимірювання потужності використовують прилади, що дають можливість безпосередньо вимірювати потужність електричного струму. Їх називають *ватметри*.

Зверніть увагу на те, що вимірюючи потужність струму визначають фактичну потужність споживача. Потужність, зазначену в паспорті електричного приладу або безпосередньо на приладі, називають номінальною потужністю. Крім номінальної потужності на приладах можуть вказувати номінальні значення напруги, на яку розрахований цей прилад. Проте напруга в мережі може відрізнятись від номінального значення, тоді, відповідно, зміняться й сила струму та його потужність. Отже, значення фактичної та номінальної потужностей споживача можуть відрізнятись.

**ОДИНИЦІ РОБОТИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ НА ПРАКТИЦІ.** У паспортах приймачів електричного струму зазвичай вказують потужність струму в них. Знаючи потужність електричного струму та час виконання роботи доволі легко визначити роботу, що виконується струмом за певний проміжок часу, скориставшись формулою:  $A = Pt$ .

Оскільки під час споживання електроенергії електричний струм виконує роботу впродовж значного часу і може становити декілька годин і навіть днів, вимірювати роботу електричного струму в джоулях доволі незручно. На практиці для вимірювання роботи струму широко використовується позасистемна одиниця — кіловат-година (кВт · год):

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

### Головне в цьому параграфі

Робота електричного струму на ділянці кола дорівнює добутку сили струму, напруги на цій ділянці та часу, протягом якого виконувалася ця робота:

$$A = IUt.$$

У СІ одиницею роботи струму є джоуль (Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}.$$

Потужність електричного струму — фізична величина, що дорівнює роботі електричного поля в одиницю часу з напрямленого переміщення електричних зарядів у провіднику.

Потужність струму можна також обчислити за однією з формул:

$$P = \frac{A}{t}, P = IU, P = I^2R, P = \frac{U^2}{R}.$$

У СІ одиницею потужності є ват (Вт):

$$1 \text{ Вт} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

На практиці для вимірювання роботи струму широко використовується позасистемна одиниця — кіловат-година (кВт · год):

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають роботою електричного струму?
2. За якою формулою обчислюється робота електричного струму?
3. Що називають потужністю струму?
4. Як можна обчислити потужність?
5. Запишіть формули для обчислення потужності та вкажіть, коли якою формулою зручніше користуватися.
6. Що приймають за одиницю потужності?
7. Які одиниці роботи використовують на практиці?

### Вправа до § 31

- 1(п). Два трамваї з однаковими електродвигунами рухаються: один із більшою, другий з меншою швидкістю. Який з них споживає більшу потужність електричного струму, якщо вважати, що опір руху в обох випадках однаковий?
- 2(п). Протягом години у квартирі працювали дві електричні лампи: одна потужністю 75 Вт, друга 40 Вт. Порівняйте витрати електроенергії в цих лампах.
- 3(с). Приміщення освітлено 8 електричними лампочками, з'єднаними паралельно й увімкненими в мережу з напругою 220 В. Як зміниться витрата електроенергії в мережі, якщо кількість ламп збільшити до 10?
- 4(с). Дві лампи, розраховані на однакову потужність, працюють від різних джерел напруги: одна від 220 В, друга від 127 В. Яка з ламп має більший електричний опір? Порівняйте силу струму в лампах.
- 5(д). Розрахуйте витрату енергії електричною лампою, яку ввімкнули на 10 хв у мережу напругою 220 В, якщо сила струму в лампі становить 0,5 А.
- 6(д). Потужність електродвигуна 3 кВт, сила струму 12 А. Визначте напругу на затискувачах електродвигуна.
- 7(в). Підйомний кран рівномірно піднімає вантаж масою 285 кг зі швидкістю 20 м/хв. Сила струму в електродвигуні, розрахованому на 380 В, 5 А. Визначте ККД крана.
- 8(в). Розгляньте уважно написи на електричній лампі розжарювання та визначте за ними опір лампи в робочому стані. Вважаючи, що діаметр вольфрамового дроту становить 0,08 мм, обчисліть його довжину.

## § 32. Закон Джоуля — Ленца

- ▶ Закон Джоуля — Ленца
- ▶ Практичне використання теплової дії струму
- ▶ Коротке замикання

**ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА.** З повсякденного життя вам відомо, що електричний струм, проходячи по провіднику, веде до його нагрівання. Давайте поміркуємо над тим, чому відбувається це нагрівання.

У металевому провіднику електричне поле зумовлює рух електронів. Стикаючись з іонами кристалічної ґратки, електрони передають їм частину своєї енергії. У результаті хаотичний рух іонів відносно стану рівноваги стає інтенсивнішим, а відповідно збільшується і внутрішня енергія провідника. Як наслідок, температура провідника підвищується, і він передає теплоту тілам, що його оточують. Завдяки роботі електричного поля до провідника постійно надходить енергія. Отже, кількість теплоти, яка виділяється електричним струмом у провіднику, пов'язана з роботою електричного струму.

Теплова дія електричного струму експериментально була досліджена англійським ученим Дж. Джоулем та російським фізиком Е. Ленцем у 1842 р., які незалежно один від одного дійшли однакового висновку:

*кількість теплоти, що виділяється в провіднику електричним струмом, чисельно дорівнює роботі струму.*

$$Q = A.$$

З попереднього параграфу вам відомо, що коли робота струму витрачається на нагрівання провідника, то її можна визначити за формулою  $A = I^2 R t$ . Отже,

$$Q = I^2 R \cdot t.$$



Джеймс  
Прескотт Джоуль  
(1818—1889)  
Англійський учений,  
досліджував  
механічну роботу,  
електрику  
й теплоту



Емілій Християнович  
(Генріх Фрідріх Еміль)  
Ленц  
(1804—1865)  
Російський учений.  
Головні  
наукові роботи  
присвячені  
електромагнетизму

Це і є закон Джоуля — Ленца, який формулюється таким чином:

**Кількість теплоти, яка виділяється провідником з електричним струмом, дорівнює добутку квадрата сили струму, опора провідника і часу проходження струму.**

Теплова дія струму спостерігається й у випадку, коли на ділянці кола не відбувається механічна робота і струм не здійснює хімічної дії, тобто нагрітий провідник віддає кількість теплоти навколишнім тілам.

**ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВОЇ ДІЇ СТРУМУ.** Теплова дія струму використовується в різних електронагрівальних приладах. *Електронагрівальні прилади — технічні засоби, призначені для перетворення електричної енергії в теплову.* Наразі в

побуті широко використовують електричні праски, плити, чайники, електричні каміни, рефлектори тощо (рис. 32.1). У промисловості теплова дія струму використовується для плавлення спеціальних видів сталі та інших металів. У сільському господарстві за допомогою електричного струму обігрівають теплиці, інкубатори, сушать зерно тощо.

Основна частина будь-якого електронагрівального приладу — нагрівальний елемент. Це провідник із великим питомим опором, який може витримувати високі температури. Переважно для виготовлення нагрівального елемента застосовують сплав нікелю, заліза, хрому та марганцю, який дістав назву «ніхром». Щоб уникнути ураження струмом, нагрівальні елементи ізолюють від корпусу нагрівального пристрою. Змінюючи силу струму в нагрівальному елементі, можна регулювати його температуру.

Цілком зрозуміло, що кожен, хто користується цими приладами, повинен знати їх будову, правила користування й поточного ремонту. Електронагрівальний прилад може працювати нормально лише при певній робочій (номінальній) напрузі й



Рис. 32.1.  
Електронагрівальні  
прилади



розрахований на визначену величину струму та потужність. Усі ці величини є основними паспортними даними будь-якого електронагрівального приладу та написані на табличці, закріпленій на ньому.

Ще одним пристроєм, де використовується теплова дія струму, є лампа розжарення — освітлювальний прилад, де світло випромінюється тугоплавким провідником, нагрітим електричним струмом до розжарення (рис. 32.2). Основною частиною лампи розжарення є тонкий вольфрамовий провідник. Вольфрам — тугоплавкий метал із температурою плавлення  $3387\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У лампі розжарення вольфрамова нитка нагрівається до  $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За такої температури вона починає яскраво світитися. При практично досяжних температурах  $2300\text{—}2900\text{ }^{\circ}\text{C}$  випромінюється світло, яке здається більш «жовто-червоним», ніж денне.

Нитку розжарювання вміщують у скляну колбу, з якої за допомогою насосу відкачують повітря. Це роблять із метою запобігання перегоранню нитки розжарювання внаслідок окислення вольфраму. У звичайному повітрі при таких температурах вольфрам миттєво перетворився б на оксид.

Проте відкачування повітря призводить до випаровування вольфраму з поверхні нитки розжарювання, внаслідок чого вона стає тоншою і перегорає. З метою запобігання швидкому випаровуванню вольфраму лампи наповнюють газами, які не взаємодіють із ним, наприклад, азотом або інертними газами, такими як криптон чи аргон.

Перевагою лампи розжарення є випромінювання рівного (не мерехтливого) світіння. Проте лампи розжарення мають низку суттєвих недоліків. Серед них велике енергоспоживання, порівняно нетривалий термін роботи та мала ефективність. Так, лише  $5\%$  спожитої енергії перетворюється у світло, а решта  $95\%$  — у тепло.

У 1976 р. було зроблено якісний прорив — американець Ед Харріс продемонстрував принципово нову лампу, яка згодом отримала назву енергозберігаючої, газорозрядної лампи низького тиску. Термін роботи сучасних електрозберігаючих ламп становить близько 10 тисяч годин, а  $70\%$  спожитої енергії перетворюється у світло (рис. 32.3, а).

Останнім часом дедалі більшого поширення набувають LED-лампи (англ. *LED* — *light-emitting diode*). LED-лампа — напів-



Рис. 32.2. Лампа розжарення



а)



б)



Рис. 32.3. Енергозберігаючі лампи:

а) газорозрядна лампа низького тиску; б) LED-лампи

провідниковий пристрій, що випромінює світло при пропусканні через нього електричного струму (рис. 32.3, б). При цьому близько 90 % спожитої енергії перетворюється у світло.

**КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ.** Електричні кола завжди розраховують на певну силу струму. Якщо з тієї чи іншої причини сила струму в колі перевищує допустиме значення, це може зумовити нагрівання провідників, плавлення ізоляції і навіть пожежу. Явище істотного збільшення сили струму в колі внаслідок зменшення його електричного опору називають коротким замиканням. Причиною такого замикання може бути одночасне вмикання потужних споживачів електричного струму або порушення ізоляції електрообладнання.

Для запобігання наслідкам короткого замикання використовують спеціальні електричні пристрої — запобіжники. Розрізняють одноразові (плавкі) запобіжники (рис. 32.4) та автоматичні (багаторазові) вимикачі (рис. 32.5). Плавка вставка одноразових запобіжників обирається з таким розрахунком, щоб вона розплавилася раніше, ніж струм досягне неприпустимих значень.

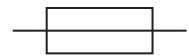
Робочим елементом багатьох автоматичних вимикачів є біметалева пластина з двох різнорідних металів, скріплених між собою. При нагріванні пластини під час проходження по ній електричного струму кожен із металів деформується по різному. Пластина вигинається і розмикає електричне коло. На відміну від плавкого



а)



б)



в)

Рис. 32.4. Плавкі запобіжники:

а) плавкий запобіжник; б) утримувачі запобіжників;

в) позначення плавких запобіжників на електричних схемах



Рис. 32.5. Автоматичні вимикачі:

- а) під час вигинання біметалевої пластини контакт розмикається;  
 б) автоматичні запобіжники; в) позначення автоматичних вимикачів (запобіжників) на електричних схемах

запобіжника, автоматичний вимикач готовий до подальшого використання після охолодження пластини.

*Звертаємо увагу на те, що за допомогою спеціальних тумблерів чи кнопок, розташованих на автоматичному вимикачі (рис. 32.5, б), можна відновити електроживлення, але це варто робити лише після усунення причини виникнення короткого замикання!*

### Головне в цьому параграфі

У металевому провіднику внаслідок руху електронів і стикання їх із йонами кристалічної ґратки збільшується інтенсивність хаотичного руху йонів, а відповідно внутрішня енергія і температура провідника.

Кількість теплоти, яка виділяється провідником з електричним струмом, дорівнює добутку квадрата сили струму, опору провідника і часу проходження струму:

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

Електронагрівальні прилади — технічні засоби, призначені для перетворення електричної енергії в теплову.

Основною частиною будь-якого електронагрівального приладу є нагрівальний елемент — провідник із великим питомим опором, який може витримувати великі температури.

Явище значного збільшення сили струму в колі внаслідок зменшення його електричного опору називають коротким замиканням.

Для запобігання наслідкам короткого замикання використовують запобіжники.

### Запитання для самоперевірки

1. Поясніть, чим зумовлена теплова дія електричного струму.
2. Сформулюйте закон Джоуля — Ленца.
3. У чому полягає принцип дії електронагрівальних приладів.
4. Назвіть переваги й недоліки лампи розжарення.
5. Поясніть, чому для плавких запобіжників не використовують залізний чи мідний дріт.

6. Поясніть, чому в запобіжниках плавкий провідник є значно тоншим, ніж провідники, що з'єднують джерело і споживачів електричної енергії.

### Вправа до § 32

- 1(п). Визначте, у скільки разів зросте кількість теплоти, що виділяється електричним струмом, якщо сила струму в провіднику збільшується у 3 рази.
- 2(п). Два вольфрамові провідники однакової довжини мають різний діаметр. Поясніть, у якому з них виділяється більша кількість теплоти при послідовному ввімкненні.
- 3(с). Поясніть, як зміниться кількість теплоти, що виділяється електричним струмом, під час проходження по провіднику, якщо його довжину зменшити у 2 рази.
- 4(с). Визначте кількість теплоти, що виділиться у провіднику опором 15 Ом за 10 хв, якщо сила струму в провіднику становить 2 А.
- 5(с). Поясніть, чи буде запобіжник відповідати своєму призначенню, якщо він розрахований на 10 А, а проводка у квартирі — лише на 6 А.
- 6(д). Плавкі запобіжники розраховані на максимальний струм 10 А при напрузі 220 В. Чи розплавиться запобіжник, якщо в мережу одночасно увімкнуть електричні прилади загальною потужністю 2,5 кВт?
- 7(д). По провіднику проходить струм 5 А. Визначте опір провідника, якщо протягом 10 хв виділяється кількість теплоти 5 кДж.
- 8(в). Два провідники, опір яких 10 і 23 Ом, увімкнули в мережу з напругою 100 В. Визначте кількість теплоти, яка виділяється щосекунди в кожному провіднику, якщо їх з'єднати: 1) послідовно; 2) паралельно.
- 9(в). На електроплитці, увімкненій у мережу напругою 220 В, стоїть каstrуля, в якій міститься 0,5 л води з початковою температурою 10 °С. За 12 хв вода закипає. Визначте ККД установки, якщо сила струму в електроплитці становить 5 А.
- 10(в). Пральна машина має потужність нагрівальних тенів 500 Вт і ККД 85 %. Визначте час нагрівання в машині води об'ємом 5 л від 25 до 95 °С.

### Це цікаво

Спроби створити лампу розжарення здійснювалися вченими різних країн ще з початку XIX ст., проте сконструювати надійний пристрій не вдавалося. Лише в 1854 р. німецький годинникар Генріх Гебель продемонстрував перший пристрій, який можна назвати лампою розжарення, — обвуглену бамбукову нитку в скляній колбі, з якої було відкачано повітря.

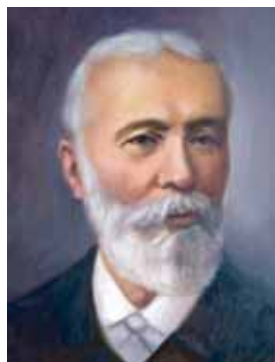
Вугільна лампа Павла Яблочкова, розроблена в 1874 р., працювала не більше 2 годин. Придатну для практичного застосування лампу першим запатентував Джозеф Свон у 1878 р.



Рис. 32.4.  
Лампа Едісона



Рис. 32.5.  
Лампа І. Пулюя



Іван Павлович Пулюй  
(1845—1918)  
Всесвітньо відомий  
український учений у  
галузі електротехніки,  
ректор та професор  
Німецького  
політехнічного  
інституту у  
Празі, автор  
фундаментальних  
праць із теорії  
електричних кіл,  
один із розробників  
першої в Європі  
електростанції

Як нитку розжарення було використано обвуглене бавовняне волокно, вміщене у скляну колбу з розрідженим киснем. У 1879 р. було розпочато обладнання електричного освітлення в містах Англії, незважаючи на те, що лампи Свона мали невеликий (близько 13 годин) термін використання через недостатній вакуум.

У передмісті Нью-Йорка 31 грудня 1879 р. американський винахідник Томас Альва Едісон запатентував лампу розжарення з платиновою ниткою. А наступного року вчений створив лампу розжарення з вугільною ниткою, яка працювала майже 40 годин (рис. 32.4).

У 1884 р. на Міжнародній електротехнічній виставці в Штаері видатний український фізик Іван Пулюй продемонстрував лампу розжарення власної конструкції.

Запатентована І. Пулюєм лампа мала вдосконалену нитку розжарювання, що в декілька разів збільшувало термін її використання, порівняно з аналогами. Лампа Пулюя (рис. 32.5) серійно виготовлялася та використовувалася в Європі.

### § 33. Лічильник електричної енергії

- ▶ Будова та дія електролічильника
- ▶ Обчислення вартості спожитої електроенергії

**БУДОВА ТА ДІЯ ЕЛЕКТРОЛІЧИЛЬНИКА.** На завершальному етапі другої промислової революції з винаходом динамо-машин з'явилася можливість виробляти електроенергію у великих обсягах. Першою сферою масового застосування електроенергії стало освітлення. Коли цей новий продукт — електроенергію — почали продавати, виникла необхідність визначити її ціну. Проте було незрозуміло, в яких одиницях слід вести облік і які принципи вимірювання були б найзручнішими.

**Лічильник електричної енергії (електролічильник) — електричний вимірювальний прилад, призначений для обліку спожитої електричної енергії.**

Першим електролічильником став лічильник годин роботи лампи Самюеля Гардінера (США), запатентований у 1872 р. Він вимірював час, протягом якого подавалася електроенергія (рис. 33.1).

У 1889 р. угорець Отто Тітус Блаті запатентував «Електричний лічильник для змінних струмів», а у 1894 р. Олівер Шелленберг розробив індукційний прилад обліку ват-годин.

Сучасний лічильник електричної енергії для змінного струму складається з металевого обертового диска. Вісь обертання диска з'єднана з лічильним механізмом, який вимірює кількість обертів диску і дає інформацію про число спожитих ват-годин, оскільки кількість обертів диска пропорційна величині електричної енергії, що проходить через прилад. Частота обертання диска пропорційна потужності навантаження: чим більшою є споживана потужність, тим швидше він обертається. Показники лічильника відповідають кількості використаної електроенергії, вираженій у кВт·год. Цифра, що показує десяти частини кВт·год, узята в кольорову рамку (рис. 33.2). Такі електролічильники називають індукційними.



Рис. 33.1.  
Перший  
електролічильник

Проте індукційні електролічильники мають низку недоліків: порівняно велика по-





Рис. 33.2.

Індукційні електрولیчильники



Рис. 33.3.

Електронні електрولیчильники

хибка обліку, неможливість автоматичного зняття показників на відстані тощо, тому наразі широко використовуються електронні прилади обліку електроенергії (рис. 33.3).

**ОБЧИСЛЕННЯ ВАРТОСТІ СПОЖИТОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.** Кожного місяця ваша родина отримує рахунки за спожиту електроенергію. Спробуємо з'ясувати, яким чином обчислюється її вартість. Насамперед звернемо увагу, що обліковується робота, виконана електричним струмом у процесі функціонування всіх увімкннутих у мережу приладів, що є у вас вдома.

Проте спожита електрична енергія розраховується не в джоулях, а в кіловат-годинах, оскільки робота струму за одиницю часу (ват-за-секунду) є незначною. Тому для спрощення розрахунків прийняли одиницю «кіловат-година», якою й вимірюють спожиту приладами електричну енергію та відповідний час їх роботи. Знаючи тариф на електроенергію (вартість кіловат-години роботи електричного струму у вашому будинку) та кількість спожитих кіловат-годин, можна обчислити вартість спожитої електроенергії. Для цього необхідно кількість спожитих кіловат (витрати електроенергії) помножити на тариф.

Наприклад, якщо поточні покази електрولیчильника становлять 011706,9 кВт · год, а попередні були 010982,6 кВт · год, то витрати електроенергії дорівнюють 724 кВт · год. Нехай тариф на

електроенергію у вашому будинку становить 45 коп. за 1 кВт · год. Тоді вартість спожитої електроенергії визначаємо як добуток:

$$724 \cdot 45 = 32\,580 \text{ (коп.)} = 325 \text{ грн } 80 \text{ коп.}$$

### Головне в цьому параграфі

Лічильник електричної енергії (електролічильник) — електричний вимірювальний прилад, призначений для обліку спожитої електричної енергії.

Лічильник електричної енергії для змінного струму складається з металевого обертового диска. Вісь обертання диска з'єднана з лічильним механізмом, який вимірює кількість обертів диска і дає інформацію про кількість спожитих ват-годин.

Для спрощення розрахунків вартості електроенергії за одиницю спожитої енергії взято «кіловат-годину».

Для обчислення вартості спожитої електроенергії необхідно кількість спожитих кіловат (витрати електроенергії) помножити на тариф.

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають електролічильниками?
2. Опишіть будову та принцип дії електролічильників.
3. Поясніть, чому для обчислення вартості електроенергії спожиту електроенергію вимірюють у кіловат-годинах.
4. Яким чином обчислюють вартість спожитої електроенергії?

### Вправа до § 33

- 1(п). Поясніть, як можна переконаватися в тому, що всі споживачі електроенергії від'єднані від електромережі.
- 2(п). Розгляньте фотографію лічильника й поясніть, що означають надписи: kWh; 220V; 50 Hz; 10-40 A.



Рисунок до задач 2 та 3

- 3(с). Підрахуйте вартість спожитої електроенергії за показами лічильника, якщо тариф за електроенергію становить 1 грн за 1 кВт · год спожитої енергії.
- 4(с). Підрахуйте вартість електроенергії, спожитої електричною лампочкою потужністю 100 Вт протягом місяця (30 днів) при тарифі 1 грн за 1 кВт · год, якщо вона світиться по 8 год за добу.
- 5(д). Розрахуйте вартість електроенергії при тарифі 1 грн за 1 кВт · год, що споживається електричною праскою за 4 год

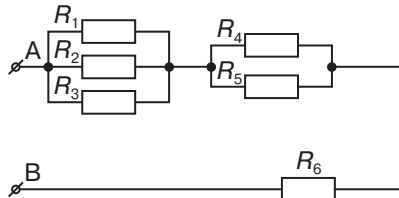
роботи, якщо вона вмикається в мережу напругою 220 В. Сила струму в прасці 2,5 А.

- 6(д).** За користування електроенергією протягом місяця родина сплатила 112 грн 50 коп. Визначте витрати електроенергії, якщо тариф на неї становить 45 коп. за 1 кВт · год.
- 7(д).** Запишіть паспортні дані потужності домашнього електричного чайника. Визначте кількість електричної енергії, спожитої на нагрівання води в чайнику до кипіння. Обчисліть її вартість.
- 8(д).** Запишіть паспортні дані електричних приладів, якими ви користуєтеся в побуті. Визначте, на яку силу струму мають бути розраховані запобіжники, якщо всі прилади будуть увімкнуті одночасно. домашнього електричного чайника. Визначте кількість електричної енергії, спожитої на нагрівання води в чайнику до кипіння. Обчисліть її вартість.
- 9(в).** У квартирі залишили увімкненою тільки одну електролампочку. Число обертів диска лічильника за 10 хв дорівнює 20. На панелі лічильника є напис: 1 кВт · год = 1200 обертам диска. Визначте потужність увімкненої лампи.

### ВЧИМОСЯ РОЗВ'ЯЗУВАТИ ФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ З ТЕМИ «З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ»

Починаючи розв'язувати задачі на розрахунок електричних кіл, поновіть у пам'яті закон Ома для ділянки кола, закони, які виконуються при послідовному та паралельному з'єднанні провідників та правила спрощення розрахунку електричних кіл: переміщення точок з'єднання та зміни довжини зображених провідників, дії за наявності перемичок, використання еквівалентних опорів та симетрії електричної схеми.

**Задача 1.** На малюнку зображено схему електричного кола з шести однакових резисторів по 60 Ом. Визначте силу струму в кожному резисторі, якщо напруга між точками А і В дорівнює 220 В.



Дано:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \\ = R_5 = R_6 = 60 \text{ Ом} \\ U = 220 \text{ В}$$

$$I_1 \text{ — ?} \quad I_4 \text{ — ?} \\ I_2 \text{ — ?} \quad I_5 \text{ — ?} \\ I_3 \text{ — ?} \quad I_6 \text{ — ?}$$

Розв'язок

Резистори  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$  з'єднані між собою паралельно. Назвемо це з'єднання «Паралель-1» (П1). Знайдемо опір цього з'єднання:

$$\frac{1}{R_{\text{П1}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}{R_1 R_2 R_3},$$

$$R_{\text{П1}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3};$$

$$R_{\text{П1}} = \frac{60 \cdot 60 \cdot 60}{60 \cdot 60 + 60 \cdot 60 + 60 \cdot 60} = 20 \text{ (Оі)}.$$

Резистори  $R_4$  та  $R_5$  з'єднані між собою паралельно. Назвемо це з'єднання «Паралель-2».

Знайдемо опір цього з'єднання:

$$\frac{1}{R_{\text{П2}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2},$$

$$R_{\text{П2}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_{\text{П2}} = \frac{60 \cdot 60}{60 + 60} = 30 \text{ (Оі)}.$$

«Паралель-1», «Паралель-2» і резистор  $R_6$  з'єднані між собою послідовно. Загальний опір цього з'єднання, а отже, і всього електричного кола, дорівнює  $R = R_{\text{П1}} + R_{\text{П2}} + R_6 = 20 + 30 + 60 = 110 \text{ (Оі)}$ .

$$\text{Розрахуємо загальну силу струму: } I = \frac{U}{R} = \frac{220}{110} = 2 \text{ (А)}.$$

Оскільки «Паралель-1», «Паралель-2» і резистор  $R_6$  з'єднані між собою послідовно, то

$$I_{\text{П1}} = I_{\text{П2}} = I_6 = 2 \text{ А}.$$

На «Паралелі-1» струм розділяється на три частини, а оскільки  $R_1 = R_2 = R_3$ , то  $I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I_{\text{П1}}}{3} = \frac{2}{3} \text{ А}$

На «Паралелі-2» струм розділяється на дві частини, а оскільки  $R_4 = R_5$ , то  $I_4 = I_5 = \frac{I_{\text{П2}}}{2} = \frac{2}{2} = 1 \text{ А}$

$$\text{Відповідь: } I_1 = I_2 = I_3 = \frac{2}{3} \text{ А}, \quad I_4 = I_5 = 1 \text{ А}, \quad I_6 = 2 \text{ А}.$$

Розв'язуючи задачі на розрахунок роботи та потужності електричного струму, необхідно пам'ятати: формули роботи та потужності електричного струму, закон Джоуля — Ленца, закон збереження енергії, закономірності послідовного й паралельного з'єднання провідників, залежність опору від матеріалу та розмірів, формули для розрахунку кількості теплоти в різних процесах.

**Задача 2.** За 10 хв у електричному чайнику нагріли 0,5 л води від  $20^\circ\text{C}$  до кипіння, сила струму в мережі 1,2 А, а опір спіралі електрочайника 260 Ом. Питома теплоємність води 4200 Дж/(кг · °C). Визначити ККД електрочайника.

*Дано:*

$t = 10 \text{ хв} = 600 \text{ с}$

$V = 0,5 \text{ л} = 0,0005 \text{ м}^3$

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

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

$I = 1,2 \text{ А}$

$R = 260 \text{ Ом}$

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

$\eta - ?$

*Розв'язок*

ККД нагрівального приладу чисельно дорівнює відношенню корисної енергії (роботи) до витраченої

$$\eta = \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{в}}}$$

Корисною енергією є енергія нагрівання води

$$A_{\text{к}} = Q_{\text{н}} = cm(t_2 - t_1);$$

масу води знайдемо через густину:

$$m = \rho V; m = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,0005 \text{ м}^3 = 0,5 \text{ кг.}$$

Витраченою є енергія, що виділилася в нагрівальному елементі під час проходження по ньому електричного струму  $A_{\text{в}} = Q = I^2 R t$ ;  
загальна формула:

$$\eta = \frac{A_{\text{к}}}{A_{\text{в}}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q} = \frac{cm(t_2 - t_1)}{I^2 R t};$$

підставляємо числові значення:

$$\eta = \frac{4200 \text{ Дж/кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \cdot 0,5 \text{ кг} \cdot (100 - 20)^\circ\text{C}}{(1,2 \text{ А})^2 260 \text{ Ом} 600 \text{ с}} = 0,75.$$

**Відповідь:**  $\eta = 75 \%$ .

**Задача 3.** Електрична мережа квартири розрахована на силу струму 6 А, лічильник електричної енергії — на силу струму 10 А. На який струм має бути розрахований автоматичний вимикач? Чи спрацює автоматичний вимикач, якщо увімкнути одночасно декілька електричних приладів загальною потужністю 2 кВт?

Всі електричні прилади, у тому числі електричний лічильник, мають запас міцності, тому автоматичний вимикач або плавкий запобіжник слід розраховувати з певним запасом на мінімальну силу струму, тобто 6 А.

При напрузі в мережі 220 В максимальна потужність приладів:

$$P = IU;$$

$$P = 6 \text{ А} \cdot 220 \text{ В} = 1320 \text{ Вт};$$

автоматичний вимикач повинен спрацювати бо потужність приладів більша за допустиму для дротів електричної мережі.

Якщо запобіжники будуть розраховані на 10 А, то провідники в оселі нагріватимуться, що може призвести до пожежі.

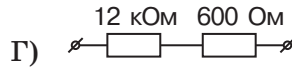
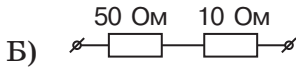
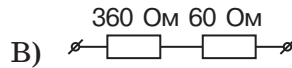
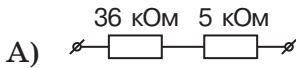
**ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ  
З ТЕМИ «З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ.  
РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ»**

- 1(п).** Яка фізична величина завжди є однаковою в колі для всіх провідників, з'єднаних паралельно?  
А) сила струму;  
Б) напруга;  
В) опір;  
Г) потужність.
- 2(п).** Робота електричного струму на ділянці електричного кола визначається за формулою:  
А)  $A = Fs$ ;  
Б)  $P = UI$ ;  
В)  $A = UIt$ ;  
Г)  $A = \Delta E$ .
- 3(п).** Укажіть прізвище вченого, який встановив від чого залежить сила струму на ділянці електричного кола:  
А) Дж. Джоуль;  
Б) Г. Ом;  
В) Ш. Кулон;  
Г) Е. Ленц.
- 4(п).** Два резистори з'єднані послідовно. Опір першого резистора 5 Ом, а опір другого — 15 Ом. Виберіть правильне твердження:  
А) загальний опір резисторів 10 Ом;  
Б) сила струму на першому резисторі більша;  
В) напруга на обох резисторах однакова;  
Г) сила струму в обох резисторах однакова.
- 5(с).** Які опори можна одержати, з'єднавши 3 резистори опором 2 Ом кожен?  
А)  $2/3$  Ом, 6 Ом, 3 Ом;  
Б)  $2/3$  Ом, 4 Ом, 3 Ом;  
В)  $1/3$  Ом, 6 Ом, 3 Ом;  
Г)  $2/3$  Ом, 2 Ом, 4 Ом.
- 6(с).** Два провідники, що мають однакові опори, з'єднано спочатку послідовно, а потім паралельно. В обох випадках напруга на ділянці кола є однаковою. Встановіть, у якому випадку робота електричного струму за той самий час буде більшою і в скільки разів:  
А) при послідовному з'єднанні робота електричного струму в 2 рази більша;  
Б) в обох випадках однакова;

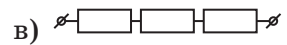
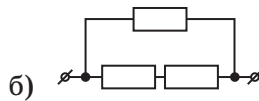
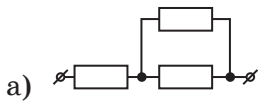




12(д). До кінців ділянок кола прикладено однакову напругу. Порівняйте силу струму в кожній з ділянок і розташуйте ділянки в порядку збільшення сили струму:



13(д). До джерела постійної напруги 9 В підключили три однакових резистори по 1 Ом. Визначте потужність електричного струму в кожному з них.



14(в). Визначте роботу електродвигуна пральної машини, який працює від напруги 380 В продовж 10 хв. Опір обмотки становить 200 Ом. ККД електродвигуна 70 %.

15(в). Визначте час, протягом якого має працювати електричний чайник, щоб нагріти 0,5 л води від 20 °С до температури кипіння, якщо сила струму в нагрівальному елементі опором 260 Ом становить 1,2 А. Питома теплоємність води 4200 Дж/(кг · °С).

### § 34. Природа електричного струму в розчинах і розплавах електролітів

- ▶ *Електроліти. Електролітична дисоціація*
- ▶ *Електроліз. Закон електролізу*
- ▶ *Застосування електролізу*

**ЕЛЕКТРОЛІТИ. ЕЛЕКТРОЛІТИЧНА ДИСОЦІАЦІЯ.** Звернемося до досліду. З'єднаємо послідовно джерело живлення, електричну лампочку та два металеві електроди, які зануримо в скляну посудину з кухонною сіллю NaCl (рис. 34.1, а).

Замкнемо електричне коло. Лампочка не світиться, оскільки кухонна сіль є діелектриком. Зануримо тепер електроди в посудину з дистильованою водою (рис. 34.1, б). Лампочка знову не світиться, тому що дистильована вода також є діелектриком. Розчинимо трохи солі у воді та повторимо дослід. Побачимо, що

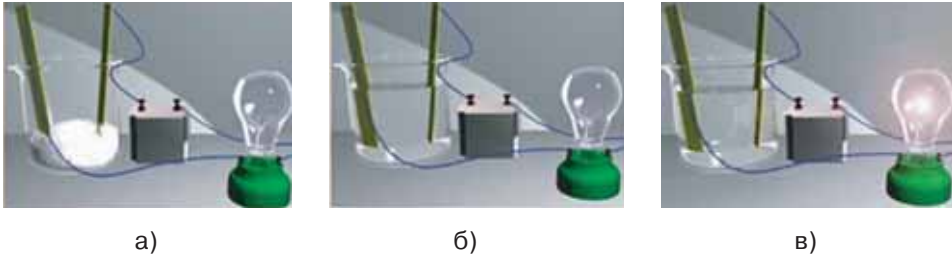


Рис. 34.1. Дослідження провідності:  
а) солі; б) дистильованої води; в) розчину солі

лампочка почне світитися. Отже, в колі з'явився електричний струм (рис. 34.1, в).

Таким чином, розчин кухонної солі проводить електричний струм. Речовини, розчини і розплави яких проводять електричний струм, називають *електролітами*. До електролітів належать речовини, в яких електричний струм утворюється йонами, зокрема розплавлені солі, водні розчини солей, кислот і лугів тощо.

У попередніх параграфах ви дізналися про особливості електричного струму в металах та напівпровідниках. Які ж процеси відбуваються в електролітах під час проходження електричного струму?

Молекули солей, кислот і лугів утворені позитивними й негативними йонами, які утримуються силами електростатичного притягання. Наприклад, у молекулах кам'яної солі  $\text{NaCl}$  позитивно заряджений йон натрію  $\text{Na}^+$  притягується до негативного йона хлору  $\text{Cl}^-$ . У водяному розчині молекули солі  $\text{NaCl}$  потрапляють в оточення полярних молекул води (рис. 34.2). Своїми позитивними полюсами молекули води наближаються до йонів хлору  $\text{Cl}^-$ , а негативними —

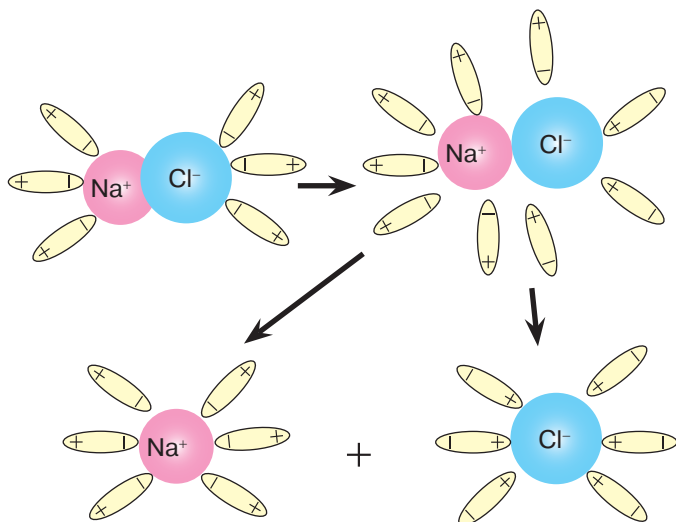


Рис. 34.2.  
Механізм  
розпаду  
молекули солі  
 $\text{NaCl}$  на йони

до йонів натрію  $\text{Na}^+$ . У певний момент сила притягання між цими йонами і молекулами води переважає над силою притягання між йонами, і молекула солі розпадається на два йони  $\text{Cl}^-$  та  $\text{Na}^+$ .

**Процес розпаду речовин на йони під дією полярних молекул розчинника називається електролітичною дисоціацією.**

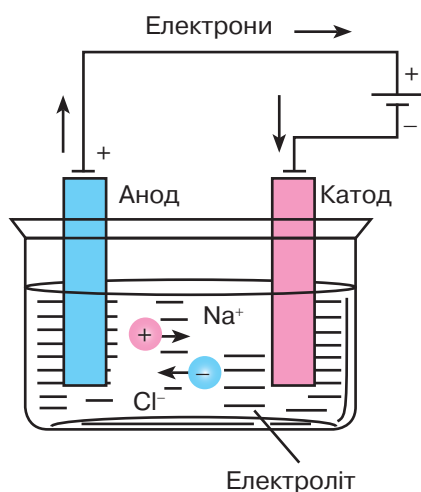


Рис. 34.3. Йонна провідність розчину кам'яної солі  $\text{NaCl}$

ні йони будуть рухатися до електрода, з'єданого з негативним полюсом джерела живлення, тобто до *катода*, а негативні йони — у протилежному напрямі, до анода (рис. 34.3). При цьому через розчин електроліту відбувається перенесення як заряду, так і речовини. Провідність, зумовлену рухом йонів, називають йонною.

Пригадайте з досвіду: цукор чи сіль значно швидше розчиняється в гарячій воді, ніж у холодній. Тобто з підвищенням температури зростає кількість молекул, які розпадаються на йони, а отже, число вільних носіїв електричного заряду збільшується. Чим більшою буде кількість вільних носіїв заряду, тим краще речовина проводить електричний струм.

Таким чином, *із підвищенням температури розчинів і розплавів електролітів їх провідність збільшується, а опір, відповідно, зменшується.*

**ЕЛЕКТРОЛІЗ. ЗАКОН ЕЛЕКТРОЛІЗУ.** Проходження електричного струму через електроліт пов'язане з перенесенням речовини. На електродах відбувається виділення речовин, що входять до складу електролітів.

**Процес виділення речовини на електродах під час проходження електричного струму через електроліт називають електролізом.**

Явище електролізу відкрив та дослідив Майкл Фарадей. Він з'ясував, що на аноді негативно заряджені йони віддають зайві електрони (у хімії цей процес називається окисною реакцією), а на катоді позитивні йони одержують відсутні електрони (відновна реакція).

Кожний іон, що у процесі електролізу нейтралізується на електроді й виділяється на ньому у вигляді нейтрального атома, має певну масу. Але разом із тим він переносить через електроліт не тільки масу, а й певний заряд. Тому маса речовини, що виділилася на електроді, та кількість електрики, яка пройшла через електроліт, залежать від кількості йонів, що дісталися електродів.

У 1833 р. М. Фарадей установив закономірність, яка отримала назву закону Фарадея:

*маса речовини  $m$ , що виділилась на електроді під час електролізу, прямо пропорційна заряду  $q$ , який пройшов через електроліт:*

$$m = kq.$$

Оскільки  $q = It$ , де  $I$  — сила струму,  $t$  — час проходження струму, то

$$m = kIt.$$

Сталу  $k$  називають електрохімічним еквівалентом речовини. Він залежить від природи речовини та чисельно дорівнює масі речовини в кілограмах, яка виділяється під час проходження 1 Кл електрики.

Значення електрохімічного еквівалента найпоширеніших речовин можна знайти в довідниковій таблиці (табл. 34.1).

Таблиця 34.1

#### Електрохімічні елементи речовин

Речовина	Електрохімічний еквівалент, мг/Кл
Алюміній	0,093
Водень	0,0104
Кисень	0,083
Мідь	0,33
Нікель	0,3
Срібло	1,12
Хром	0,18
Цинк	0,34

**ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗУ.** На межі XVIII і XIX ст. італійський фізіолог Луїджі Гальвані й англійський фізик Алессандро Вольта зробили відкриття, які започаткували нову наукову галузь — електрохімію. Учені з'ясували, що під час проходження електричного струму через водний розчин солі в ньому відбуваються хімічні перетворення, які нині називають електролітичними. Пізніше російський учений Б. С. Якобі винайшов спосіб нанесення шару металу на поверхню різних виробів за допомогою електричного струму.

Сьогодні електроліз набув широкого застосування в техніці. Його використовують у технології *рафінування* (очищення) металів від домішок. За допомогою електролізу в електрометалургії отримують чистий натрій, нікель, кисень, водень, хлор та інші речовини. Пластина металу, який підлягає очищенню, є анодом, що разом із катодом занурюється в електролітичну ванну, заповнену водним розчином солі цього металу. Під час електролізу метал анода у вигляді йонів переходить у розчин і далі відкладається на катоді. Електролітичний спосіб рафінування застосовується, наприклад, для отримання електротехнічної міді, з якої виготовляють електричні провідники. Зокрема, із руди з різноманітними домішками відливають мідні пластини, які приєднуються до анода й вміщуються в розчин сульфату міді ( $\text{CuSO}_4$ ). Під час пропускання електричного струму на катоді виділяється чистий метал, а всі сторонні домішки випадають в осад або переходять в електроліт.

За допомогою електролізу одні метали вкривають шаром іншого. Цей процес називається *гальваностегією*. Так, поверхні виробів із заліза вкривають нікелем або хромом, які мають значно вищу стійкість до корозії.



Рис. 34.4.  
Використання  
гальванопластики





Рис. 34.5. Цех гальваніки

Явище електролізу покладено в основу *гальванопластики* — отримання металевих копій різних предметів (медалей, монет, барельєфів, матриць для друкованих електричних плат) (рис. 34.4). Для цього з пластичного матеріалу, такого, наприклад, як віск, виготовляється копія предмета. Потім її вкривають графітовим пилом, щоб надати поверхні копії електропровідності й вміщують у ванну, де вона є катодом. У процесі електролізу ця копія вкривається шаром металу потрібної товщини. А віск (пластичний матеріал) потім видаляється шляхом нагрівання.

На виробництві процеси гальваностегії та гальванопластики проводять у гальванічних цехах, використовуючи великі гальванічні ванни, до яких одночасно можна вміщувати значну кількість виробів (рис. 34.5).

Хмельницький машинобудівний завод «ТЕМП» виготовляє сучасне гальванічне обладнання, що використовується як в Україні, так і в інших країнах (рис. 34.6).



Рис. 34.6. Сучасна установка гальванопластики «Гальванопласт-1М» виробництва Хмельницького машинобудівного заводу «ТЕМП»

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ НА ЕЛЕКТРОЛІЗ

**Задача 1.** Визначте масу срібла, що виділилося на катоді при електролізі азотнокислого срібла за 2 год, якщо до розчину докладено напругу 2 В, а його опір 5 Ом ( $k = 1,118 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл).

Дано:

$$t = 2 \text{ год} = 7200 \text{ с}$$

$$U = 2 \text{ В}$$

$$R = 5 \text{ Ом}$$

$$k = 1,118 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

$$m \text{ — ?}$$

Розв'язок

Відповідно до закону електролізу, масу срібла, що виділиться на катоді, визначають за формулою:

$$m = kIt.$$

Невідому силу струму можна обчислити за законом Ома:

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

Складаємо рівняння й розв'язуємо його відносно шуканої величини:

$$m = k \frac{U}{R} t; \quad m = 1,118 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot \frac{2 \text{ В}}{5 \text{ Ом}} \cdot 7200 \text{ с} = 3,22 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Відповідь:  $m = 3,22 \text{ г}$ .

**Задача 2.** Під час електролізу розчину HBr на катоді виділився 1 г водню. Скільки брому за той самий час виділилося на аноді, якщо сила струму 1,5 А ( $k_1 = 0,0104 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$ ,  $k_2 = 0,829 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$ )?

Дано:

$$m_1 = 1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$$

$$I = 1,5 \text{ А}$$

$$k_1 = 0,0104 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

$$k_2 = 0,829 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

$$F = 96485 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$$

$$m_2 \text{ — ?}$$

Розв'язок

За умовою задачі час електролізу для водню та брому є однаковим, тому за першим законом електролізу масу речовин, які виділяються на електродах, можна записати як  $m_1 = k_1 It$ ;  $m_2 = k_2 It$ .

Розв'язуємо одержану систему рівнянь відносно часу:

$$\frac{m_1}{k_1 I} = \frac{m_2}{k_2 I} \Rightarrow m_2 = \frac{m_1 k_2}{k_1};$$

$$m_2 = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 0,829 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}}{0,0104 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}} = 79,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Відповідь:  $m_2 = 79,7 \text{ г}$ .

### Головне в цьому параграфі

Речовини, розчини і розплави яких проводять електричний струм, називають електролітами.

Електролітична дисоціація — процес розпаду молекул на йони.

Паралельно з електролітичною дисоціацією відбувається зворотний процес з'єднання йонів у нейтральні молекули — рекомбінація.

Провідність розчинів і розплавів електролітів зумовлена рухом йонів, її називають йонною.

Процес виділення речовини на електродах під час проходження електричного струму через електроліт називають електролізом.

Закон Фарадея: маса речовини, яка виділилася на електроді під час електролізу, прямо пропорційна силі струму та часу проходження струму через електроліт:  $m = kq$ ;  $m = kIt$ .

Електрохімічний еквівалент  $k$  чисельно дорівнює масі речовини в кілограмах, яка виділяється під час проходження 1 Кл електрики.

Електроліз використовують у технології рафінування металів — очищенні їх від домішок.

Покриття провідної поверхні шаром певного металу електролітичним способом називають гальваностегією.

Гальванопластика — отримання копій різних металевих предметів за допомогою електролізу.

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають електролітами?
2. Поясніть механізм електролітичної дисоціації.
3. Поясніть механізм провідності розчинів і розплавів електролітів.
4. Що називають електролізом?
5. Від чого залежить маса речовини, яка виділяється на електроді під час електролізу?
6. У чому полягає фізичний зміст електрохімічного еквіваленту речовини?
7. У чому полягає процес рафінування металів?
8. У чому полягає суть гальваностегії?
9. Поясніть, які фізичні явища відбуваються в процесі гальванопластики.

### Вправа до § 34

- 1(п). Поясніть, як залежить опір електроліту від температури.
- 2(п). Поясніть, під час використання яких електродів (мідних чи вугільних) процес електролізу триватиме довше.
- 3(с). Визначте масу міді, що виділилася під час електролізу з розчину мідного купоросу, якщо через розчин пройшов електричний заряд 2500 Кл.

- 4(д).** Визначте на скільки змінилася маса катода під час проведення електролізу солі заліза впродовж 1 год 45 хв при силі струму 2,5 А, якщо електрохімічний еквівалент заліза 0,19 мг/Кл.
- 5(д).** Визначте час електролізу, за який на катоді виділиться 20 г натрію при силі струму 12 А. Електрохімічний еквівалент натрію 0,24 мг/Кл.
- 6(д).** За 10 хв у гальванічній ванні виділилося 0,67 г срібла. Амперметр, увімкнений послідовно з ванною, показував 0,9 А. Встановіть, чи правильні покази амперметра.
- 7(в).** Визначте товщину шару нікелю, що осяде на деталі площею 0,2 м<sup>2</sup>, якщо процес нікелювання тривав 2 год при силі струму 25 А. Електрохімічний еквівалент нікелю  $k = 3 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл, а його густина  $8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

## § 35. Електричний струм у газах

- ▶ *Провідність газів*
- ▶ *Несамостійний і самостійний газовий розряд*

**ПРОВІДНІСТЬ ГАЗІВ.** За звичайних умов гази майже повністю складаються з нейтральних атомів чи молекул, тому є діелектриками. На властивості повітря бути ізолятором ґрунтується робота звичайного вимикача електричного струму, який є у вашому житловому приміщенні. Під час вимикання світла між двома контактами утворюється повітряний проміжок, унаслідок чого розмикається електричне коло.

Чи може повітря проводити електрику? Звернемося до досліду. Приєднаємо одну пластину плоского конденсатора до електрометра, а іншу заземлимо. Потім доторкнемося позитивно зарядженою паличкою до однієї з пластин — стрілка електрометра відхилиться на певний кут (рис. 35.1, а). За умови достатньо сухого



а) б)  
Рис. 35.1. Дослідження провідності газів

повітря заряд на пластинах триматиметься доволі довго, а отже, електричний струм через повітряний простір між пластинами не проходить.

Внесемо у простір між пластинами запалений сірник. Стрілка електрометра почне швидко повертатися в початкове положення, що свідчить про розрядження пластин конденсатора (рис. 35.1, б). Отже нагріте повітря стало провідником і через нього пройшов електричний струм.

**Процес проходження електричного струму через газ називають газовим розрядом.**

Проаналізуємо результати досліду. Ви вже знаєте, що всі речовини складаються з молекул (атомів), які перебувають у безперервному хаотичному русі. З підвищенням температури газу збільшується кінетична енергія його молекул. Під час зіткнення молекул або атомів газу вони можуть втратити один або декілька електронів та перетворитися на позитивний іон. Утворюються два вільні носії заряду: електрон та позитивно заряджений іон (рис. 35.2, а).

Вільні електрони, зіткнувшись із молекулою чи атомом, можуть захоплюватися ними — утворюються негативні йони (рис. 35.2, б).

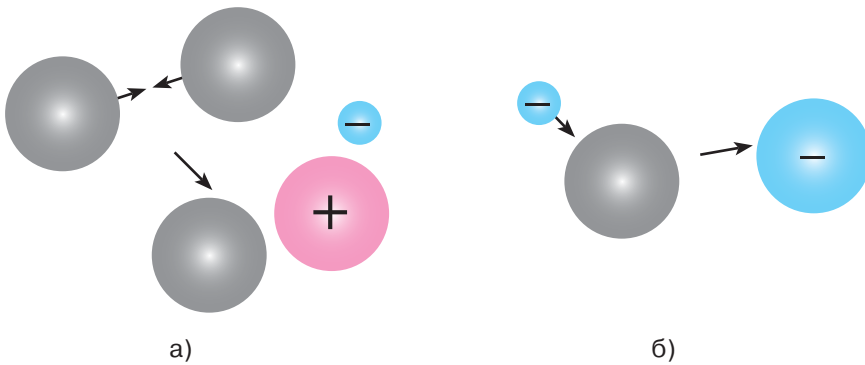


Рис. 35.2. Йонізація молекул газу

**Процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів із молекул (атомів) називають іонізацією.**

Йонізувати газ можна, нагрівши його або опромінивши електромагнітним випромінюванням, наприклад, рентгенівським чи ультрафіолетовим.

Позитивні та негативні йони (або позитивні йони й електрони) при зіткненні можуть з'єднуватися між собою, утворюючи ней-

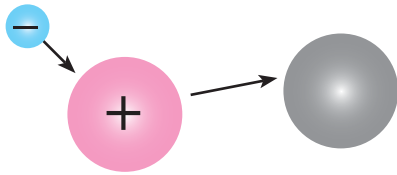


Рис. 35.3.  
Рекомбінація молекул газу

молекул, стикаючись, «розбиваються» на йони й електрони, тобто кількість вільних носіїв електричного заряду зростає. Чим більшою буде ця кількість, тим краще речовина проводитиме електричний струм. Отже, очевидним є висновок: *із підвищенням температури газів їх провідність збільшується, а опір відповідно зменшується.*

**НЕСАМОСТІЙНИЙ І САМОСТІЙНИЙ ГАЗОВИЙ РОЗРЯД.** Утворення йонів у газах суттєво відрізняється від цього процесу в електролітах, де молекули розпадаються на йони в процесі електrolітичної дисоціації. Зокрема, у разі припинення дії іонізатора газу знову стають діелектриками. Вільні електрони або досягають електродів та нейтралізуються, або рекомбінують, утворюючи нейтральні атоми чи молекули.

Тобто за умови усунення джерела йонізації газу (прибрати палик, вимкнути джерело рентгенівського випромінювання тощо) газовий розряд припиняється внаслідок рекомбінації молекул.

**Газовий розряд, який відбувається тільки за наявності зовнішнього йонізатора, називають несамостійним газовим розрядом.**

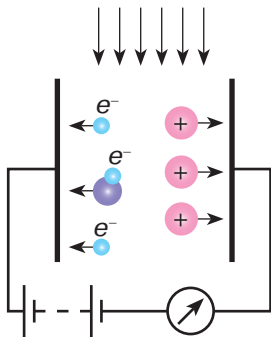


Рис. 35.4.  
Йонізація газу

тральні атоми або молекули (рис. 35.3). Отже, у газах одночасно з процесом йонізації відбувається зворотний процес — *рекомбінація*.

Провідність газів залежить від температури. З підвищенням температури зростає швидкість руху молекул, а отже, дедалі більше

Щоб в електричному колі, зображеному на рис. 35.4, існував електричний струм, потрібно мати йонізатор (палик, опромінювач).

Збільшення напруги на електродах зумовить збільшення кулонівських сил, що діють на електрони і, як наслідок, — збільшення їх швидкості та електричної енергії. Маючи велику кінетичну енергію, електрон, стикнувшись із молекулою (атомом), «розбиває» її (рис. 35.5) на йон та електрон,



який, прискорений електричним полем, руйнує інші молекули (атоми). Кількість заряджених частинок швидко зростає. Цей процес називають *ударною йонізацією газу*. Оскільки за цих умов для підтримання газового розряду зовнішній йонізатор вже не потрібний, такий розряд називають самостійним.

**Самостійний газовий розряд — розряд, який може існувати без зовнішнього йонізатора.**

Залежно від стану газу (температури та тиску), напруги, форми й розмірів електродів самостійні газові розряди можуть відрізнятися один від одного як за зовнішніми ознаками, так і за характером фізичних процесів, що їх зумовлюють. Всі види газових розрядів супроводжуються своєрідними явищами (різноманітні свічення, характерний звук тощо).

За низьких тисків (близько 0,1 мм рт. ст.) і напруги лише в кілька сотень вольт, а іноді й менше в газах спостерігається тліючий розряд. Його можна побачити у вигляді світіння у скляній трубці, наповненій газом при низькому тиску (рис. 35.6). Колір світних шарів газового розряду залежить від самого газу. Світіння повітря має бузковий відтінок, неону — оранжево-червоний, аргону — зеленуватий тощо.

Тліючий розряд у розріджених газах широко застосовують як джерело світла в різних газосвітних трубках. У лампах денного світла тліючий розряд зазвичай відбувається в парі ртуті. Випромінювання ртутної пари поглинається шаром спеціальної речовини, нанесеної на внутрішню поверхню трубки, яка під дією

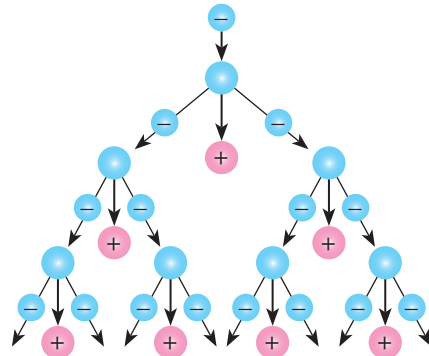


Рис. 35.5. Механізм йонізації електронним ударом



Рис. 35.6. Тліючий розряд: а) залежність кольору світіння від газу; б) лампи денного світла



Рис. 35.7. Іскровий розряд

поглинутого випромінювання світиться видимим світлом. Перевагою таких ламп порівняно з лампами розжарювання є їхня економічність, а недоліком — мерехтливе свічення.

Самостійні електричні розряди можуть відбуватися в газах і за нормальних та великих тисків у разі збільшення напруги між двома вміщеними в атмосферне повітря електродами. За певної напруги між електродами проскакує електрична іскра, що має вигляд тонкого, яскраво світлого, зігнутого та розгалуженого шнура (рис. 35.7). При цьому іскровий розряд із величезною швидкістю пронизує проміжок між електродами, гасне і знову виникає, тому око бачить одну суцільну іскру. Іскровий розряд зазвичай супроводжується характерним тріском і блакитнуватим свіченням.

Характерним прикладом потужного іскрового розряду є блискавка — електричний розряд між негативно зарядженою хмарою і позитивно зарядженою поверхнею землі або між двома хмарами. Максимальна сила струму в блискавці досягає десятків і сотень ампер, її тривалість близько  $10^{-5}$  с, електрична напруга між хмарою і землею іноді перевищує  $15 \cdot 10^7$  В, а довжина блискавки може становити десятки кілометрів.

За атмосферного тиску в дуже неоднорідних електричних полях, наприклад, поблизу дротів ліній високої напруги, спостерігається розряд, світна ділянка якого часто нагадує корону (рис. 35.8). Тому цей розряд називають *коронним*. Іноді його можна спостерігати перед грозою або під час неї на вістрях високо піднятих предметів (корабельних щоглах, вершинах дерев, шпильях

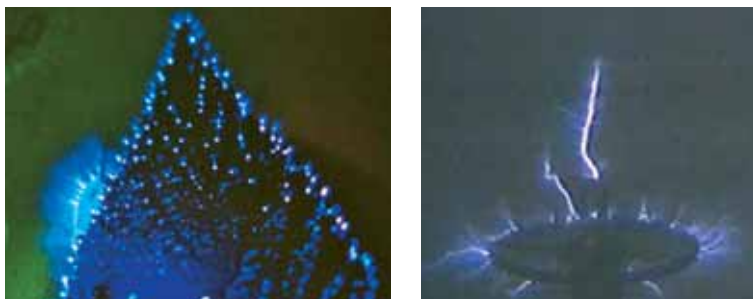


Рис. 35.8. Коронний розряд

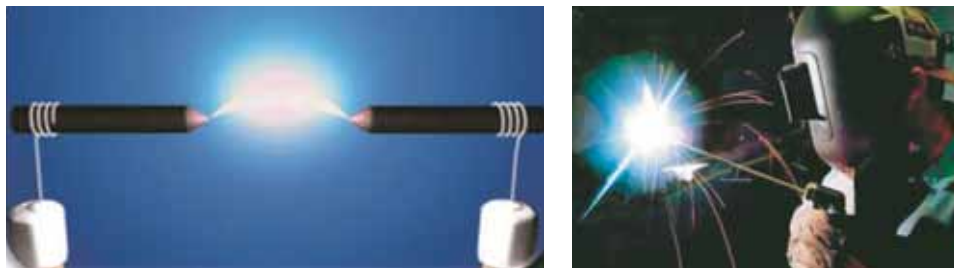


Рис. 35.9. Дуговий розряд

башт, антенах тощо) у вигляді свічення, схожого на китиці коноусів.

Якщо одержати іскровий розряд, а потім поступово знижувати електричний опір кола, зменшуючи відстань між електродами, розряд перейде з переривчастого у безперервний — виникає новий вид газового розряду, який дістав назву *дугового* (рис. 35.9).

Температура електродів у місцях виникнення електричної дуги за атмосферного тиску становить близько 3500—4000 °С, а під тиском 20 атм перевищує 7000 °С, тобто вища за температуру зовнішньої поверхні Сонця (близько 6000 °С).

Електрична дуга є потужним джерелом світла, тому її використовують у проєкційних та прожекторних ліхтарях. Дуговий розряд широко застосовується для зварювання й різання металів, а також у дугових електропечах сучасної металургійної промисловості.

### Головне в цьому параграфі

Процес проходження електричного струму через газ називають газовим розрядом.

Процес утворення позитивних і негативних йонів та вільних електронів із молекул (атомів) називають йонізацією.

Рекомбінація — процес утворення молекул у результаті зіткнення позитивних і негативних частинок.

Електричний струм у газі являє собою спрямований рух позитивних йонів до катода, а негативних йонів і електронів — до анода.

Із підвищенням температури газів їх провідність збільшується, а опір відповідно зменшується.

Газовий розряд, який відбувається тільки за наявності зовнішнього йонізатора, називають несамостійним газовим розрядом.

Самостійний газовий розряд — розряд, який може існувати без зовнішнього йонізатора.

Залежно від стану газу (температури й тиску), напруги, форми та розмірів електродів розрізняють такі види самостійних газових розрядів: тліючий, іскровий, коронний, дуговий.

## Запитання для самоперевірки

1. Що називають газовим розрядом?
2. Яка природа струму в газах?
3. Що називають рекомбінацією атомів?
4. Які заряджені частинки є носіями струму в газах?
5. За яких умов виникає самостійний електричний розряд у газах?
6. Які умови виникнення та зовнішні ознаки тліючого розряду?
7. Які характерні ознаки іскрового електричного розряду?
8. За яких умов виникає дуговий розряд? Назвіть його особливості.

## Домашній експеримент

Якщо у вас вдома є «економ»-лампа, виконайте цікаві дослідження.

**Дослід 1.** Увімкніть лампу. Спостерігаючи за тим, як вона починає світитися, визначте, як це відбувається: відразу яскраво чи поступово. Вимкніть лампу. Простежте, як зникає світло — раптово чи поступово? Порівняйте яскравість лампи на початку та наприкінці роботи.

**Дослід 2.** Увімкніть лампу. Спостерігайте за тим, як працює лічильник електричної енергії. Бажано, щоб не працювали інші електроприлади. Запишіть покази за 1 хвилину, а потім через певний час знову запишіть покази за 1 хвилину. Порівняйте покази лічильника.

Чому не рекомендують часто вимикати такі лампи?

## Вправа до § 35

- 1(п). Поясніть залежність опору газів від температури.
- 2(п). Наведіть приклади джерел світла, де використовується газовий розряд.
- 3(с). Якщо в простір між зарядженими пластинами внести полум'я свічки чи спиртівки, то воно роздвоюється (див. рисунок). Поясніть це явище.
- 4(с). Поясніть чим відрізняється йонізація газів від дисоціації електролітів.
- 5(с). Поясніть, чому в альпіністів є таке правило: заночувавши високо в горах, всі металеві предмети потрібно класти подалі від табору.
- 6(д). Поясніть, чому у вологому приміщенні складно проводити дослід з електростатики, оскільки електроскоп погано заряджається і швидко втрачає наданий йому заряд.
- 7(в). Блискавка є переривчастим розрядом тривалістю 1 мс. Кількість заряду, який проходить по каналу, 20 Кл, а напруга дорівнює 2 ГВ. Визначте силу струму та потужність блискавки. Визначте енергію, яка виділяється при спалаху блискавки, якщо вона складається з 5 розрядів.

### Це цікаво

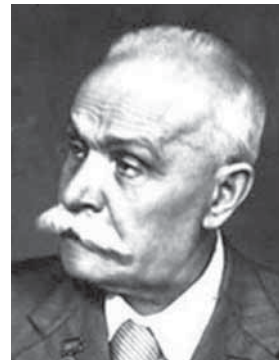
Україна має унікальні досягнення в галузі електрозварювання, які використовуються в усьому світі. Ця проблематика розробляється в Інституті електрозварювання Національної академії наук. Його фундатором та першим директором був академік Євген Оскарович Патон — відомий учений у галузі зварювальних процесів і мостобудування.

У 1930-х роках Є. О. Патон розвинув ідеї М. Бенардоса та створив метод швидкісного автоматичного зварювання під шаром флюсу, який дістав назву «метод Патона». У роки Другої світової війни розробив і впровадив технологію та обладнання для зварювання спеціальних сталей, зокрема, для танкових башт.

У 1953 р. ім'ям Є. О. Патона названо міст через Дніпро в Києві, який споруджувався під його керівництвом (рис. 35.10).

Науковцями Інституту електрозварювання, який очолює Борис Євгенович Патон, президент Національної академії наук України, розробляються актуальні науково-практичні проблеми.

Створено унікальні технології електрозварювання: «морого зварювання» (підводне зварювання трубопроводів високого тиску, ремонт корпусів морських суден на плаву, бурових платформ); зварювання нержавіючих сталей та титанових сплавів в умовах космічного вакууму та невагомості; технологія наплавлювання тонкоплівкових покриттів в умовах орбітального польоту; зварювання у відкритому космосі за допомогою універсального електронно-променевого приладу; розроблення зварних конструкцій, що розгортаються у відкритому космосі (рис. 35.11).



Є. О. Патон  
(1870—1953)  
Всесвітньо відомий  
учений в галузі  
електрозварювання



Б. Є. Патон (нар. 1918)  
Президент  
Національної академії  
наук України



Рис. 35.10. Міст Патона в Києві



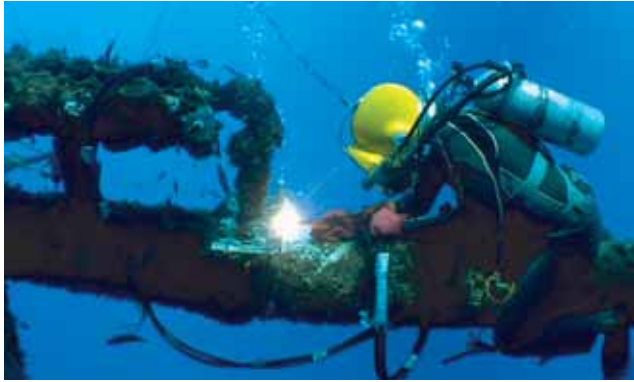


Рис. 35.11. Досягнення вітчизняного електрозварювання

Сьогодні перспективними напрямками діяльності інституту є наноструктурні системи, нанотехнології та нономатеріали.

### ВЧИМОСЯ РОЗВ'ЯЗУВАТИ ФІЗИЧНІ ЗАДАЧІ З ТЕМИ «ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ»

У фізичних задачах на електричний струм у різних середовищах переважно розглядається явище електролізу та його застосування. Звертаємо вашу увагу, що закони постійного струму (закон Ома, послідовного та паралельного з'єднання провідників, робота та потужність електричного струму) можна застосовувати під час розв'язування задач, пов'язаних із проходженням електричного струму через розчини чи розплави електролітів.

Пам'ятайте також про те, що не завжди є потреба переводити одиниці вимірювання фізичних величин у СІ, наприклад, електрохімічний еквівалент можна вимірювати в мг/Кл, тоді маса речовини визначатиметься також у мг.

**Задача 1.** Сила струму в електролітичній ванні 0,5 А. Визначте масу цинку яка виділиться при електролізі за 10 хв.

Дано:

$$k = 0,34 \text{ мг/Кл}$$

$$I = 0,5 \text{ А}$$

$$t = 10 \text{ хв} = 600 \text{ с}$$

$$m = ?$$

Розв'язок

Скориставшись таблицею, визначимо електрохімічний еквівалент та масу цинку за першим законом електролізу:  $m = kIt$ ;

$$m = 0,34 \frac{\text{мг}}{\text{Кл}} \cdot 0,5 \text{ А} \cdot 600 \text{ с} = 102 \text{ мг.}$$

**Відповідь:**  $m = 0,102 \text{ г.}$

**Задача 2.** У електролітичній ванні за 20 хв виділилося 1,98 г міді. Визначте електричну потужність, що витрачається на нагрівання електроліту. Опір розчину ванни становить 0,8 Ом.



Дано:

$$t = 20 \text{ хв} = 1200 \text{ с}$$

$$m = 1,98 \text{ г} =$$

$$= 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$R = 0,8 \text{ Ом}$$

$$k = 0,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

 $P = ?$ 
*Розв'язок*

Застосуємо закони постійного струму: потужність електричного струму розрахуємо за формулою

$$P = IU = I^2 R.$$

Силу струму можна визначити за першим законом електролізу

$$m = kIt \Rightarrow I = \frac{m}{kt};$$

$$I = \frac{1,98 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{0,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot 1200 \text{ с}} = 5 \text{ А}.$$

Обчислимо потужність електричного струму:

$$P = (5 \text{ А})^2 \cdot 0,8 \text{ Ом} = 20 \text{ Вт}.$$

**Відповідь:**  $P = 20 \text{ Вт}$ .

**Задача 3.** Послідовно з електролітичною ванною, заповненою сіллю нікелю, з'єднана ванна, в якій містяться солі хрому. Скільки хрому виділилося у другій ванні, якщо в першій ванні після розмикання кола виділилося 10 г нікелю?

Дано:

$$m_1 = 10 \text{ г}$$

$$k_1 = 0,3 \text{ мг/Кл}$$

$$k_2 = 0,18 \text{ мг/Кл}$$

 $m_2 = ?$ 
*Розв'язок*

Електролітичні ванни з'єднані послідовно, тому електричний заряд, який проходить по розчинах, однаковий.

Запишемо закон електролізу для розчинів  $m_1 = k_1 q$ ;  $m_2 = k_2 q$ ; розв'яжемо спільно:

$$\frac{m_1}{k_1} = \frac{m_2}{k_2} \Rightarrow m_2 = \frac{m_1 \cdot k_2}{k_1};$$

електрохімічні еквіваленти нікелю і хрому за таблицею:

$$m_2 = \frac{10 \text{ г} \cdot 0,3 \text{ мг/Кл}}{0,18 \text{ мг/Кл}} = 16,7 \text{ г}.$$

Для спрощення розрахунків ми не перетворювали одиниці фізичних величин у СІ.

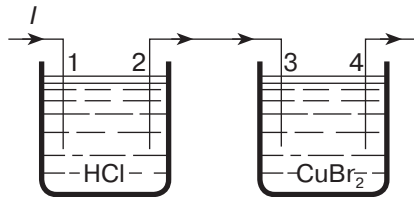
**Відповідь:** 16,7 г.

**ВИЯВЛЯЄМО ПРЕДМЕТНУ КОМПЕТЕНТНІСТЬ  
З ТЕМИ «ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ  
У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ»**

- 1(п).** Електричним струмом в електролітах називають спрямований рух:
- А) електронів;
  - Б) атомів;
  - В) позитивних і негативних йонів;
  - Г) йонів і електронів.
- 2(п).** Прикладом самостійного газового розряду є:
- А) веселка;
  - Б) грім;
  - В) блискавка;
  - Г) світіння електричної лампочки.
- 3(п).** Електричним струмом у газах називають спрямований рух:
- А) електронів;
  - Б) атомів;
  - В) йонів;
  - Г) позитивних, негативних йонів і електронів.
- 4(п).** У нормальному стані повітря є:
- А) провідником електричного струму;
  - Б) діелектриком;
  - В) напівпровідником;
  - Г) електролітом.
- 5(п).** Масу речовини, яка виділяється при електролізі, можна визначити за формулою:
- А)  $m = \rho V$ ;
  - Б)  $m = \frac{F}{g}$ ;
  - В)  $m = kIt$ ;
  - Г)  $m = \frac{E}{gh}$ .
- 6(п).** Визначте правильне продовження речення «З підвищенням температури електричний опір...»:
- А) збільшується тільки у газів;
  - Б) збільшується тільки в електролітів;
  - В) зменшується у газів і електролітів;
  - Г) зменшується тільки в електролітів.
- 7(п).** Укажіть правильне продовження речення «Процесом одержання копії різних металевих предметів за допомогою електролізу є...»:
- А) гальваностегія;
  - Б) гальванізм;

- В) рафінування металів;  
Г) гальванопластика.
- 8(с). Сила струму в електролітичній ванні 0,5 А. Визначте масу срібла, яка виділиться під час електролізу за 10 хв. Електрохімічний еквівалент срібла 1,12 мг/Кл:
- А) 0,056 г;  
Б) 0,336 г;  
В) 560 мг;  
Г) 33,6 мг.
- 9(с). У процесі електролізу з водяного розчину хлориду заліза виділилося 560 мг заліза. Який заряд пройшов через електролітичну ванну? Електрохімічний еквівалент 0,2 мг/Кл:
- А) 28 Кл;  
Б) 280 Кл;  
В) 2800 Кл;  
Г) 28 000 Кл.
- 10(с). Установіть відповідність між видом газового розряду та його проявом чи застосуванням:
- |            |                            |
|------------|----------------------------|
| 1 тліючий  | А лампи розжарювання       |
| 2 іскровий | Б різання металів          |
| 3 коронний | В блискавка                |
| 4 дуговий  | Г лампи денного світла     |
|            | Д свічення на шпильях башт |
- 11(д). Установіть відповідність між номером електроду та речовиною що осідатиме при проходженні електричного струму через зазначені на малюнку розчини?

- |   |   |               |
|---|---|---------------|
| 1 | А | $_2\text{H}$  |
| 2 | Б | $_2\text{Cl}$ |
| 3 | В | $_2\text{Br}$ |
| 4 | Г | Br            |
|   | Д | Cu            |



- 12(д). Визначте час, за який на катоді електролітичної ванни виділиться 50 г хрому, якщо електроліз проходить при силі струму 25 А? Електрохімічний еквівалент хрому дорівнює 0,2 мг/Кл.
- 13(в). Визначте витрати електроенергії на отримання кожної тонни металу, якщо електроліз відбувається за напруги 850 В, та розташуйте витрати у порядку їх зменшення:
- А) алюміній;  
Б) мідь;  
В) нікель;  
Г) срібло.

- 14(в). В електролітичній ванні за 10 хв виділилося 0,33 г міді. Опір розчину мідного купоросу становить 3,6 Ом. Визначте потужність струму, який проходить через розчин. Електрохімічний еквівалент міді дорівнює 0,33 мг/Кл.
- 15(в). Деталь із площею поверхні 45 см<sup>2</sup> необхідно вкрити шаром нікелю завтовшки 0,3 мм. При цьому сила струму в електролітичній ванні становить 8,9 А. Визначте час, витрачений на покриття деталі за таких умов. Густина нікелю 8900 кг/м<sup>3</sup>. Електрохімічний еквівалент нікелю дорівнює 0,3 мг/Кл. Відповідь подайте в секундах.

### § 36. Вплив електричного струму на організм людини

- ▶ *Електричні струми та напруги в техніці й побуті*
- ▶ *Особливості дії електричного струму на організм людини*
- ▶ *Правила безпеки людини під час роботи з електричними приладами та пристроями*

#### ЕЛЕКТРИЧНІ СТРУМИ ТА НАПРУГИ В ТЕХНІЦІ Й ПОБУТІ.

Електрика є одним із найпоширеніших видів енергії, що застосовується в техніці, на виробництві та побуті. Використовуються різноманітні джерела електричного струму, що створюють напругу від кількох вольт (як, наприклад, гальванічні елементи) до сотень і тисяч кіловольт (промислові генератори) (рис. 36.1). Робоча напруга процесора сучасного комп'ютера становить близько 1,5 В. У електричній мережі будинків застосовується струм від генераторів, що створюють напругу 220 В. Від електростанцій електричний струм передається по високовольтних лініях, розрахованих на 500 і більше кВ. Більшість побутових приладів працюють від мережі 220 В.

Різні побутові прилади споживають електричний струм різної величини. У сучасному побуті широко використовуються пристрої, які споживають порівняно невеликий струм (наприклад,



1,5 В



220 В



500 000 В

Рис. 36.1. Напруга в технічних і побутових пристроях



Рис. 36.2. Сила струму електропобутових пристроїв

електричні лампи), а також потужні електричні прилади, такі як обігрівачі, водонагрівачі, пилососи, пральні машини (рис. 36.2).

Величина струму в різних споживачах електричної енергії має важливе значення для їх правильної та безпечної експлуатації, використання відповідних електричних мереж та запобіжників.

**ОСОБЛИВОСТІ ДІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ.** Із § 23 ви знаєте, що електричний струм чинить фізіологічну дію, тобто впливає на живі організми. Оскільки на організм людини впливає саме електричний струм, потрібно дотримуватися правил безпеки навіть під час роботи з порівняно низькими напругами. Фізіологічна дія електричного струму залежить від тривалості впливу на організм людини.

Найчастіша причина ураження людини електричним струмом — *торкання до неізольованих струмопровідних провідників; до провідників із пошкодженою ізоляцією, а також до металевих елементів конструкції машин, механізмів і апаратів, які випадково опинилися під напругою.*

Дія електричного струму на людину має чотири основні особливості:

1) відсутність зовнішніх ознак загрозової небезпеки враження електричним струмом (людина не може побачити, почути, відчути чи якимось іншим чином завчасно виявити можливість ураження);

2) складність електротравм і, як наслідок, втрата працездатності та можливий смертельний випадок;

3) струми силою 10—25 мА промислової частоти (50 Гц) можуть спричинити інтенсивні судоми м'язів, унаслідок чого відбувається так зване приковування до струмопровідних частин, коли людина в цьому випадку не може самостійно звільнитися від дії електричного струму;

4) можливість подальшого механічного травмування, наприклад, коли людина працювала на висоті, була уражена електрострумом, знепритомніла і впала.

Дія електричного струму на живу тканину має своєрідний та різнобічний характер. *Проходячи через тіло людини, електрич-*

*ний струм виявляє термічну, електролітичну, механічну та біологічну дію.*

*Термічна дія струму* виявляється в опіках окремих ділянок тіла, нагріву до високої температури кровоносних судин, нервів, серця, мозку та інших органів, які перебувають на шляху струму, що викликає в них суттєві розлади.

*Електролітична дія струму* втілюється в розкладанні органічної рідини, у тому числі крові, що супроводжується значними змінами її складу, а також тканини в цілому.

*Механічна дія струму* виявляється в розшаруванні, розриві та інших подібних пошкодженнях різних тканин організму, в тому числі м'язової тканини, стінок кровоносних судин та судин легеневої тканини тощо, внаслідок електродинамічного ефекту, а також миттєвого вибухоподібного утворення пари від перегрітої струмом тканинної рідини та крові.

*Біологічна дія струму* є специфічним процесом, що виявляється в подразненні та збудженні живих тканин організму, а також у порушенні внутрішніх біоелектричних процесів, пов'язаних із життєвими функціями організму.

Змінний струм промислової частоти людина починає відчувати при 0,6—15 мА. Струм 12—15 мА викликає сильні болі в пальцях і кистях. Людина витримує такий стан 5—10 с і може самостійно відірвати руки від електродів. Струм 20—25 мА спричиняє дуже сильний біль, руки паралізуються, дихання утруднюється; людина не може самостійно звільнитися від електродів. При струмі 50—80 мА настає параліч дихання, а при 90—100 мА — параліч серця і смерть.

Найнебезпечніший — змінний струм частотою 50—60 Гц. Зі збільшенням частоти струми починають поширюватися по поверхні шкіри, викликаючи сильні опіки, але не призводячи до електричного удару.

Менш чутливе людське тіло до постійного струму. Величина струму, що проходить через тіло людини, залежить від опору тіла та прикладеної напруги. Тому для встановлення межі безпечних умов орієнтуються не на величину струму, а на допустимо *безпечну напругу*. Залежно від навколишніх умов її приймають на рівні 12...42 В.

При сухій непошкодженій шкірі опір людського тіла електричному струму дорівнює 40 000—100 000 Ом. *Пам'ятайте, що опір людського тіла зменшується зі збільшенням часу дії струму. Тому дуже важливо швидко усунути контакт потерпілого зі струмопровідними частинами.*



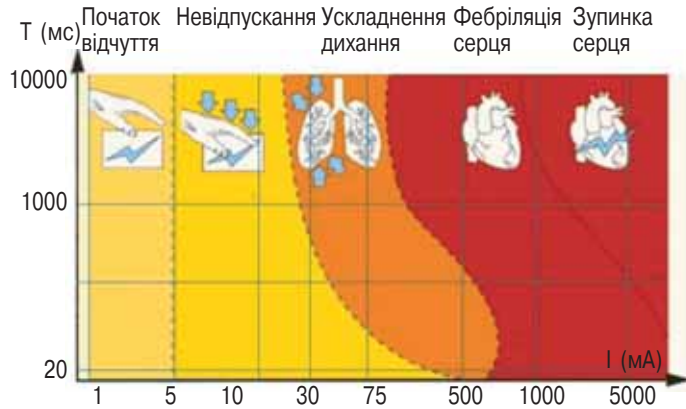


Рис. 36.3. Вплив електричного струму на організм людини

Результат ураження багато в чому залежить також від шляху струму в тілі людини. *Найнебезпечніші шляхи руки — ноги і рука — рука*, коли найбільша частина струму проходить через серце.

Потрібно обов'язково пам'ятати, що людський організм уражає не напруга, а величина струму. *Величина струму, який протікає через тіло людини*, є головним чинником, що визначає наслідок ураження: чим більший за величиною струм, тим небезпечніша його дія. Прийнято вважати смертельно небезпечним для людини струм промислової частоти 50 Гц і величиною 0,05 А (50 мА).

При дії електричного струму більше 1 с безпечним вважається змінний електричний струм не більше 6 мА напругою 36 В, постійний електричний струм не більше 15 мА напругою 40 В. Змінний електричний струм 0,6—1,5 мА вже є пороговим для людини, починаються відчуття слабого свербіння та пощипування (рис. 36.3).

Зважаючи на те, що електричний струм небезпечний для людини, потрібно суворо дотримуватися правил безпеки під час роботи у фізичній лабораторії та використання побутових електроприладів.

*У всіх випадках ураження електричним струмом, незалежно від стану потерпілого, виклик лікаря обов'язковий!*

**ПРАВИЛА БЕЗПЕКИ ЛЮДИНИ ПІД ЧАС РОБОТИ З ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПРИЛАДАМИ ТА ПРИСТРОЯМИ.** Кожного дня ви користуєтеся електричними приладами, які вмикаються в мережу. Ви вже знаєте, що дія електричного струму на людину може призводити до електричних травм і пошкоджень, таких як скорочення м'язів, що супроводжується сильним болем, втратою свідомості, порушенням роботи серця чи дихання (або обома цими порушеннями разом). Іноді трапляються нещасні випадки

від дії електричного струму, які спричиняють смерть людини. *Електротравми умовно можна поділити на два види: місцеві, коли виникає локальне пошкодження організму, й загальні, так звані електричні удари, коли уражається весь організм, що може спричинити смерть людини.*

Щоб уникнути багатьох неприємностей, достатньо завжди пам'ятати **правила поведінки з електричними приладами** та дотримуватись їх:

- ▶ Електронагрівальні прилади, такі як електрочайник, електросамовар, електропраска, електрокамін та ін., потрібно вмикати в електромережу справними.
- ▶ Якщо ви дивитесь телевизор, а екран погас або почав мерехтіти, у жодному разі не можна по ньому стукати. Він може загорітися або навіть вибухнути. Телевізор потрібно негайно вимкнути.
- ▶ Не можна торкатися увімкнутих електроприладів сторонніми предметами.
- ▶ Переважна більшість побутових електроприладів є переносними, тому може виникати пошкодження ізоляції з'єднувальних провідників (рис. 36.4, а). Також електричний дріт може обірватися чи оголитися. У таких випадках у жодному разі не торкайся оголених місць, бо це може призвести до травми.
- ▶ Не залишайте без нагляду увімкнені в електромережу прилади.
- ▶ Забороняється тягнути за електричний дріт руками, тому що він може обірватися й уразити електричним струмом (рис. 36.4, б).

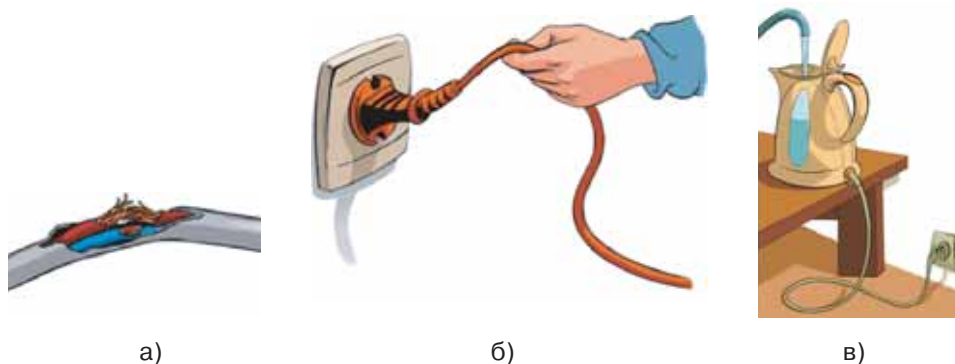


Рис. 36.4. Правила поведінки з електричними приладами та пристроями:  
а) не торкайся оголених провідників у місцях пошкодження ізоляції;  
б) забороняється тягнути за електричний шнур руками;  
в) не можна заповнювати водою увімкнені в електромережу електронагрівальні прилади

- ▶ Не можна заповнювати водою увімкнені в електромережу чайники, кавоварки.
- ▶ Не торкайтеся мокрими руками та не витирайте вологою ганчіркою електричні кабелі, штепсельні розетки, вимикачі, інші електроприлади, увімкнені в електромережу.
- ▶ Не можна підвішувати речі на кабелі.
- ▶ Не можна бавитися зі штепсельними розетками — це загрожує життю.
- ▶ Коли йдете з дому — всі електроприлади мають бути вимкнені.

Використання електричних приладів не за призначенням або невміле користування ними може призвести до *пожежі!*

Якщо вже так сталося, що електричне обладнання загорілося, то передусім потрібно:

- ▶ вимкнути автоматичний запобіжник (обов'язково поцікавтеся, де знаходяться автоматичні запобіжники, та навчіться ними користуватися!). Якщо знеструмити електромережу неможливо, то слід пам'ятати: не можна застосовувати для гасіння воду та пінні вогнегасники, можна лише порошкові. Терміново **телефонуйте за номером 101** і викликайте пожежників на допомогу.

Якщо електроприлад зайнявся, слід діяти за такою схемою:

- ▶ обмотайте руку сухою ганчіркою, висмикніть вилку з розетки;
- ▶ накрийте палаючий предмет ковдрою;
- ▶ повідомте дорослих про пожежу.

Під час прогулянки **ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ**:

- ▶ підходити до оголених дротів і чіпати їх руками;
- ▶ розводити багаття, запускати повітряних зміїв під лініями електропередачі;
- ▶ гратись поблизу підстанцій.

*Якщо не забувати ці прості правила, то можна уникнути багатьох неприємностей.*

*Пам'ятайте, несправності в електромережі й електричних приладах може усунути лише спеціаліст-електрик!*

### **Головне в цьому параграфі**

Найчастіша причина ураження людини електричним струмом — торкання до неізольованих струмопровідних провідників, до провідників із пошкодженою ізоляцією, а також до металевих елементів конструкції машин, механізмів і апаратів, які випадково опинилися під напругою.

Величина струму, який протікає через тіло людини, є головним чинником, що визначає наслідок ураження: чим більший за величиною струм, тим небезпечніша його дія.

Щоб уникнути багатьох неприємностей, вам достатньо завжди пам'ятати та дотримуватись правил поведження з електричними приладами.

У разі займання електричного обладнання насамперед потрібно його знеструмити та викликати пожежників.

Не можна підходити до оголених дротів і торкатися їх руками.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Які особливості дії електричного струму на людину?
2. Які особливості дії струму на живу тканину?
3. Від чого залежить дія струму на організм людини?
4. Чому важливо швидко усунути контакт потерпілого зі струмопровідними частинами?
5. Які найнебезпечніші шляхи струму через організм людини?
6. Які основні правила поведження з електричними приладами?
7. Що потрібно робити під час займання електроприладів?

### **Вправа до § 36**

- 1(п). Чому вкрай небезпечно торкатися до оголених дротів електромережі, коли взуття і ґрунт під ногами мокрі?
- 2(п). Якщо торкатися рукою до контактів батарейки кишенькового ліхтаря, то людина нічого не відчуває, але, замкнувши контакти язиком, відчувається пощипування. Поясніть, чому.
- 3(п). Відомо що деревина — це ізолятор. За яких умов деревина стає провідником електрики?
- 4(п). Відомо, що людина — провідник електричного струму. За яких умов тіло людини має більший електричний опір?

### **ВИКОНУЄМО НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЕКТ РАЗОМ**

За темою «Електричний струм» вам пропонується підготувати навчальний проект, який висвітлюватиме одне з питань: сучасні джерела електричного струму; використання матеріалів високої провідності та великого опору; освітлювальні лампи та екологічні, медичні, економічні аспекти їх використання; застосування електролізу для отримання алюмінію, вплив електричного струму на організм людини.

## Головне в розділі 2

1. Електричний заряд — це фізична величина, яка характеризує властивості фізичних тіл або частинок речовини вступати в електромагнітну взаємодію.

Одиницею електричного заряду в СІ є кулон (Кл), тобто  $[q] = \text{Кл}$ .

2. Однойменні заряди відштовхуються, а різнойменні притягуються.

3. Процес набуття тілом електричного заряду називають електризацією.

Якщо атом втрачає частину електронів, то при цьому він перетворюється на позитивно заряджену частинку — позитивний іон. Якщо ж атом набуває надлишкових електронів, то перетворюється на негативний іон.

4. Повний (сумарний) електричний заряд тіл, які утворюють замкнену систему, залишається сталим:

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

Значення електричного заряду електрона становить

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

5. Закон Кулона: сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів прямо пропорційна чисельному значенню добутку цих зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними та напрямлена вздовж прямої лінії, що з'єднає ці заряди:

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

де  $|q_1|$ ,  $|q_2|$  — модулі зарядів;  $r$  — відстань між точковими зарядами;  $k$  — коефіцієнт пропорційності, значення якого залежить від обраної системи одиниць. У СІ коефіцієнт пропорційності в законі Кулона:

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

6. Електричне поле — це особлива форма матерії, що існує навколо заряджених тіл або частинок і діє з певною силою на інші частинки або тіла, що мають електричний заряд.

7. Провідниками називають речовини, які мають заряджені частинки, що здатні рухатися по всьому об'єму тіла.

8. Діелектриками, або ізоляторами, називають речовини, які за певних умов не мають вільних носіїв електричного заряду.

9. Напівпровідниками називають речовини, що за провідністю посідають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Носіями електричного заряду в напівпровідниках є електрони і дірки.

10. Електричним струмом називають упорядкований (напрямлений) рух заряджених частинок.

Умови існування електричного струму: наявність вільних носіїв електричного заряду й електричного поля.

11. За напрям електричного струму приймають напрям руху позитивно заряджених частинок, тобто напрям від позитивно зарядженого полюса джерела струму до негативно зарядженого.

12. Джерела електричного струму — це пристрої, в яких відбувається перетворення різних видів енергії (механічної, хімічної, теплової, енергії електромагнітного випромінювання) в електричну.

13. Основними діями електричного струму є тепла, хімічна, магнітна, світлова та фізіологічна.

14. Електричне коло утворюють джерело струму, споживачі електричної енергії, пристрої для вмикання та вимикання електричного струму, електровимірювальні пристрої, з'єднані між собою за допомогою провідників.

15. Силою струму  $I$  називається фізична величина, що характеризує електричний струм у колі й дорівнює відношенню електричного заряду  $q$ , який пройшов через поперечний переріз провідника, до часу його проходження:

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

За одиницю сили струму приймають 1 А.

16. Електричний опір — це фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти проходженню електричного струму. За одиницю опору приймають 1 Ом.

17. Закон Ома для ділянки кола: сила струму в однорідній ділянці кола прямо пропорційна напрузі на кінцях цієї ділянки та обернено пропорційна її опору:

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

18. Електричний опір прямо пропорційний довжині провідника, обернено пропорційний площі його поперечного перерізу й залежить від речовини провідника:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}.$$



19. При послідовному з'єднанні елементів виконуються такі залежності:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n; \quad U = U_1 + U_2 + \dots + U_n; \quad R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При паралельному з'єднанні елементів виконуються такі залежності:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n; \quad I = I_1 + I_2 + \dots + I_n; \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

20. Робота електричного струму на ділянці кола дорівнює добутку сили струму, напруги на цій ділянці та часу впродовж якого виконувалася ця робота:

$$A = IUt.$$

21. Потужність струму можна також обчислити за однією з формул:

$$P = \frac{A}{t}, \quad P = IU, \quad P = I^2R, \quad P = \frac{U^2}{R}.$$

У СІ одиницею потужності є ват (Вт).

22. На практиці для вимірювання роботи струму широко використовується позасистемна одиниця — кіловат-година (кВт · год):  
1 кВт · год =  $3,6 \cdot 10^6$  Дж.

23. Кількість теплоти, яка виділяється провідником з електричним струмом дорівнює добутку квадрата сили струму, опору провідника і часу проходження струму (закон Джоуля — Ленца):

$$Q = I^2R\Delta t.$$

24. Речовини, розчини й розплави яких проводять електричний струм, називають електролітами.

25. Закон Фарадея: маса речовини, яка виділилась на електроді під час електролізу, прямо пропорційна силі струму та часу, проходження струму через електроліт:

$$m = kq; \quad m = kIt.$$

26. Електрохімічний еквівалент  $k$  чисельно дорівнює масі речовини в кілограмах, яка виділяється під час проходження 1 Кл електрики.

27. Процес проходження електричного струму через газ називають газовим розрядом. Носіями електричного заряду в газах є йони і електрони.

# Лабораторні роботи

## Як оцінити точність вимірювання та обчислити похибку

Вимірювання фізичних величин завжди виконуються з певною точністю, тобто наближено або з похибкою. Похибка вимірювань характеризує ступінь наближення показів приладу до істинних значень вимірюваної величини. Є різні способи оцінювання похибок вимірювань. Оцінюючи результати вимірювання, ми будемо користуватися поняттями абсолютної та відносної похибки.

У процесі оцінювання та запису результатів вимірювання пропонуємо дотримуватися таких правил:

1. При прямих вимірюваннях фізичної величини приладом визначаємо абсолютну похибку. Складовою похибки вимірювання є абсолютна інструментальна похибка, зумовлена властивостями засобу вимірювання. Максимально можлива абсолютна похибка дорівнює ціні найменшої поділки шкали приладу, за умови, що значення фізичної величини не збігається з позначкою шкали або коливається; дорівнює половині ціни поділки, якщо показчик збігається з позначкою шкали.

2. При розрахунках фізичних величин користуються правилами наближених обчислень, зокрема округлення: якщо перша відкинута цифра дорівнює 5 або більша за 5, то останню із залишених цифр збільшують на одиницю; якщо перша відкинута цифра менша ніж 5, то останню із залишених цифр не змінюють, наприклад

$$24,5 \approx 25; 24,4 \approx 24; 1455 \approx 1500; 144 \approx 140.$$

3. Для оцінки точності будь-яких вимірювань користуються поняттям відносної похибки  $\varepsilon$ , яка дорівнює відношенню абсолютної похибки до наближеного значення вимірюваної величини:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_c} \cdot 100\% \Rightarrow \Delta A = \varepsilon A_c;$$

де  $\Delta A$  — абсолютна похибка вимірюваної величини;  
 $A_c$  — середнє числове значення вимірюваної величини;  
 $\varepsilon$  — відносна похибка.

4. Кінцевий результат вимірювання має бути записано у вигляді:

$$A = A_c \pm \Delta A;$$

5. При визначенні фізичних величин точність вимірювань і обчислень можна забезпечувати, порівнюючи виміряні й обчислені значення з табличними даними. Наприклад, табличне значення густини сталі (твердого тіла)  $\rho_t = 7,8 \text{ г/см}^3$ , а одержане експериментальне значення густини  $\rho_e = 7,6 \text{ г/см}^3$ . Тоді абсолютна похибка вимірювань може бути визначена як  $\Delta\rho = \rho_t - \rho_e$ ;  $\Delta\rho = |7,8 - 7,6| = 0,2 \text{ (г/см}^3\text{)}$ . Оскільки кінцевий результат маємо записувати у вигляді  $\rho = \rho_e \pm \Delta\rho$ , то  $\rho = 7,6 \pm 0,2 \text{ (г/см}^3\text{)}$

(Відносну похибку розраховують так:  $\varepsilon = \frac{\Delta\rho}{\rho_m} \cdot 100 \%$ .)

## Лабораторна робота № 1

### Вивчення теплового балансу під час змішування води різної температури

**Мета роботи:** розвиток експериментальних умінь досліджувати теплові процеси, уміння визначати кількість теплоти, відданої гарячою водою й отриманої холодною під час теплообміну.

**Прилади та обладнання:** терези, різноваги, калориметр, мензурка, термометр, склянка.

#### Хід роботи

1. За допомогою терезів визначте масу внутрішньої посудини калориметра. Вставте його в зовнішню посудину.

2. Налийте в калориметр гарячу воду масою 100 г, а в склянку — стільки ж холодної. Зачекайте 1—2 хв і виміряйте температуру холодної та гарячої води.

3. Обережно влийте холодну воду в посудину з гарячою водою і виміряйте температуру суміші. Запишіть покази термометра в таблицю.

Маса гарячої води $m_1$ , кг	Маса внутрішньої посудини калориметра $m_a$ , кг	Початкова температура гарячої води і калориметра, $t_1$ , °C	Температура суміші $t$ , °C	Кількість теплоти, віддана гарячою водою $Q_1$ , Дж	Кількість теплоти, віддана калориметром $Q_2$ , Дж	Маса холодної води $m_2$ , кг	Початкова температура холодної води $t_2$ , °C	Кількість теплоти, отримана холодною водою $Q_3$ , Дж

4. Вважаючи систему теплоізолюваною, запишіть рівняння теплового балансу:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3, \quad (1)$$

де  $Q_1$  — кількість теплоти, отримана холодною водою під час її нагрівання до температури теплової рівноваги;

$Q_2$  — кількість теплоти, яку віддала гаряча вода, що була в калориметрі, під час охолодження до температури теплової рівноваги;

$Q_3$  — кількість теплоти, яку віддав стакан калориметра під час охолодження його до температури теплової рівноваги.

5. Розрахуйте кількість теплоти, отриману холодною водою при її нагріванні до температури теплової рівноваги:  $Q_1 = cm_2(t - t_2)$ , а також кількість теплоти, віддану гарячою водою і калориметром під час їх охолодження до температури теплової рівноваги (температури суміші):

$$Q_2 = cm_1(t_1 - t);$$

$$Q_3 = c_a m_a(t_1 - t).$$

6. Підставте вирази  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  у формулу (1) та перевірте виконання рівняння теплового балансу. Результати обчислень запишіть до таблиці.

7. Розрахуйте похибку вимірювань:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta m}{m_1} + \frac{\Delta t}{t_1}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta m}{m_a} + \frac{\Delta t}{t_1}; \quad \varepsilon_3 = \frac{\Delta m}{m_2} + \frac{\Delta t}{t_2}. \quad (2)$$

8. Визначте абсолютну похибку вимірювань:

$$\Delta Q_1 = \varepsilon_1 Q_1; \quad \Delta Q_2 = \varepsilon_2 Q_2; \quad \Delta Q_3 = \varepsilon_3 Q_3. \quad (3)$$

9. Запишіть результати вимірювань:

$$Q_{\text{від}} = (Q_1 + Q_2) \pm (\Delta Q_1 + \Delta Q_2); Q_{\text{отр}} = Q_3 \pm \Delta Q_3.$$

10. Порівняйте кількість теплоти, відданої гарячою водою і калориметром, з кількістю теплоти, отриманої холодною водою, та зробіть висновки.

## Лабораторна робота № 2

### Визначення питомої теплоємності речовини

**Мета роботи:** розвиток експериментальних умінь досліджувати теплові процеси, уміння визначати питому теплоємність речовини калориметричним способом.

**Прилади та обладнання:** склянка з водою, калориметр, термометр, терези, різноваги, металевий циліндр на нитці, посудина з гарячою водою.

#### Хід роботи

1. За допомогою терезів визначте масу внутрішньої посудини калориметра. Вставте її в зовнішню посудину.

2. Налийте в калориметр воду масою 100—150 г кімнатної температури. Виміряйте температуру води.

3. За допомогою терезів визначте масу металевого циліндра.

4. Занурте циліндр у ємність із гарячою водою дротяним гачком, потім занурте в гарячу воду термометр і дочекайтеся моменту встановлення теплової рівноваги (стовпчик термометра майже припинить рух). Виміряйте температуру води. У момент теплової рівноваги вона дорівнюватиме температурі циліндра.

5. Обережно вийміть нагрітий циліндр дротяним гачком і, не зволікаючи, занурте його у воду в калориметрі.

6. Дочекайтеся моменту настання теплової рівноваги. Виміряйте температуру води в калориметр після занурення в неї циліндра.

Результати вимірювань запишіть до таблиці:

Маса внутрішньої посудини калориметра $m_a$ , кг	Маса води в калориметрі $m_1$ , кг	Початкова температура води в калориметрі $t_1$ , °C	Маса циліндра $m_2$ , кг	Початкова температура циліндра $t_2$ , °C	Температура теплової рівноваги води в калориметрі та циліндра $t$ , °C

7. Вважаючи систему теплоізолюваною, запишемо рівняння теплового балансу:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3,$$

де  $Q_1$  — кількість теплоти, яку отримав калориметр під час нагрівання;

$Q_2$  — кількість теплоти, яку отримала вода в калориметрі під час нагрівання;

$Q_3$  — кількість теплоти, віддана металевим циліндром під час охолодження.

Запишемо вирази для обчислення кількості теплоти  $Q_1$ ,  $Q_2$  та  $Q_3$ :

$$Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1),$$

$$Q_2 = c_a m_a (t - t_1),$$

$$Q_3 = c_2 m_2 (t_2 - t).$$

Підставимо їх у рівняння теплового балансу. В результаті одержимо рівняння з однією невідомою  $c_2$ :

$$c_1 m_1 (t - t_1) + c_a m_a (t - t_1) = c_2 m_2 (t_2 - t).$$

Розв'язавши його відносно невідомої  $c_2$ , одержимо:

$$c_2 = \frac{(c_1 m_1 + c_a m_a)(t - t_1)}{m_2 (t_2 - t)}.$$

8. Підставте у формулу для визначення  $c_2$  значення фізичних величин, виміряні під час досліду, та обчисліть питому теплоємність речовини, з якої виготовлено циліндр.

9. Порівняйте отриманий результат із табличним і обчисліть абсолютну похибку з вимірів:

$$\Delta c_2 = |c_2 - c_{\text{таб}}|.$$

10. Обчисліть відносну похибку вимірювань:

$$\varepsilon = \frac{\Delta c_2}{c_{\text{таб}}}.$$

11. За результатами виконання лабораторної роботи зробіть висновки.



## Лабораторна робота № 3

### Вимірювання опору провідника за допомогою амперметра і вольтметра

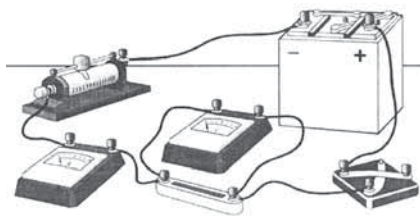
**Мета роботи:** розвиток експериментальних умінь досліджувати електричні кола, експериментальна перевірка закону Ома для ділянки кола.

**Прилади і матеріали:** джерело струму, резистор із нікеліновою спіраллю, амперметр, вольтметр, реостат, ключ, з'єднувальні провідники.

#### Хід роботи

1. Визначте ціну поділки шкал амперметра, вольтметра та абсолютну похибку амперметра  $\Delta I$  і вольтметра  $\Delta U$ .

2. Зберіть коло, з'єднавши поспідовно батарею елементів, амперметр, резистор, реостат (повзунок розташуйте біля верхньої клеми), ключ. До кінців досліджуваного провідника (резистора) приєднайте вольтметр. Накресліть схему зібраного вами кола.



3. Виміряйте амперметром силу струму в колі. За допомогою вольтметра виміряйте напругу на провіднику й занесіть результати вимірювань до таблиці:

Розташування повзунка реостата	Сила струму, А	Напруга, В	Опір, Ом
Біля верхньої клеми			
Посередині			
Біля нижньої клеми			

4. За допомогою реостата змініть опір кола, кожного разу вимірюйте силу струму в колі й напругу на досліджуваному провіднику, занесіть результати вимірювань до таблиці.

5. Використовуючи закон Ома, обчисліть опір провідника за даними кожного окремого вимірювання.

6. Розрахуйте відносну похибку вимірювань опору провідника, коли повзунок реостата перебував посередині.

$$\varepsilon = \frac{\Delta I}{I_n} + \frac{\Delta U}{U_n}. \quad (1)$$

7. Розрахуйте абсолютну похибку опору провідника  $\Delta R = \varepsilon R_n$ ; запишіть значення опору з урахуванням похибок

$$R = R_n \pm \Delta R. \quad (2)$$

8. За даними таблиці вимірювань накресліть графік залежності сили струму від напруги. З'єднайте останню точку перетину сили струму — напруги (значення для нижньої клема) з початком графіка 0.

9. Після побудови графіку візьміть точку на прямій (у середній частині графіка) визначте середні значення сили струму і напруги, що відповідають цій точці, обчисліть середнє значення опору

$$R_c = \frac{U_c}{I_c}. \quad (3)$$

10. Розрахуйте абсолютну похибку середнього значення опору провідника  $\Delta R_c = \varepsilon R_c$ ; запишіть середнє значення опору з урахуванням похибок

$$R = R_c \pm \Delta R_c; \quad (4).$$

11. Порівняйте значення опору з рівнянь: (2) та (4); зробіть висновки щодо залежності опору провідника від сили струму і напруги на його кінцях.

## Лабораторна робота № 4

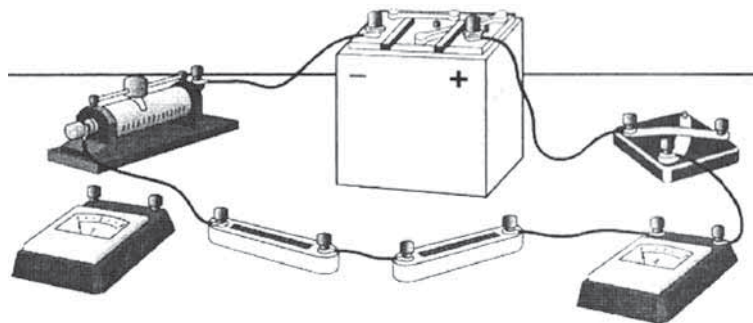
### Дослідження електричного кола з послідовним з'єднанням провідників

**Мета роботи:** розвиток експериментальних умінь досліджувати електричні кола, експериментальна перевірка закономірностей послідовного з'єднання провідників.

**Прилади і матеріали:** джерело струму, два резистори, амперметр, вольтметр, ключ, з'єднувальні провідники. Для регулювання струму в колі можна використовувати реостат.

#### Хід роботи

1. Складіть коло з джерела струму, реостата, двох провідників, амперметра, ключа, з'єднавши їх послідовно (рисунок).



2. Накресліть схему складеного вами кола і покажіть на ній, куди підключається вольтметр при вимірюванні напруги на кожній спіралі й на двох спіралях разом.

3. За допомогою амперметра виміряйте силу струму в колі.

4. Увімкнувши в коло вольтметр, виміряйте напругу па всій ділянці кола, що складається з двох провідників.

5. Виміряйте напругу на окремих провідниках.

6. За результатами вимірювань обчисліть опір усєї ділянки й провідників:

$$R = \frac{U}{I}; R_1 = \frac{U_1}{I}; R_2 = \frac{U_2}{I}.$$

7. Результати вимірювань і обчислень занесіть до таблиці:

Напруга на всій ділянці кола $U$ , В	Сила струму в колі $I$ , А	Опір усєї ділянки кола $R$ , Ом	Напруга на кінцях 1-го провідника $U_1$ , В	Опір 1-го провідника $R_1$ , Ом	Напруга на кінцях 2-го провідника $U_2$ , В	Опір 2-го провідника $R_2$ , Ом

8. Порівняйте опір усєї ділянки  $R$  кола із сумою опорів двох провідників

$$R_1 + R_2.$$

9. Порівняйте напругу на ділянці двох провідників  $U_3$  із сумою напруг на окремих провідниках  $U_1 + U_2$ .

10. Визначте похибки й порівняйте отримані результати з урахуванням похибок.

Обчисліть відношення  $\frac{U_1}{U_2}$  і  $\frac{R_1}{R_2}$ , відносні похибки ( $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ ) і абсолютні похибки ( $\Delta_1$  і  $\Delta_2$ ) вимірювань цих величин за формулами:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta U}{U_1} + \frac{\Delta U}{U_2},$$

$$\Delta_1 = \frac{U_1}{U_2} \varepsilon_1, \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta I}{I} + \varepsilon_1, \quad \Delta_2 = \frac{R_1}{R_2} \varepsilon_2.$$

(Ціна найменшої поділки шкали амперметра й вольтметра є абсолютною похибкою вимірювання сили струму  $\Delta I$  та напруги  $\Delta U$ .)

11. Зробіть висновок про справедливість закономірностей послідовного з'єднання провідників.

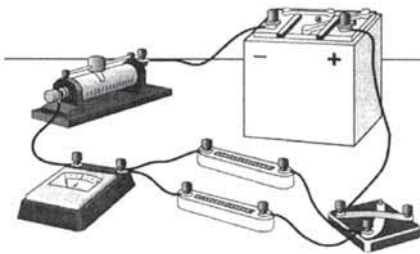
## Лабораторна робота № 5

### Дослідження електричного кола з паралельним з'єднанням провідників

**Мета роботи:** розвиток експериментальних умінь досліджувати електричні кола, експериментальна перевірка закономірностей паралельного та послідовного з'єднання провідників.

**Прилади і матеріали:** джерело струму, два резистори, амперметр, вольтметр, ключ, з'єднувальні провідники. Для регулювання струму в колі можна використовувати реостат.

#### Хід роботи



1. Складіть електричне коло з джерела струму, реостата, двох провідників, з'єднавши їх паралельно, амперметра і ключа (рисунки).

2. Накресліть схему складеного вами кола і покажіть на ній, куди підключається амперметр при вимірюванні сили струму на кожному резисторі й на двох резисторах разом.

3. Виміряйте напругу на кінцях провідників, з'єднаних паралельно.

4. Вмикаючи амперметр по черзі в основне коло й в окремі його ділянки, виміряйте силу струму в основному колі  $I$  і на ділянках  $I_1$  і  $I_2$ :

Результати вимірювань запишіть до таблиці:

Напруга на ділянці кола $U$ , В	Сила струму в колі $I$ , А	Опір усієї ділянки кола $R$ , Ом	Сила струму в першому розгалуженні $I_1$ , А	Опір першого провідника $R_1$ , Ом	Сила струму другому розгалуженні $I_2$ , А	Опір другого провідника $R_2$ , Ом

5. За отриманими даними обчисліть значення опору всієї ділянки  $R$  і окремих розгалужень  $R_1$  і  $R_2$ :

$$R = \frac{U}{I}; \quad R_1 = \frac{U}{I_1}; \quad R_2 = \frac{U}{I_2}.$$

6. Порівняйте суму сил струмів у окремих провідниках  $I_1 + I_2$  із силою струму в основному колі  $I$ .

7. Перевірте, чи підтверджується дослідом формула:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

8. Визначте похибки вимірювань і порівняйте отримані результати з урахуванням похибок.

Обчисліть відношення  $\frac{I_1}{I_2}$  і  $\frac{R_2}{R_1}$ , відносні ( $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ ) і абсолютні

( $\Delta_1$  і  $\Delta_2$ ) похибки вимірювань цих за формулами

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta I}{I_1} + \frac{\Delta I}{I_2}, \Delta_1 = \frac{I_1}{I_2} \varepsilon_1; \varepsilon_2 = \frac{\Delta U}{U} + \varepsilon_1, \Delta_2 = \frac{R_2}{R_1} \varepsilon_2.$$

(Ціна поділки шкали амперметра та вольтметра є абсолютною похибкою вимірювання сили струму  $\Delta I$  та напруги  $\Delta U$ .)

9. Зробіть висновок щодо закономірностей паралельного з'єднання провідників.

## Відповіді до вправ

### Відповіді до вправ з розділу «ТЕПЛОВІ ЯВИЩА».

Вправа до § 1. 5д.  $1,25 \cdot 10^6$ , 6д.  $2 \cdot 10^{27}$ .

Вправа до § 2. 6д.  $4 \cdot 10^9$  с. 7д.  $1/700$  якщо вважати, що проміжки між молекулами рідини нехтовно малі порівняно з проміжками між молекулами газу.

Вправа до § 3. 5д. приблизно в 1,4 рази. 6д. у 9 раз. 9в. Збільшилась приблизно в 1,17 раз. 10в. водню — 1912 м/с, води — 637 м/с.

Вправа до § 4. 1с. 0,5 м. 2с.  $96 \text{ }^\circ\text{C}$ . 3д. 200,14 м. 4д.  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . 5в. 99,73%

Вправа до § 7. 1п. 1 Дж. 2п. 5 Дж. 3с. 120 кДж. 4с. 300 Дж/ $^\circ\text{C}$ . 8в. I-глицерин, II-вода

Вправа до § 8. 3с. 7360 Дж. 4с. 4,5 т. 5д.  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . 6д. 343,14 кДж. 7в.  $9,8 \text{ }^\circ\text{C}$

Вправа до § 9. 1с.  $210 \text{ }^\circ\text{C}$ . 2с.  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . 3д. 0,5 кг. 4д. 380 Дж/(кг ·  $^\circ\text{C}$ ). 6в. 123,8 кг.

Вправа до § 10. 3с. 27 МДж. 4с. 150 кДж/кг (нафталін). 5д. 0,25 кг. 6д.  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ . 7в.  $19,1 \text{ }^\circ\text{C}$

### Виявляємо предметну компетентність з теми «Внутрішня енергія. Кількість теплоти»

#### Завдання з вибором однієї правильної відповіді

1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	В	Г	Б	В	В	Г	Г	Б

#### Завдання на встановлення відповідності

10д.

	1	2	3	4	5
А					×
Б	×				
В		×			
Г			×		

11д.

	1	2	3	4	5
А			×		
Б				×	
В		×			
Г	×				

#### Завдання на впорядкований вибір

12д. В-А-Б-Г

**Завдання відкритого типу**

**13в.** 860 Дж/(кг · °С) (скло, цегла). **14в.** 52 °С. **15в.** 4,5 кг

Вправа до § 13. **1с.** 12 МДж. **2с.** 0,83 кг. **3д.** 210 Дж. **4д.** 153 МДж.

**5в.** 30г.

**Виявляємо предметну компетентність з теми**

**«Пароутворення і конденсація»**

**Завдання з вибором однієї правильної відповіді**

1	2	3	4	5	6
А	А	Г	Б	В	Б

**Завдання на встановлення відповідності**

**7д.**

	1	2	3	4	5
А					×
Б		×			
В	×				
Г			×		

**8д.**

	1	2	3	4	5
А					
Б		×			
В	×				
Г				×	
Д			×		

**Завдання на впорядкований вибір**

**9д.** В-Б-Г-А

**Завдання відкритого типу**

**10в.** 16,1 год

Вправа до § 14. **3с.** 38 кДж. **4с.** 1,5 т. **5д.** 108 МДж. **6д.** 98,2 МДж.

**7в.** 95,7 МДж.

Вправа до § 15. **3с.** 28,7%. **4с.** 963 МДж. **5д.** 10%. **6д.** 33%.

**7в.** 25%.

Вправа до § 16. **3с.** 10%. **4с.** 31 кг. **5в.** 28,5 кВт

**Виявляємо предметну компетентність з теми**

**«Розрахунок кількості теплоти внаслідок згорання палива.**

**Теплові машини»**

**Завдання з вибором однієї правильної відповіді**

1	2	3	4	5	6	7	8
В	В	В	Г	Г	Г	Г	В



**Завдання на встановлення відповідності**

9д.

	1	2	3	4	5
А		×			
Б			×		
В	×				
Г				×	

10д.

	1	2	3	4	5
А			×		
Б				×	
В		×			
Г	×				

**Завдання на впорядкований вибір**

11д. А-В-Г-Б

**Завдання відкритого типу**

12д. 64 МДж. 13в. 0,18 МДж. 14в. 22,5%.

**Відповіді до вправ розділу**

**«ЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ»**

Вправа до § 18. 6в. кг; Кл

Вправа до § 19. 1с. Зменшиться в 9 раз. 2с. Зросте в 4 рази.  
3д. 240 кН. 4д. 34 мм. 5д. 2,8 нКл. 6в. 90 мкН; 1,4 мкН. 7в. 360 мкН в напрямку меншого заряду.

**Виявляємо предметну компетентність з теми**

**«Електростатика»**

**Завдання з вибором однієї правильної відповіді**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Б	Б	Г	В	Б	Г	Г	Б	Г

**Завдання на встановлення відповідності**

10д.

	1	2	3	4	5
А			×		
Б					×
В		×			
Г	×				

11д.

	1	2	3	4	5
А					×
Б				×	
В	×				
Г		×			

**Завдання на впорядкований вибір**

12д. Б-А-В-Г

### Завдання відкритого типу

**13в.** Електризація впливом. **14в.** 5,7 нКл. **15в.** Однойменно 1,8 від початкової сили, а якщо різнойменно 0,8 від початкової сили та протилежний напрям.

Вправа до § 23. **6в.**  $2,5 \cdot 10^{16}$ .

Вправа до § 25. **2с.** 0,2 мА/под; 2 мА/под; 4 А/под. **3д.** 3,4 А. **4д.** 5,76 мКл. **5д.** 15,4 с. **6в.**  $5 \cdot 10^{12}$ .

Вправа до § 26. **2с.** а) 7,5 В; б) 10 мВ; в) 3,6 кВ. **3д.** 24 В. **4д.** 8,8 кДж. **5д.** 18 Кл. **6в.** 2,5 рази.

Вправа до § 27. **1п.** Зросте вдвічі. **2п.** Зросте втричі. **3с.** 2,5 А. **4д.** 110 В. **5д.** 2 Ом; 4 Ом; 1 Ом. **6д.** 1,25 А. **7в.** 12 Ом.

Вправа до § 28. **1п.** Опір другого вдвічі більший. **2с.** Друга, вдвічі. **3с.** 10 Ом. **4д.** В 16 раз опір довшого більший. **5д.**  $0,765 \text{ мм}^2$ . **6д.** 45 м. **7в.** 71,2 кг.

### Виявляємо предметну компетентність з теми «Сила струму. Електрична напруга та опір»

#### Завдання з вибором однієї правильної відповіді

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Б	В	В	А	Г	Б	А	Б	Б

#### Завдання на встановлення відповідності

10д.

	1	2	3	4	5
А			×		
Б				×	
В		×			
Г	×				

11д.

	1	2	3	4	5
А					×
Б				×	
В		×			
Г	×				

#### Завдання на впорядкований вибір

12д. 1-4-3-2

#### Завдання відкритого типу

**13д.** 1,4 В. **14д.** 131 м. **15в.**  $4,17 \cdot 10^{22}$ .

Вправа до § 29. **2с.** 3 кОм. **3с.** 5. **4д.** а) в обох зменшиться; б) в обох збільшиться. **5д.** 3В; 9 В. **6в.** 0,2 А, 46 В.

Вправа до § 30. **1п.** Малий електричний опір. **2п.** У мідному. **3с.** 0,25 Ом. **4с.** 2,5 Ом. **5д.** У другому в 5 раз. **6д.** 1,2 А; 0,4 А; 300 Ом. **7в.** 30 Ом; 20 Ом.

Вправа до § 31. **4с.** Перша має у 3 рази більший опір. **5д.** 66 кДж. **6д.** 250 В. **7в.** 50%.

Вправа до § 32. **4с.** 36 кДж. **5с.** Ні. **6д.** Так. **7д.** 0,33 Ом. **8д.** 91 кДж, 209 кДж; 1 кДж, 435 Дж. **9в.** 24%. **10в.** 57 хв 39 с.

Вправа до § 33. **3с.** 298 грн 44 коп. **4с.** 24 грн 72 коп. **5д.** 2,2 грн. **6д.** 250 кВт·год. **7в.** 100 Вт.

**Виявляємо предметну компетентність з теми  
«З'єднання провідників.»**

**Робота, потужність електричного струму»**

**Завдання з вибором однієї правильної відповіді**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Б	В	Б	Г	А	В	Б	Б	Б

**Завдання на встановлення відповідності**

**10д.**

	1	2	3	4	5
А				×	
Б	×				
В					×
Г		×			

**11д.**

	1	2	3	4	5
А		×			
Б			×		
В					×
Г	×				

**Завдання на впорядкований вибір**

**12д.** А-Г-В-Б

**Завдання відкритого типу.**

**13в.** а) 54 Вт; б) 13,5 Вт; в) 27 Вт. **14в.** 303 кДж. **15в.** 7 хв 29 с.

Вправа до § 34. **2с.** 825 мг. **3д.** 3 г. **4д.** 1 год 55 хв 44 с. **5д.** Неправильні. **6в.** 0,5 мм.

Вправа до § 35. **7в.** 20 кА; 400 ТВт; 2 ТДж.

**Виявляємо предметну компетентність з теми  
«Електричний струм у різних середовищах»**

**Завдання з вибором однієї правильної відповіді**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
В	В	Г	Б	В	В	Г	Б	В

**Завдання на встановлення відповідності**

**10д.**

	А	Б	В	Г	Д
1				×	
2			×		
3				×	
4		×			

**11д.**

	А	Б	В	Г	Д
1		×			
2	×				
3			×		
4					×

**Завдання на впорядкований вибір**

**13в. А-В-Б-Г**

**Завдання відкритого типу**

**12д. 10000 с. 14в. 10 Вт. 15в. 1 год 15 хв.**