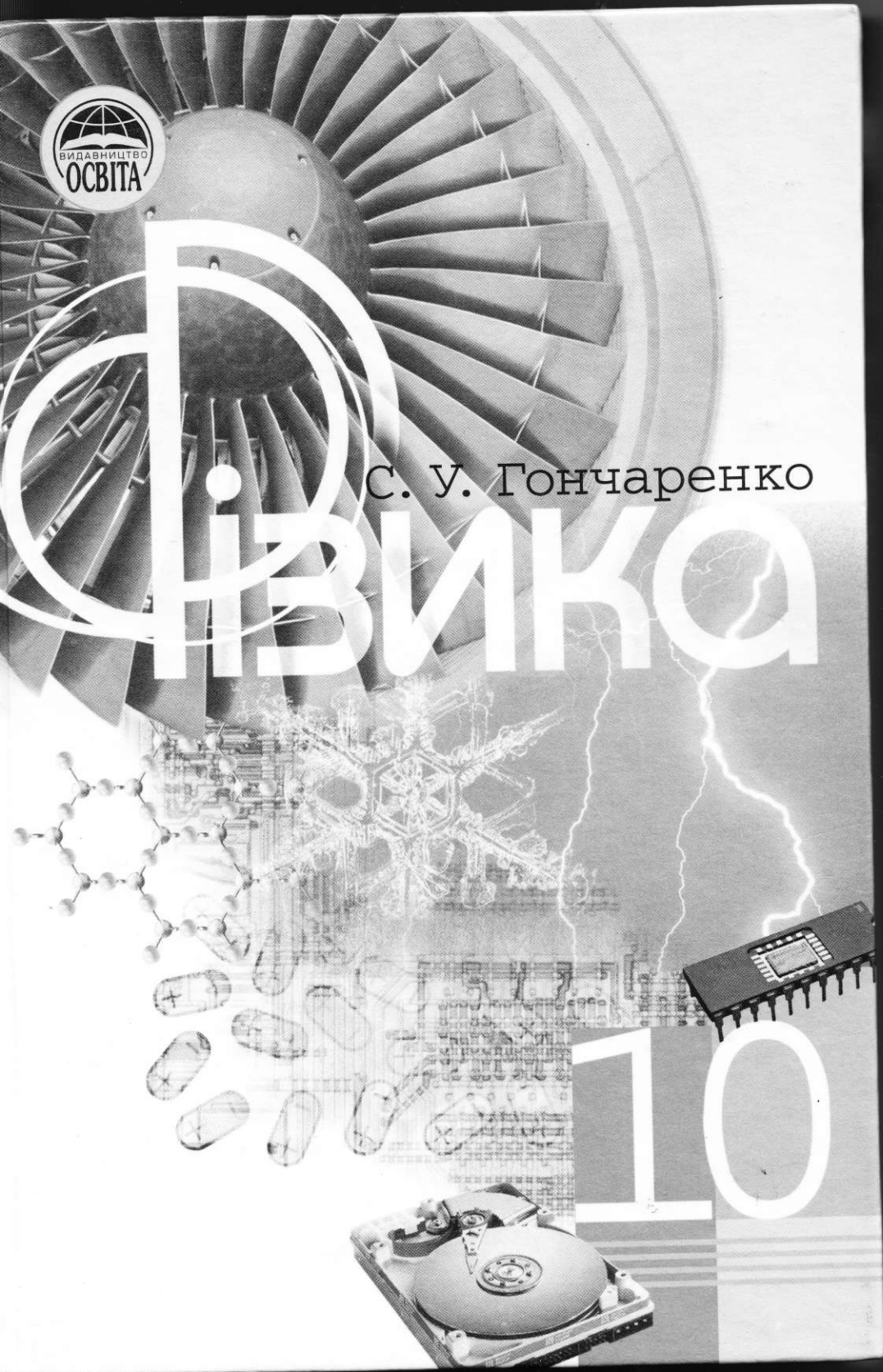




С. У. Гончаренко

ФІЗИКА

10



ФІЗИКА

С. У. Гончаренко

Підручник для 10 класу
середньої загальноосвітньої школи

*Затверджено Міністерством
освіти і науки України*

КИЮ «ОСВІТА» 2002

ББК 22.3я721
Г 65

*Затверджено Міністерством освіти і науки України
(Рішення Колегії Міністерства освіти і науки України,
протокол № 8/1—19 від 26 липня 2001 р.)*

Права авторів та видавничі права ДСВ «Освіта» захищені Законом України «Про авторське право і суміжні права» від 23.12.1993 р.

Друковане копіювання книги або її частини, будь-які інші контрафактні видання тягнуть за собою відповідальність згідно зі ст. 44 п. 1.3 цього Закону.

Гончаренко С. У.
Г 65 Фізика: Підруч. для 10 кл. серед, загальноосв. шк.—
К.: Освіта, 2002.— 319 с.

І8ВІ 966-04-0389-5.

ББК 22.3я721

І8ВМ 966-04-0389-5

© С. У. Гончаренко, 2002
© Видавництво «Освіта»,
художнє оформлення, 2002

Ви починаєте вивчати важливий розділ фізичної науки — *молекулярну фізику*, яка розглядає будову і властивості речовин у твердому, рідкому й газоподібному станах і залежність фізичних властивостей тіл від їх будови та особливостей молекулярного руху. Стосовно будови і властивостей речовин молекулярна фізика виходить з так званих молекулярно-кінетичних уявлень. Згідно з цими уявленнями будь-яке тіло — тверде, рідке чи газоподібне — складається з величезної кількості молекул, що перебувають у неупорядкованому (хаотичному) русі, інтенсивність якого залежить від температури.

Властивості тіл визначаються насамперед їх внутрішньою будовою, властивостями частинок, з яких вони складаються, силами, що діють між частинками, тощо. Тому питання про будову речовини основне для фізики та інших наук про природу.

Звичайно, молекулярна фізика не може дати вичерпної відповіді на всі питання про будову речовини. Багато надзвичайно важливих і цікавих відомостей про структуру тіл ви дістанете під час вивчення хімії, астрономії тощо. Мета молекулярної фізики — пояснити властивості тіл, що їх безпосередньо спостерігають на досліді (тиск, температура, пружність, теплопровідність тощо) як вияв сумарної дії величезної кількості молекул. Іншими словами, молекулярна фізика, виходячи з внутрішньої будови тіл, розглядає мікроскопічні (мікрофізичні) фізичні процеси і явища. При цьому вона користується так званим *статистичним методом*, який дає змогу визначати середні величини, що характеризують рух і взаємодію величезної сукупності молекул. Тому молекулярну фізику часто називають *статистичною фізикою*.

Дослідженням різних властивостей тіл і змін стану речовини займається також термодинаміка. На відміну від молекулярної фізики вона розглядає макроскопічні (макрофізичні) властивості тіл і явищ природи без урахування особливостей їх внутрішньої будови. Такий метод вивчення властивостей тіл і їх змін називають *термодинамічним*. В основі термодинаміки лежать кілька фундаментальних законів (начал термодинаміки), встановлених у результаті узагальнення великої кількості спостережень і дослідів над досить великими (макроскопічними) тілами.

Особливо ефективним виявилось застосування термодинамічного методу в теплотехніці, газодинаміці та ракетній техніці.

Розглядаючи властивості тіл і їх зміни з двох різних точок зору — мікроскопічної і макроскопічної, молекулярна фізика і термодинаміка взаємно доповнюють одна одну.

Досягнення молекулярної фізики широко використовуються в інших науках про природу. Зокрема, з її успіхами нерозривно пов'язаний розвиток хімії і біології.

У процесі розвитку в молекулярній фізиці виділився ряд самостійних розділів, наприклад: фізична хімія, фізична кінетика, молекулярна біологія, фізика твердого тіла. Основні уявлення молекулярної фізики використовуються у таких спеціальних галузях науки, як фізика металів, полімерів і плазми, кристалофізика, фізико-хімічна механіка. Молекулярна фізика становить наукову основу сучасного матеріалознавства, вакуумної технології, порошкової металургії тощо. Саме за її допомогою створені нові матеріали із заданими фізичними (механічними, тепловими, електричними, магнітними, оптичними) властивостями. Такими матеріалами є різні сплави, пластмаси, кераміка, бетон, напівпровідникові матеріали, скло тощо. Великий успіх сучасної фізики — синтезування штучного алмазу та інших надтвердих матеріалів.

Досягнення молекулярної фізики і термодинаміки покладені в основу створення сучасних теплових двигунів, холодильних установок і апаратів для одержання рідких газів; вони сприяють дальшому розвитку метеорології — науки про погоду.

ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

§ 1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

З курсів фізики 7-го і хімії 8-го класів ви вже дістали деякі уявлення про атоми, молекули та їх рух. Коротко повторимо ці відомості.

Тіла, з якими ми маємо справу в повсякденному житті, на виробництві (особливо тверді і рідкі тіла), майже завжди здаються нам суцільними і однорідними. Між тим багато явищ свідчать про те, що ці уявлення помилкові. Так, добре відомо, що тіла в результаті нагрівання плавляться і випаровуються, причому випаровування має місце у випадку і рідких, і твердих тіл (пригадайте випаровування нафталіну, твердих шматочків йоду, льоду тощо). Якщо вважати, що речовина має суцільну будову, то ці явища не можна зрозуміти і пояснити. Те саме можна сказати про добре відомі факти зміни об'єму тіла, скажімо, під час нагрівання, охолодження.

Здатність газів необмежено розширюватися, пружність газів, рідин і твердих тіл, взаємне проникнення тіл внаслідок дифузії можна пояснити, якщо припустити, що тіла складаються з величезної кількості найдрібніших частинок речовини — молекул, розташованих не щільно, а на деякій відстані одна від одної, що проміжки між молекулами змінюються під дією зовнішніх впливів, зі зміною температури або внаслідок змішування речовин. Саме зміною розмірів проміжків між частинками твердого тіла і пояснюється зміна об'ємів тіл. (До речі, проміжки між молекулами речовини не можна плутати із звичайними порами, які є в деревині, цеглі, папері та інших матеріалах.)

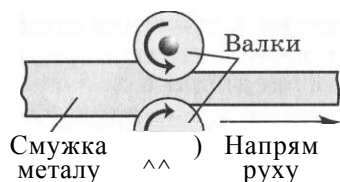
Цікаві і переконливі явища, які свідчать про наявність проміжків між молекулами, можна спостерігати на виробництві. Придивіться уважно (якщо випаде така нагода) до поверхні циліндра потужного гідравлічного преса, який розвиває тиск у кілька мільярдів паскалів (десятки тисяч атмосфер).

Ви помітите, що ззовні циліндр покритий краплями гліцерину, який просочився крізь його товсті стінки міжмолекулярними проміжками.

У металургійній промисловості широко застосовують прокатування металів і металевих сплавів — обтискання їх між обертовими валками (мал. 1). Тиск валків на метал може досягати $1,5 \cdot 10^9$ Па. Внаслідок цього зменшуються проміжки між молекулами, метал стає щільнішим і якіснішим.

Під час випробувань оболонок космічних кораблів на герметичність було виявлено, що гази завдяки міжмолекулярним проміжкам проникають крізь товсті шари металу. Тому метал, з якого виготовляють оболонки, обов'язково піддають попередньому прокатуванню і куванню.

Отже, основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини такі:



Мал. 1

1. Будь-яка речовина складається з найдрібніших частинок — молекул чи атомів.

2. Атоми і молекули перебувають у безперервному хаотичному (тепловому) русі.

3. Між молекулами (атомами) існують сили взаємодії, які зале-

жать від відстані між ними і можуть бути силами притягання і відштовхування.

Молекули настільки малі, що розрізнити їх неозброєним оком і навіть у звичайний мікроскоп неможливо. Лише у 1974 р. за допомогою електронного мікроскопа були одержані фотографії окремих атомів і молекул, що, безумовно, стало найпереконливішим доказом їх існування. А що саме безпосередньо експериментально підтверджувало існування цих частинок раніше?

До найпереконливіших дослідів належать насамперед явища дифузії і броунівського руху. Можна здійснити багато спостережень і експериментів, які опосередковано підтверджують основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини — дискретність (подільність) і «вічний» рух.

Рух атомів і молекул, їх взаємодії підпорядковуються законам механіки. Це дає змогу використовувати закони механіки для з'ясування властивостей тіл, які складаються з величезної кількості маленьких частинок, що хаотично рухаються.

? 1. Наведіть факти, які свідчать про подільність речовин. 2. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини. 3. Які спостереження зі свого повсякденного життя ви можете навести, щоб підтвердити наявність міжмолекулярних проміжків?

ХОЧЕШ ЗНАТИ БІЛЬШЕ? ПРОЧИТАЙ!

З історії розвитку вчення про молекулярну будову речовин. Думка про дискретну (переривчасту) будову речовини зародилася в глибоку давнину, близько двох з половиною тисяч років тому. Найпоширеніше атомне вчення розвинув давньогрецький філософ і природодослідник Демокріт (Уст. до н.е.). Він учив, що на вигляд суцільні тіла насправді складаються з розділених простором найдрібніших частинок — атомів (що в перекладі з грецької мови означає «неподільні»). Від форми атомів і їх розміщення залежать властивості всіх тіл природи. Взаємодіють атоми внаслідок тиску і удару. Кожен атом вічний, а тому вічна і вся природа, яка складається з цих частинок. Виходячи з уявлення про відмінність атомів і особливості їх рухів, Демокріт пояснив багато властивостей тіл, а також закономірності деяких явищ.

Погляди Демокріта поділяли у той час не всі вчені. Зокрема, проти атомістичного вчення виступав визначний філософ стародавнього світу Арістотель (384—322 рр. до н.е.), який вважав матерію суцільною, позбавленою будь-якої внутрішньої структури. Супротивники атомістичного вчення будували свої заперечення головним чином на тому, що атомів ніхто не бачив.

Атомістичне вчення було глибоко матеріалістичним. Стародавні філософи-атомісти прагнули пояснити всі явища природи природними причинами: об'єднанням і розділенням, переміщенням і змішуванням невидимих частинок — атомів. Значною мірою саме через матеріалістичну суть атомізму його протягом століть переслідувала церква, послідовники його зазнавали утисків, їхні книги спалювали. У 1626 р. вищий суд королівської Франції спеціальним законом заборонив поширення вчення про атоми під загрозою смертної кари.

Атомістичні уявлення відродилися у XVII ст. з початком розвитку сучасного природознавства. Французький філософ П'єр Гассенді, англійські фізики Роберт Бойль, Ісаак Ньютон та інші вчені прагнули на основі атомістичної теорії пояснити різні явища.

Остаточного утвердження в науці атомно-молекулярних уявлень було досягнуто лише у XX ст. Вирішальну роль у цьому відіграли праці французького фізика Жана Перрена з експериментального доведення існування атомів і молекул. Нині атомно-молекулярне вчення підтверджене численними дослідженнями і дістало загальне визнання.



ЖАН БАТІСТ
ПЕРРЕН
(1870—1942)

Французький фізик і фізико-хімік. У 1908—1913 рр. здійснив цикл експериментальних досліджень броунівського руху, які остаточно довели реальність існування молекул, те, що броунівський рух є наслідком теплового руху молекул середовища. За допомогою дослідів обчислив значення числа Авогадро.

§ 2. Дослідне обґрунтування молекулярно-кінетичної теорії

Дифузія. Дифузією називають явище, при якому речовини самі по собі змішуються одна з одною. Найпростіший приклад дифузії в газах — це швидке поширення запахів навіть у спокійному повітрі: аромат парфумів уже через кілька хвилин відчувається в усій кімнаті. Дифузію в газах можна спостерігати також на досліді з парою бромю. Для цього у скляний циліндр висотою близько 50 см вливають кілька крапель бромю і відразу ж закривають циліндр скляною пластинкою (щоб задушлива пара бромю не виходила назовні). Під час випаровування бромю його пара досить швидко дифундує вгору, що добре видно з поступового забарвлення повітря в циліндрі в коричневий колір.

Змішування газів у даному випадку не може бути здійснене силою тяжіння, оскільки густина пари бромю значно більша за густину повітря. Це явище легко пояснюється на основі молекулярно-кінетичної теорії: молекули обох газів, рухаючись неупорядковано і стикаючись одна з одною, потрапляють / проміжки між сусідніми молекулами, що приводить до проникнення одного газу в інший і, отже, поступового виникнення однорідної суміші газів.

У рідинах дифузія відбувається значно повільніше. Наллємо у скляний циліндр до половини його висоти концентрованого розчину мідного купоросу, а потім обережно доллємо чистої води. На початку досліді видно чітку межу поділу між розчином мідного купоросу і водою. З часом вона стає розпливчастою; блакитне забарвлення піднімається вгору, і через кілька днів обидві рідини повністю перемішуються, утворю-

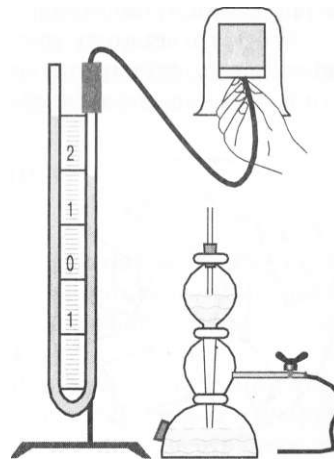
ючи однорідний розчин світло-блакитного кольору. Швидкість дифузії невелика і залежить від температури рідини. Оскільки дифузія виникає внаслідок теплового руху молекул, то прискорення цього явища з підвищенням температури свідчить про зростання швидкості частинок.

Дифундують і молекули твердих тіл, але за звичайних температур дуже повільно. Було проведено такий дослід. На золоту пластинку ставили свинцевий циліндр із ретельно очищеною від оксидів основою і залишали їх у такому положенні за кімнатної температури (20 °С) на кілька років. Виявилось, що за 4 роки свинцевий циліндр «спаявся» із золотою пластинкою, а хімічний аналіз показав, що невелика кількість золота проникла в свинець (а свинець — у золото) на глибину близько 5 мм.

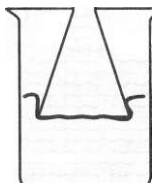
Виникає запитання: як можна пояснити дифузію в твердих тілах рухом молекул, якщо їх частинки лише коливаються навколо положення рівноваги? Треба мати на увазі, що частинки твердих тіл зрідка покидають свої місця і переходять на інші. Ось ці «мандруючі» молекули чи атоми і зумовлюють дифузію в твердих тілах.

Осмос. Важливий різновид дифузії — взаємне проникнення речовин крізь пористі перегородки — дістав назву осмос. Розглянемо такий дослід. З'єднаємо патрубок пористої посудини гумовою трубкою з коліном водяного манометра (мал. 2). Помістимо цю посудину під склянку, заповнену воднем від приладу Кіппа. Манометр покаже збільшення тиску в посудині. Пояснюється це тим, що молекули водню, які мають меншу масу і рухаються швидше, ніж молекули кисню й азоту, що входять до складу повітря, проходять крізь пори в посудину швидше, ніж молекули кисню й азоту з цієї посудини в склянку. Якщо прийняти склянку з воднем, то тиск у посудині зменшується — водень виходить крізь пори з посудини швидше, ніж у нього проникає повітря.

Дифузію рідин крізь пористу перегородку можна спостерігати на такому простому досліді. Затягнемо широкий отвір лійки целофаном або пергаментом, наповнимо її розчином мідного купоросу й опустимо в посудину з водою (мал. 3). Через імічний час побачимо, що рівень р<кічїну в лійці підвищився. Отже,



Мал. 2



Мал. 3

Це явище можете спостерігати й ви. Щоб виконати такий дослід, треба взяти краплю дуже розведеної у воді туші (або молока) і помістити її на предметне скло мікроскопа зі збільшенням у 500—600 раз. Рідина, яка здавалася суцільною і однорідною, у мікроскопі виглядає зовсім інакше: чорні неправильної форми шматочки різних розмірів плавають у безбарвній рідині. Зрозуміло, що це не молекули, а шматочки сажі, з якої виготовлено туш. Зосередивши увагу на якійсь одній з найдрібніших частинок, побачимо, що вона рухається хаотично, переміщуючись то в один, то в інший бік. Якщо на схемі відмітити положення цієї частинки через однакові послідовні інтервали часу (наприклад, через 30 с) крапками і з'єднати їх прямими, то дістанемо «заплутану» ламану (мал. 4), яка характеризує хаотичність руху частинки, але не є її справжньою траєкторією, яка набагато складніша.

У броунівському русі вражає одна незвична для нас особливість: рух частинок не припиняється за жодних обставин, хоча під час досліджень його причин виключали будь-яку можливість зовнішніх впливів (механічних струсів, нерівномірного нагрівання рідини тощо) на броунівські частинки.



вода дифундує в розчин мідного купоросу швидше, ніж розчин у воду. Поява блакитнувато-го забарвлення води в посудині свідчить про те, що мідний купорос також, хоча і повільно, дифундує у воду.

Броунівський рух. Одним з найпереконливіших доказів існування молекул і їх хаотичного теплового руху є броунівський рух, названий так на честь англійського ботаніка Р. Броуна, який спостерігав його в 1827 р. Розглядаючи в мікроскоп краплину води, Р. Броун звернув увагу на невпорядкований рух плаваючих у ній спор рослин.

Характер їх руху не змінювався. Отже, причину руху броунівських частинок треба шукати в самій рідині.

Пояснити броунівський рух стало можливим у другій половині XIX ст. Оскільки молекули води весь час перебувають у хаотичному русі, завислі у воді частинки речовини зазнають поштовхів молекул з усіх боків. Але

випадково в даний момент може виникнути тимчасова перевага ударів з якогось одного боку, тоді частинка переміщається у протилежний бік. Таким чином, броунівський рух є «відображенням» руху молекул рідини.

Досліди показують, що інтенсивність броунівського руху тим більша, чим вища температура рідини, що свідчить про безпосередній зв'язок теплового руху молекул з рухом броунівських частинок.

? 1. У чому полягає явище дифузії? 2. Як можна спостерігати дифузію в газах, рідинах і твердих тілах? 3. Чому з підвищенням температури зростає швидкість дифузії? 4. У чому полягає броунівський рух? 5. Чому броунівський рух не спостерігається у більших частинок речовини, завислих у рідині чи газі?

ХОЧЕШ ЗНАТИ БІЛЬШЕ? ПРОЧИТАЙ!

Факт існування броунівського руху свідчить про молекулярну будову речовини і неупорядкований рух молекул.

За нормальних умов (тиск не дуже сильно відрізняється від атмосферного) густина газів приблизно в 100 раз менша за густину рідин і твердих тіл. Отже, відстані між молекулами (атомами) в газах приблизно в 10 раз більші, ніж у рідинах і твердих тілах. Тому можна припустити, що в газах молекули здійснюють поступальний рух від одного зіткнення до другого. В рідинах і твердих тілах молекули (атоми або йони) в основному коливаються навколо певних положень рівноваги, лише зрідка «перестрибуючи» з одного місця на сусіднє, вакантне місце. У рідинах таких вакансій багато, і перестрибування здійснюються досить часто. Цим пояснюється текучість рідин. У твердих тілах таких вакансій мало, і перестрибування здійснюються рідко.

Ці припущення підтвердилися в подальших дослідженнях властивостей речовин у різних агрегатних станах.

§ 3. Молекулярні явища в техніці і природі

Явище дифузії має надзвичайно різноманітні галузі практичного застосування. Насамперед це *зварювання і паяння металів*: ці процеси ґрунтуються на дифузії зварюваних металів або основного металу і припою.

В останні роки опрацьовано і впроваджено у виробництво *метод дифузійного зварювання у вакуумі*. Для цього зварювані деталі поміщають у вакуумну камеру і нагрівають до температури, за якої процес дифузії в металах проходить

досить інтенсивно. Потім деталі притискають одну до одної і витримують певний час. Перевага цього методу полягає в тому, що він дає змогу зварювати матеріали, які іншими методами з'єднати неможливо (сталь з чавуном, алюмінієм, вольфрамом, срібло з нержавіючою сталлю тощо).

Дифузія широко застосовується в металургії, зокрема під час *поверхневої термохімічної обробки* металів і сплавів з метою зміни механічних властивостей їх поверхневого шару. Так, для підвищення строку служби машин, які працюють в умовах великих навантажень, сталеві деталі піддають *азотуванню* — насиченню поверхні сталі азотом. Готові деталі нагрівають в аміаку до температури 500—700 °С. Утворений при цьому атомарний азот дифундує в сталь. Азотування надає поверхні виробів винятково високої твердості, стійкості проти зношування, антикорозійності для таких середовищ, як атмосфера, вода, водяна пара тощо.

Поліпшення властивостей матеріалів досягається схожими з азотуванням процесами — *цементацією* (поверхневим насиченням сталевих виробів вуглецем) і *ціануванням* (одночасним насиченням поверхні деталі вуглецем і азотом). Великого значення в сучасній техніці набула *дифузійна металізація* виробів, тобто поверхнєве насичення сталевих виробів Алюмінієм, Хромом, Силіцієм, Берилієм та іншими елементами.

Не менш важливі застосування явища дифузії і в інших галузях виробництва. Наприклад, на дифузії ґрунтується вилучення на цукроварних заводах цукру з нарізаної бурякової стружки. Стружка промивається водою або цукровим розчином малої концентрації, і при цьому молекули цукру дифундують із стружки в розчин.

Явище дифузії рідин крізь пористі перегородки має велике значення у житті тварин і рослин, забезпечуючи всмоктування води коренями рослин, засвоєння їжі і видалення відходів із клітин рослин і тварин. Так, корені рослин вбирають необхідні для них речовини з ґрунтових вод завдяки дифузії цих речовин всередину коренів, де речовини швидко засвоюються, тобто хімічно перетворюються. Внаслідок цього концентрація біля поверхні коренів виявляється весь час зниженою, що й сприяє продовженню дифузії потрібних речовин з ґрунту в корені.

Так само відбувається дифузія в тканинах тварин і людини. В легенях, наприклад, кисень з повітря надходить у кров завдяки дифузії крізь стінки альвеол, а потім, розчинившись у ній, розноситься по всьому організму. Їжа перетворюється в шлунку і кишечнику в розчинний стан, і потрібні організмові речовини дифундують всередину клітин. У той же час вна-

слідок дифузії продукти життєдіяльності клітин виводяться з неї в навколишнє середовище.

На використанні явища дифузії працюють так звані дифузійні (пароструминні) насоси, за допомогою яких дістають високий вакуум (до 10^{-7} мм рт. ст., або $1,3 \cdot 10^{-9}$ Па).

Броунівський рух — одне з найпоширеніших явищ. Його необхідно враховувати у практичній діяльності. Зокрема, броунівський рух електронів створює електро- і радіоперешкоди в різних технічних пристроях. Стрілки чи дзеркала дуже чутливих вимірювальних приладів, маючи малі розміри, зазнають некомпенсованих ударів з боку молекул повітря, що вносить похибки у вимірювання і обмежує точність цих приладів.

§ 4. Сили взаємодії між молекулами

У 7-му класі були розглянуті явища і досліди, які підтверджували, що між молекулами діють значні сили притягання. Пригадаємо деякі з них.

Про існування сил притягання між молекулами переконливо свідчить той факт, що тверді тіла і рідини не розпадаються на окремі молекули, незважаючи на те, що частинки цих речовин розділені проміжками і перебувають у безперервному русі. Щоб змінити форму твердого тіла, до нього треба прикласти деяку силу. Очевидно, молекули зв'язані між собою силами притягання, і саме ці сили ми перемагаємо, обробляючи матеріали на металорізальних верстатах, пресах, прокатних станах, розбиваючи, розрізаючи чи розламуючи той чи інший предмет.

Проте відновити зруйнований предмет простим складанням шматків не можна. Чому? Невже в цьому випадку сили притягання перестають діяти? Справа в тому, що вони виявляються лише на дуже малих відстанях. Щоб добитися такого з'єднання, треба збільшити кількість точок зіткнення шматків, а для цього їх поверхні слід зробити дуже гладенькими або м'якими. Тоді, притискаючи шматки один до одного, можна зблизити їх так, що почнуть діяти сили притягання молекул. Ці міркування можна підтвердити такими дослідями.

Розріжемо ножівкою свинцевий циліндр навпіл, а потім щільно складемо його половинки. Гладенькі, ще не окиснені поверхні свинцю дотикатимуться досить великою кількістю точок, і половинки циліндра злипнуться так міцно, що навіть значний тягар не зможе відірвати їх одну від одної (мал. 5).

На виробництві часто користуються набором сталевих мірних плиток для контролю лінійних розмірів деталей

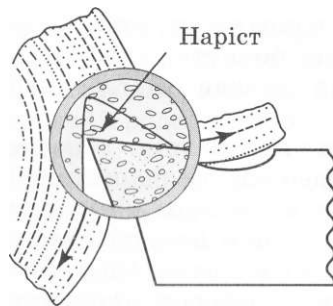
Мал. 5

Мал. 6

машин і механізмів. Якщо провести відполірованою до дзеркального блиску сталюю пластинкою по поверхні іншої, то вони зчіплюються (мал. 6, а), причому настільки міцно, що їх іноді важко відірвати одну від одної силою в кілька десятків ньютонів (мал. 6, б), але вони легко зміщуються вздовж поверхні дотику.

Шматки заліза у звичайних умовах не злипаються від стискування, але якщо їх попередньо нагріти до білого розжарення, вони з'єднуються в одне ціле, або, як кажуть, «зваряться». Так само осколки скла не злипаються між собою, але якщо їхні краї нагріти до розм'якшення, то можна їх міцно з'єднати.

Цікавим прикладом вияву сил притягання між молекулами чи атомами є утворення на різальних інструментах наросту (мал. 7). Під час різання металу тиск стружки на передню поверхню різця величезний (може досягати $2,5 \cdot 10^{10}$ Па), і оброблюваний метал заповнює всі його нерівності. В результаті виникає дуже щільний контакт між стружкою і різцем, що спричинює виникнення великих сил взаємодії між їх атомами, і частина стружки прилипає до різця, утворюючи нарост.



Мал. 7

Виникнення великих сил притягання між молекулами речовин на дуже малих відстанях використовують під час виготовлення деталей методом порошкової металургії. Порошки різних матеріалів піддають всебічному стисканню, причому їх частинки зближуються до відстаней, на яких між ними діють величезні сили зчеплення, і з порошків утворюється міцна де-

таль. Порошкова металургія дає змогу створювати різноманітні матеріали, які звичайними способами дістати неможливо. Вчені опрацювали промислові методи виготовлення деталей із суміші порошоків кількох елементів (наприклад, Нікол — Кобальт, Нікол — Кобальт — Ферум) і хімічних сполук металів з металоїдами. За умови високих температур такі матеріали характеризуються значно більшою міцністю, ніж звичайні металеві сплави. Нині немає жодної галузі машинобудування, де б не застосовувалися матеріали, виготовлені методами порошкової металургії.

Сили притягання залежать від природи молекул. Наприклад, для склеювання різних матеріалів застосовуються речовини, молекули яких сильно взаємодіють з частинками склеюваних матеріалів. Молекули рідини (клею) можна зблизити з молекулами твердого тіла настільки, щоб між ними виникли сили взаємного притягання. Однієї краплі клею буває достатньо, щоб з'єднані нею металеві бруски витримували дію сил в кілька тисяч ньютонів.

Останнім часом вченими створено полімерні клеї холодного тверднення, які склеюють метал, бетон, тканини. Застосовують ці клеї для склеювання труб газо- і нафтопроводів, ремонту обладнання шахт і збагачувальних фабрик, де небезпечно застосовувати зварювання. Склеєні деталі витримують тиск близько $12 \cdot 10^3$ гПа і температуру від -60 до $+120$ °С.

Дотепер ми розглядали явища, які ілюструють існування сил притягання між молекулами. Але багато фактів свідчить про те, що між молекулами діють і сили відштовхування. Цим пояснюється, зокрема, мала стисливість твердих тіл і рідин. Адже сили притягання між частинками мали б сприяти стисканню тіла, а між тим, щоб стиснути чи спресувати тіло, до нього треба прикласти силу, і часто дуже велику. Отже, між молекулами діють і сили відштовхування.

Сили притягання і відштовхування існують одночасно, але, як показують досліди, залежать від відстаней між частинками по-різному.

Залежність сил взаємодії молекул P від відстані між ними можна зобразити графічно (мал. 8), вважаючи сили відштовхування додатними, а сили притягання — від'ємними. Нехай одна з молекул знаходиться в початку координат, а друга — на деякій відстані r_1 від неї. Між ними діє дуже мала сила



Мал. 8

взаємного притягання і ще менша сила відштовхування. В міру зближення молекул спочатку швидше зростає сила притягання, а потім — сила відштовхування. На відстані z_0 , що становить приблизно суму радіусів молекул, сила притягання дорівнює силі відштовхування. Ця відстань $OB = z_0$ відповідає положенню стійкої рівноваги молекул і називається *рівноважною*. При дальшому зближенні молекул ($r < z_0$) сила відштовхування переважає силу притягання.

На графіку показано також залежність рівнодійної сил взаємодії двох частинок од відстані між ними. Ця сила дорівнює алгебраїчній сумі сил відштовхування і притягання. Кожна ордината кривої взаємодії, яка відповідає будь-якій відстані r , є результатом алгебраїчного додавання ординат двох перших кривих. Крива зміни сили взаємодії молекул показує, що при відстанях між частинками $r > z_0$ переважають сили взаємного притягання, а при $r < z_0$ — сили відштовхування. Це пояснює виникнення сил пружності під час деформації тіл.

Якщо тіло не деформоване, сили, які діють на будь-яку молекулу з боку сусідніх молекул, зрівноважені (в протилежному випадку молекули б безперервно рухалися з прискоренням). Однак варто лише трохи **збільшити** відстань між молекулами тіла, наприклад розтягнувши його, як відразу між ними виникнуть сили притягання. Під дією цих сил тіло, залишене саме по собі, повертається у вихідне положення.

Під час **стискання** тіла, коли міжмолекулярні відстані зменшуються, молекули **відштовхуються одна від одної**, сили взаємодії між ними змінюють напрям. Сили відштовхування повертають тіло у вихідне положення.

Очевидно, сили взаємодії між молекулами сильно залежать від відстані, якщо вони навіть змінюють свій напрям на протилежний на дуже малих відстанях.

Сили взаємодії між молекулами в рідинах і твердих тілах настільки великі, що, незважаючи на хаотичний рух, молекули не можуть віддалитися одна від одної на значну відстань. Тому і тверді тіла, і рідини зберігають свій об'єм, а тверді тіла зберігають і свою форму.

А газ свій об'єм не зберігає. Він займає об'єм тієї посудини, в яку вміщений, якою б великою посудина не була. Це можна пояснити лише тим, що в газах сили притягання між молекулами настільки малі, що вони не можуть завадити молекулам розлетітися. Тому газ і займає весь наданий йому об'єм (повітря, яке оточує Землю, — атмосфера — не міститься в посудині, однак утримується біля поверхні Землі силою тяжіння). А малі ці сили тому, що відстані між молекулами в газі набагато більші, ніж у рідинах і твердих тілах.

: 1. Які досліди підтверджують, що між молекулами твердих і рідких тіл діють сили притягання і відштовхування? 2. Поясніть, у чому полягає склеювання, зварювання і пресування металів. 3. Чому в процесі обробки металів різанням на передній частині різального інструмента утворюється нарост з частинок оброблюваного металу? 4. Поясніть виникнення сил пружності в твердих тілах під час розтягування і стискання. 5. Як пояснити малу стисливість рідин?

§ 5. Маса і розміри молекул

Виміряти розміри молекул лінійкою так само неможливо, як неможливо визначити масу молекули за допомогою терезів. Приблизну оцінку розмірів молекул можна дістати з досліду, вперше проведеного німецьким фізиком В. Рентгеном і англійським фізиком Д. Релеєм.

Якщо пустити краплю олії (її об'єм відомий) на поверхню чистої води, то вона розпливається, утворюючи тонку плівку, яка складається з одного шару молекул. Тому граничну товщину такої плівки можна прийняти за діаметр молекули. Вимірявши площу утвореної плівки, визначимо її товщину (тобто діаметр молекули). Наприклад, результат одного з дослідів такий: об'єм краплі олії $3,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$, площа поверхні плівки 90 см^2 , отже, товщина плівки

$$a = \frac{3,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3}{90 \text{ см}^2} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

Сучасні методи вимірювання дають змогу визначати розміри молекул і атомів. Ці розміри приблизно однакові для молекул кожної речовини. Наприклад, лінійні розміри молекули кисню становлять « $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, води — близько $2,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, розміри молекул більшості інших речовин мають той самий порядок 10^{-10} м . Проте молекули деяких органічних речовин, які складаються з тисяч атомів, мають розміри, що значно перевищують розміри двох- і трьохатомних молекул.

Молекули і атоми настільки малі, що уявити собі їх розміри можна лише шляхом порівнянь. Так, атом Феруму у стільки разів менший за волоський горіх, у скільки горіх менший за Місяць. Якщо збільшити молекулу води до розмірів шпилькової головки, то сама головка за такого ж збільшення перевищила б розміри найвищої гори на Землі — Джомолунгми.

Однак маси m двудулатомів виміряні досить точно. Вони виражаються дуже малими числами. Наприклад, маса молекули кисню добувається з формули $m = 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

На практиці користуватися такими числами незручно. Їх важко запам'ятати і важко виконувати над ними арифметичні дії. Тому, як вам відомо з курсу хімії 8-го класу, за одиницю вимірювання маси атомів і молекул прийнята атомна одиниця маси (а. о. м.).

З 1961 р. за атомну одиницю маси обрано ~ маси атома Карбону, оскільки Карбон входить у дуже велику кількість хімічних сполук (органічні сполуки).

Масу атома, виражену в атомних одиницях маси, називають *відносною атомною масою* A_r .

Відносною атомною масою речовини M_r називають відношення маси атома m_0 даної речовини до $1/12$ маси атома Карбону m_c :

$$A_r = \frac{m_0}{1/12 m_c},$$

яке показує, у скільки разів маса атома m_0 даного елемента більша за $1/12$ маси атома Карбону m_c . Очевидно, що відносна атомна маса Карбону дорівнює 12 (звичайно атомні маси наводяться без найменування «атомні одиниці маси»). Наприклад, відносна атомна маса Магнію дорівнює 24. Це означає, що маса атома Магнію у 24 рази більша за $1/12$ маси атома Карбону. Маса атома Гідрогену майже в 12 раз менша за масу атома Карбону, тобто відносна атомна маса Гідрогену наближається до 1.

Відносні атомні маси атомів хімічних елементів вказані у періодичній системі Д. І. Менделєєва (ПС). При цьому слід мати на увазі, що відносні атомні маси, наведені в ПС, дещо відрізняються від цілих чисел, наприклад в Оксигену 15,9994, а не 16, у Нітрогену 14,0067, а не 14, у Феруму 55,847, а не 56, і т.д. Це пов'язано з тим, що атоми одного й того самого хімічного елемента можуть мати різні маси (ізотопи). Для практичних розрахунків ми надалі заокруглюватимемо відносні атомні маси, які наводяться в ПС, до найближчого цілого і вважатимемо, що відносна атомна маса Гідрогену дорівнює 1, Оксигену - 16, Нітрогену - 14, Феруму - 56 і т.д.

Якщо речовина складається не з атомів, а з молекул, то її *відносна молекулярна маса* M_r дорівнює сумі відносних атомних мас атомів, які утворюють молекулу. Наприклад, відносна молекулярна маса молекули азоту N_2 дорівнює 28, оскільки молекула азоту складається з двох атомів (14 + 14 = 28). Відносна молекулярна маса молекули вуглекислого газу CO_2 дорівнює 44, оскільки його молекула складається з одного атома Карбону і двох атомів Оксигену (12 + 16 + 16 = 44) тощо.

Експериментально встановлено, що атомна одиниця маси дорівнює $1,660 \cdot 10^{-27}$ кг. Оскільки у ПС вказані відносні атомні маси, то легко обчислити масу будь-якого атома чи молекули. Наприклад, маса молекули вуглекислого газу дорівнює: $m_{CO_2} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 44 = 73,04 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, води — $m_{H_2O} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 18 = 29,88 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Тобто

$$m_0 = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг } M_r,$$

де m_0 — маса молекули (в кг), M_r — відносна молекулярна маса цієї речовини.

Якщо маса молекули якоїсь речовини відома, то легко дізнатися, скільки молекул N міститься в будь-якому тілі, яке складається з цієї речовини. Для цього треба масу m тіла (її визначають зважуванням на терезах) поділити на масу однієї молекули m_0 : $N = \frac{m}{m_0}$.

А маса молекули будь-якої речовини в кілограмах дорівнює $M_0 = 1,66 \cdot 10^{-27} M_r$, тому

$$M = \frac{1,66 \cdot 10^{-27} M_r}{M_2} = 6,02 \cdot 10^{26} \frac{\text{тм}}{M_2} \quad (5.1)$$

Число молекул речовини в будь-якому тілі називається **кількістю речовини**. Ця фізична величина настільки важлива, що вона поряд з масою, довжиною і часом належить до основних величин, на яких ґрунтується Міжнародна система одиниць (СІ). Для цієї величини, як і для інших, треба обрати одиницю вимірювання.

Здавалося б, природна одиниця кількості речовини — це одна частинка — молекула, атом тощо. Але тоді числа, які виражають цю величину, будуть дуже великими.

Більш зручну одиницю можна обрати на основі формули (5.1). З формули видно, що коли маса речовини тп чисельно дорівнює відносній масі молекули M_r , число молекул в тілі такої маси дорівнює $6,02 \cdot 10^{26}$, незалежно від того, про яку речовину йдеться. Оскільки M_2 води, кисню, вуглецю дорівнюють відповідно 18, 32 і 12, то 18 кг води, 32 кг кисню, 12 кг вуглецю містять одне й те саме число частинок — $6,02 \cdot 10^{26}$. Це число частинок і можна було б обрати за одиницю кількості речовини.

Домовилися одиницею кількості речовини вважати таку кількість речовини, в якій міститься не $6,02 \cdot 10^{26}$, а в 1000 раз менше частинок, тобто $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул, атомів тощо.

За одиницю кількості речовини приймають таку кількість речовини, в якій міститься $6,02 \cdot 10^{23}$ частинок (молекул, атомів тощо). Називається ця одиниця **моль**. Позначають її так само: **моль** (скороченого позначення ця одиниця не має).



АМЕДЕО
АВОГАДРО
(1776—1856)

Італійський фізик і хімік. Основні праці присвячені молекулярній фізиці. У 1811 р. відкрив важливий для фізики і хімії закон, згідно з яким у рівних об'ємах різних газів за однакових умов міститься однакова кількість молекул (закон Авогадро). Виходячи з цього закону, запропонував метод визначення атомних мас елементів і молекулярних мас речовин.

Число молекул в 1 моль дістало назву *стала* (або *число*) *Авогадро* на честь італійського вченого Амедео Авогадро. Позначається стала Авогадро N_A ; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Як бачимо, будь-яка речовина, маса якої в кілограмах дорівнює відносній молекулярній масі M_r , містить $6,02 \cdot 10^{26}$ молекул. Тому маса 1 моль речовини дорівнюватиме $0,001 M_r$ кг або M_r г.

Масу 1 моль речовини називають *молярною масою* і позначають M . Одиницею молярної маси служить 1 кг/моль. З розглянутого вище прикладу випливає, що числове значення молярної маси речовини, виражене в грамах, дорівнює відносній молекулярній масі цієї речовини. Якщо ж молярну масу виражати в кілограмах, то числове значення молярної маси буде в 1000 раз меншим: $M = 10^{-3} M_r$. Наприклад, молярна маса водню дорівнює $2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, азоту — $28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, вуглекислого газу — $44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Приклад. Чому дорівнює молярна маса цукру, формула якого $C_{12}H_{22}O_{11}$?

За ПС знаходимо відносні атомні маси Карбону (12), Гідрогену (1) і Оксигену (16). Відносна молекулярна маса цукру

$$M_r = 12 \cdot 12 + 1 \cdot 22 + 16 \cdot 11 = 342.$$

Тоді молярна маса цукру дорівнює: $M = 10^{-3} \cdot 342$ кг/моль = $0,342$ кг/моль. Очевидно, що число молів V в даному тілі дорівнює

де m — маса тіла. Число молів також дорівнює — де

N — число молекул в тілі. Отже, число молекул в тілі масою 171 дорівнює

П р и к л а д . Яка кількість речовини міститься в одній склянці води? Маса води в склянці дорівнює $m = 0,2$ кг. Яке число молекул води в склянці?

Р о з в ' я з а н н я . Відносна молекулярна маса води дорівнює 18. Отже, молярна маса води $M = 0,018$ кг/моль. Кількість речовини

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{0,2 \text{ кг}}{0,018 \text{ кг/моль}} \approx 11,1 \text{ моль.}$$

число молекул

$$N = \nu \cdot N_A = 11,1 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \approx 6,68 \cdot 10^{24}.$$

- ? 1. Що показує відносна атомна маса речовини? Чому дорівнює відносна атомна маса Карбону? 2. Як можна визначити відносну молекулярну масу речовини? 3. Як за відомою відотною молекулярною масою визначити масу молекули цієї речовини? 4. Що таке кількість речовини і якими одиницями її вимірюють? 5. Як визначають молярну масу речовини?

Вправа 1 Скориставшись ПС, визначте відносну молекулярну масу кисню O_2 , метану CH_4 , сірководню H_2S .

2. Визначте масу молекул: кисню, метану і сірководню.
3. Скільки молів складають 45 г води?
4. Обчисліть молярні маси кисню, метану і сірководню.
5. Скільки молекул містять 2 г водяної пари?
6. Скільки молекул міститься у повітрі масою $m = 1$ кг, якщо вважати, що повітря складається з кисню (22 %) і азоту (78 %)? Молекули цих газів двохатомні.
7. Шматок алюмінію і шматок заліза містять однакову кількість речовини. Яка маса шматка алюмінію, якщо маса шматка заліза дорівнює 2 кг?

§ 6- Швидкість руху молекул газу

Ми вже знаємо, що всі тіла складаються з молекул чи атомів, які перебувають у безперервному русі. Як же визначити швидкості молекул? Дізнатися про це дуже важливо, оскільки, як ми побачимо пізніше, багато явищ молекулярної фізики залежить від швидкостей молекул.

Вперше швидкості молекул експериментально визначив у 1920 р. німецький фізик Отто Штерн.

Прилад, за допомогою якого проводився експеримент, складався з двох жорстко з'єднаних між собою циліндрів А і В різних діаметрів (мал. 9), вздовж спільної осі яких натягу-

Мал. 9

валась платинова дротина, радіус якої r , покрита тонким шаром срібла — речовини, швидкість молекул якої треба було визначити. Внутрішній циліндр A мав вузьку щілину O , розмішену вздовж його твірної. Повітря з циліндрів відкачувалося до високого вакууму. Під час пропускання електричного струму по дротині срібло випаровувалося, і його атоми (молекула срібла, як і інших металів, складається з одного атома) летіли вздовж радіусів циліндрів, не зазнаючи на своєму шляху зіткнень з частинками дуже розрідженого повітря. Більшість атомів ударялась об стінки циліндра A і осідала на них, утворюючи наліт срібла, і лише незначна їх частина вузьким пучком проникала через щілину і потрапляла на внутрішню поверхню зовнішнього циліндра B .

Коли циліндри були нерухомі, пучок атомів Аргентуму осідав вузькою смужкою 1, утворюючи ніби зображення щілини. Якщо обидва циліндри рівномірно обертались з кутовою швидкістю ω , то протягом часу t , за який атоми Аргентуму пролітали відстань $B - z$ від щілини до стінки зовнішнього циліндра, він встигав повернутися на кут $\varphi = \omega t$, і атоми потрапляли в інше місце 2. Коли б усі атоми рухалися з однаковою швидкістю u , зображення щілини зміщувалося б, не змінюючи своєї форми, на деяку відстань c , вимірявши яку, можна обчислити швидкість атомів. Справді, зміщення зображення щілини $ci = \omega B t$, а час $t = \frac{B-z}{u}$ - - - - - тоді $ci = \omega(B-z) \frac{B-z}{u}$ —

$$\text{ЗВІДСИ} \quad \frac{\omega(B-z)^2}{u} = a \quad (6.1)$$

Оскільки значення B , z , ω і ci легко визначити дослідно, то можна знайти і u . Щоб збільшити точність досліду, циліндри обертають спочатку в один бік, потім в другий, тоді відстань між зображеннями щілини дорівнює $2ci$.

В експерименті спостерігалось не тільки зміщення зображення щілини, а й розпливання його (порівняйте смужки I і 2 на мал. 9), зумовлене різницею швидкостей атомів Аргентуму. Як впливає з формули (6.1), атоми, що рухаються повільніше, зміщуються більше, ніж ті, які рухаються швидко. За температури розжарення нитки приблизно 1200 °С середня швидкість атомів Аргентуму виявилась рівною приблизно 500 м/с. Вимірювання, проведені з іншими металами, дали такі самі результати.

Пізніше дослід Штерна багато разів повторювали і вдосконалювали, було запропоновано й інші методи вимірювання швидкостей молекул. Для прикладу наведемо значення середніх швидкостей молекул деяких газів (у м/с) за температури 0 С і нормального атмосферного тиску:

азот	454	гелій	1200
водень	1693	кисень	425
вуглекислий газ	362	пара води	566

Як бачимо, швидкості молекул газів за нормальних умов дуже великі. Молекули рухаються швидше, ніж поширюється звук у повітрі (швидкість звуку в повітрі за нормальних умов — 330 м/с), а частинки такого легкого газу, як водень, рухаються вдвічі швидше за кулю, випущену з гвинтівки.

Результати дослід Штерна ми переносимо на рух молекул повітря, оскільки пара срібла є таким самим газом, як і звичайне повітря.

Але якщо швидкості руху молекул такі великі, то як пояснити малу швидкість дифузії речовин, зокрема повільне поширення запахів у спокійному повітрі? Ми знаємо, що в 1 см³ газу міститься величезне число молекул. Іще не встигне молекула пролетіти кілька мільйонних частин сантиметра, як стикається з іншою, її швидкість різко змінюється за модулем і напрямом. Так, за нормальних умов кожна молекула азоту і кисню протягом 1 с зазнають близько 7,5 млрд зіткнень з іншими молекулами і описують у повітрі траєкторію більш вигадливу, ніж траєкторія броунівської частинки.

Звернемо увагу, що в досліді Штерна швидкість молекул можна визначати за різних температур, змінивши розжарення нитки, з якої відбувається випаровування речовини. Виявляється, з підвищенням температури швидкість молекул збільшується. Це дає змогу дати молекулярно-кінетичне визначення абсолютної температури, яке буде розглянуто пізніше.

? 1. Чому в досліді Штерна повітря з циліндрів відкачувалося до високого вакууму? 2. Зображення щілини в досліді Штерна виявлялося розмитим. Про що це свідчить?

§ 7. Ідеальний газ. Температура та її вимірювання

Ідеальний газ. Вивчення властивостей речовини почнемо з властивостей газів. І саме тому, що в газах сили взаємодії між молекулами мізерно малі. Щоб ще більше спростити задачу вивчення властивостей газу, вважатимемо, що молекули газу не взаємодіють між собою. Газ, який складається з молекул, які не взаємодіють між собою, називається **ідеальним газом**. Така модель газу дає можливість пояснити основні властивості газів і встановити деякі важливі закономірності їх поведінки. Далі, говорячи про гази, матимемо на увазі ідеальний газ.

Зрозуміло, що в природі ідеального газу не існує. Однак за певних умов і «справжні», реально існуючі гази, поведуть себе так само, як і ідеальні. Атмосферне повітря, наприклад, може вважатися ідеальним газом.

Коли говорять, що молекули ідеального газу не взаємодіють між собою, це не означає, що кожна молекула зовсім вільна від впливу інших молекул. Рухаючись хаотично, молекули неминуче стикаються. Зіткнення ж означає, що одна молекула виявляється на гранично близькій відстані від іншої. А за малих відстаней, як ми бачили, між молекулами діють великі сили відштовхування. Вони змушують кожну з молекул змінити свій імпульс руху.

Таким чином, молекули ідеального газу все-таки взаємодіють, але тільки під час зіткнень. А час зіткнення дуже малий, набагато менший, ніж час руху молекул між зіткненнями. Переважну частину часу молекули рухаються, не взаємодіючи між собою. Тому прийнято вважати, що ідеальний газ складається з молекул, які не взаємодіють між собою. Молекули реальних газів мають скінченні розміри. Сили їх взаємодії швидко зменшуються зі збільшенням відстані між молекулами. Однак у міру зменшення густини власний об'єм молекул газу стає дедалі меншим порівняно з об'ємом, що його займає газ, а середні відстані між молекулами стають такими великими, що силами їх взаємодії можна знехтувати. Властивості такого газу близькі до властивостей ідеального газу.

Температура та її вимірювання. Вивчаючи матеріал попередніх параграфів, ми підкреслювали залежність перебігу різних фізичних явищ від температури, припускаючи, що з цим поняттям ви вже ознайомлені. З курсу фізики 8-го класу вам відомо, що температуру тіла вимірюють термометром і що вона пов'язана зі швидкістю руху молекул.

До визначення поняття температури можна прийти на

основі таких міркувань. З повсякденного досвіду ми знаємо, що у разі контакту (*теплого контакту*) два по-різному нагріті тіла обмінюються енергією внаслідок теплопередачі. Коли при цьому одне з них передає енергію іншому, то вважають, що перше тіло має вищу температуру, ніж друге. Якщо під час контакту тіла не обмінюються енергією теплопередачею, то вони мають *однакову температуру*. В цьому випадку кажуть, що тіла перебувають у *тепловій рівновазі*.

Метод вимірювання температур ґрунтується на встановленні теплової рівноваги між двома тілами під час теплового контакту. Якщо, наприклад, кожне з тіл A і B перебуває в тепловій рівновазі з тілом C , то ці тіла (A і B) знаходяться в тепловій рівновазі й між собою. Саме тому можна порівнювати стани теплової рівноваги тіл, не приводячи їх у безпосередній контакт, і ввести поняття температури.

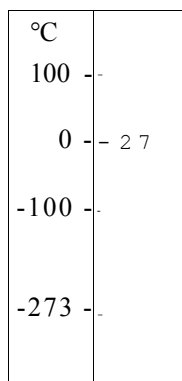
Вважають, що два тіла A і B мають однакову температуру, якщо кожне з них перебуває в тепловій рівновазі з тілом C . Тіло C називають *термометром*. Отже, термометр — це тіло, яке перебуває у тепловому контакті з іншим, температуру якого вимірюють. Після встановлення між ними теплової рівноваги можна твердити, що виміряна температура дорівнює температурі термометра.

Зі зміною теплового стану тіла крім температури змінюються й інші його фізичні властивості (об'єм, електричний опір тощо). За зміною будь-якої з них можна судити про підвищення чи зниження температури тіла. Історично склалося так, що температуру почали вимірювати за зміною об'єму тіл під час нагрівання. Принцип побудови термометрів при цьому такий.

Приведемо тіло, вибране нами за «вимірювач» температури (термометричне тіло), в теплову рівновагу з танучим льодом. Припустимо, що його температура в цьому випадку дорівнює нулеві, і виміряємо об'єм тіла U_0 . Потім приведемо його в теплову рівновагу з киплячою під атмосферним тиском водою і визначимо відповідний об'єм тіла U_{100} . Нехай у цьому випадку температура тіла дорівнює 100 градусів. Таким чином, зміні температури на 100 градусів відповідає зміна об'єму на $U_{100} - U_0$. Вважаючи, що об'єм термометричного тіла змінюється з температурою лінійно, дістанемо, що $1/100$ зміни об'єму, тобто $\Delta U / (U_{100} - U_0)$, відповідає зміні температури на один градус.

Отже, за градус приймають одну соту різниці між температурами кипіння і замерзання чистої води за атмосферного тиску.

Встановлену таким чином температурну шкалу називають шкалою Цельсія на честь шведського астронома А. Ц е л ь с ь я



Мал. 10

сі я, який її запропонував. Проградуваний в такий спосіб термометр можна застосовувати для вимірювання температури, приводячи його в теплову рівновагу з тим тілом, температуру якого треба виміряти. Ртутними і спиртовими термометрами зі шкалою Цельсія ви багато разів користувалися на уроках фізики, хімії, біології тощо, а також у повсякденному житті.

У фізиці користуються у більшості випадків так званою абсолютною температурою і шкалою Кельвіна, названою так на честь видатного англійського фізика У. Кельвіна (Томсона). Температура, відлічена за цією шкалою,

називається абсолютною температурою, позначається літерою T і виражається в **кельвінах** (скорочено К). Однак одиниця температури кельвін нічим не відрізняється від градуса Цельсія.

Абсолютна температура, як і довжина, маса, час і кількість речовини, належить до основних величин, на яких ґрунтується Міжнародна система одиниць (СІ). Одиниця виміру температури кельвін — так само як і одиниці метр, кілограм, секунда і моль — є основною одиницею цієї системи.

Часто у техніці й завжди в побуті температуру вимірюють в градусах Цельсія (позначають i). Так, температура танучого льоду за шкалою Цельсія $i_0 = 0$ °C, а за шкалою Кельвіна $T_0 = 273,15$ К; для киплячої води $i_{100} = 100$ C, а $T_{100} = 373,15$ К (далі будемо користуватися наближеними значеннями: 273 К і 373 К). Зрозуміло, що $T = i + 273,15$ К (мал. 10). Температуру 0 К називають *абсолютним нулем*, за шкалою Цельсія йому відповідає — 273,15 °C.

Поки що ми ввели абсолютну шкалу температур досить формально, далі покажемо, що абсолютна температура має глибокий фізичний зміст.

? 1. Які властивості має ідеальний газ? 2. З якою метою вводять поняття ідеального газу? 3. Що розуміють під тепловою рівновагою тіл? 4. На чому ґрунтується метод вимірювання температури? 5. Поясніть принцип встановлення шкали Цельсія. 6. Яке співвідношення між абсолютною температурою і температурою за шкалою Цельсія?

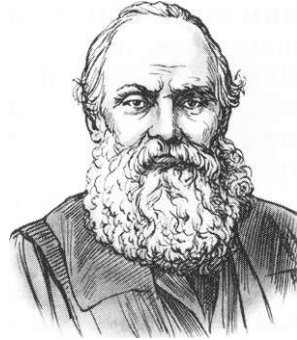
§ 8. Пояснення температури і тиску газу на основі молекулярних уявлень

Температура тіла і швидкість руху його молекул тісно пов'язані між собою. Чим вища температура тіла, тим швидше рухаються його молекули, тим більша їх кінетична

УІЛЬЯМ КЕЛЬВІН (ТОМСОН)

(1824—1907)

Видатний англійський фізик. В 1851 р. сформулював другий принцип термодинаміки, згідно з яким було доведено, що вічний двигун другого роду неможливий. У 1848 р. запровадив поняття абсолютної температури і абсолютну шкалу температури (шкала Кельвіна). Разом з Дж. Джоулем відкрив явище зміни температури газу при його повільному стаціонарному адиабатному протіканні крізь пористу перегородку (ефект Джоуля-Томсона).



енергія. Таким чином, кінетичну енергію молекул, як і температуру, можна розглядати як міру їх теплового руху.

Молекула ідеального газу, що рухається зі швидкістю має кінетичну енергію $\epsilon_{ki} = \frac{1}{2}mv^2$. Сума кінетичних енергій усіх молекул газу є загальною кінетичною енергією. Якщо всі молекули однакові, то

Розділимо загальну кінетичну енергію E_k молекул на кількість молекул:

$$\bar{\epsilon} = \frac{E_k}{N} = \frac{1}{2} m \bar{v^2}$$

Величину $\bar{\epsilon}$ називають середньою кінетичною енергією поступального руху молекули. Останню формулу можна записати так:

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} m \bar{v^2} \quad (8.1)$$

Величину $\bar{v^2}$ називають середнім значенням квадрата швидкості. (Середнє значення квадрата швидкості слід відрізняти від квадрата середньої швидкості $(\bar{v})^2 = \bar{v}^2$ — це різні величини.) Квадратний корінь з

цієї величини називається середньою квадратичною швидкістю.

Тепер повернемося до питання про зв'язок між середньою кінетичною енергією молекул і температурою газу. Якщо привести два гази з різними значеннями середньої кінетичної енергії молекул у зіткнення, через певний час середні кінетичні енергії молекул стануть однаковими, оскільки, стикаючись одна з одною, молекули обох газів обмінюються енер-

гією. При цьому відбувається передача енергії від газу з більшим значенням середньої кінетичної енергії до газу з меншим значенням цієї величини. Після вирівнювання середніх кінетичних енергій молекул в газах настає теплова рівновага, при якій припиняється передача енергії від одного газу до іншого, хоча зіткнення молекул, які хаотично рухаються, продовжуються.

Але, як відомо, аналогічно ведуть себе тіла, які мають неоднакову температуру. При їх зіткненні енергія передається теж від одного з них до іншого доти, поки не стануть однаковими їх температури, тобто поки не встановиться між тілами теплова рівновага. Вищою вважається температура тіла, яке віддає енергію.

З цього зіставлення випливає, що середня кінетична енергія поступального руху молекул змінюється так само, як і температура. Під час зіткнення тіл обидві ці величини вирівнюються, тобто встановлюється теплова рівновага тіл. Природно припустити, що температура може бути мірою середньої кінетичної енергії молекул газу.

Вище зазначалося, що дослід Штерна дає змогу вивчити дуже важливу залежність швидкості руху молекул від температури. Змінюючи силу струму в дротині, з якої випаровуються молекули, змінюють тим самим температуру і, вимірюючи середню швидкість молекул, встановлюють залежність швидкості молекул (а отже, і середньої кінетичної енергії) від температури.

Досліди і розрахунки показують, що середня кінетична енергія молекул E_k пропорційна абсолютній температурі газу T . У випадку ідеального газу зв'язок між цими величинами виражається формулою

$$E_k = \quad = kT. \quad (8.2)$$

Коефіцієнт k називають сталою Больцмана на честь видатного австрійського фізика Л. Больцмана. Він показує, наскільки зміниться кінетична енергія однієї молекули у разі зміни температури на один градус. Числове значення сталої Больцмана можна знайти лише експериментально. Через особливу важливість цієї сталої її було визначено багатьма методами. Всі вимірювання показали, що $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Отже, замість розпливчастого поняття температури як «ступеня нагрятості» тіла, яке використовується в повсякденному житті, можна дістати чітке визначення: температура — це міра середньої кінетичної енергії руху молекул. Цей висновок справедливий не лише для ідеального газу, а й для речовини в будь-якому стані.

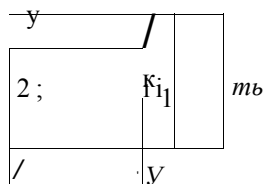
ЛЮДВІГ
БОЛЬЦМАН
(1844—1906)



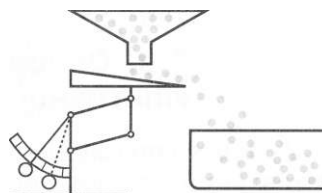
Видатний австрійський фізик-теоретик, один з основоположників класичної статистичної фізики. В 1868 р. вивів закон розподілу газових молекул за швидкостями (статистика Больцмана). В 1872 р. вивів основне кінетичне рівняння газів. Зв'язав ентропію фізичної системи з ймовірністю її стану. В 1884 р. теоретично відкрив закон теплового випромінювання і довів існування тиску світла.

З формули (8.2) випливає, що абсолютним нулем температури є температура, за якої середня кінетична енергія поступального руху молекул дорівнює нулю. Чи означає це, що за абсолютного нуля припиняється будь-який рух молекул? Аж ніяк ні. Тепер доведено, що навіть за абсолютного нуля молекулярний рух не припиняється — молекули здійснюють коливальні рухи. Однак у жодному експерименті дістати абсолютний нуль температури неможливо. Тим більше не можна дістати температуру, нижчу за абсолютний нуль. Це випливає з формули (8.2), оскільки кінетична енергія завжди додатна величина. Нині вдалося досягти температур лише на $1,2 \cdot 10^6$ К вищих за абсолютний нуль.

З курсу фізики 7-го класу ви знаєте, що тиск газу на стінки посудини (чи будь-яку іншу поверхню) зумовлений ударами молекул. Частинки газу, які рухаються хаотично з великими швидкостями, подібно до градин, що падають на землю, весь час «бомбардують» стінки посудини, в якій він знаходиться (мал. 11, а). Ударяючись об стінку, молекула надає їй імпульс $p \sim A(m, v)$, що дорівнює зміні власного імпульсу (мал. 11, б). Оскільки молекул дуже багато і ударяють вони в стінку дуже часто, можна замінити їх сумарну дію на поверхню стінки



$$p = A(m, v)$$



Мал. 11

Мал. 12

однією безперервно діючою середньою силою. Значення цієї сили, що припадає на одиницю поверхні стінки, визначає тиск, який чинить газ на стінку посудини.

Переконалися в цьому можна за допомогою моделі (мал. 12). Якщо кількість кульок, що падають на площадку в одиницю часу, велика, сили ударів окремих кульок «зливаються» в загальну середню силу тиску, яку показує стрілка приладу. Щоб визначити тиск газу, треба цю силу поділити на площу відповідної поверхні.

Таким чином, тиск газу — це результат співударів зі стінкою великої кількості молекул. Оскільки молекули рухаються зовсім неупорядковано, а число їх в одиниці об'єму газу дуже велике, то відбувається в середньому однакова кількість ударів у будь-якому напрямі, тому тиск газу на всі стінки посудини має бути однаковим, про що говорить закон Паскаля.

Ні наші органи чуття, ні прилади не в змозі відмічати удари окремих молекул, вони сприймають лише деяке середнє значення імпульсів, яке і визначає тиск газу. У середньому він сталий, хоча в окремі моменти часу мають місце невеликі відхилення (флуктуації) в той чи інший бік. Якщо ж кількість молекул мала, то їх швидкості й число ударів об стінки в різні моменти сильно відрізняються, тобто флуктуації тиску в цьому випадку дуже великі. У випадку однієї чи кількох молекул поняття тиску взагалі втрачає смисл. Таким чином, **тиск газу — це величина, яка характеризує стан великої кількості молекул, тобто макроскопічна величина.**

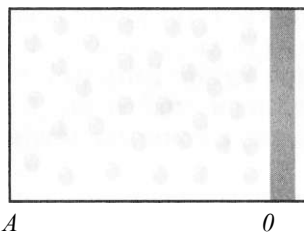
? 1. Який зв'язок існує між температурою і середньою кінетичною енергією поступального руху молекул газу? 2. Чим відрізняються гарячі й холодні тіла? 3. У чому полягає фізичний зміст сталої Больцмана? 4. Чи правильним є твердження, що при абсолютному нулі температури припиняється будь-який рух частинок? 5. Як пояснити тиск газу на основі молекулярно-кінетичної теорії? Від чого він залежить? 6. У кабіні космічного корабля, який летить по орбіті, підтримується нормальний атмосферний тиск. Як це пояснити, адже повітря в кабіні невагоме?

§ 9. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів

У попередньому параграфі ми з'ясували, що тиск газу зумовлений ударами його молекул. Тепер спробуємо знайти залежність між тиском газу і величинами, які визначають рух його молекул. Щоб обчислити тиск газу на стінку посудини, слід визначити сумарну силу ударів його молекул об цю

стінку і розділити її на площу стінки. Для цього розглянемо механізм зіткнення молекул з оточуючою газ оболонкою (посудиною), вважаючи газ ідеальним.

Нехай газ міститься у прямокутній посудині ABCD, одна із стінок якої поршень CD, здатний переміщуватися без тертя (мал. 13). Причому газ і посудина мають однакові температури. Обчислимо тиск газу на поршень CD, що має площу S . Поверхня поршня розміщена перпендикулярно до осі Ox . Тиск газу виникає внаслідок зіткнень молекул з поршнем. Щоб поршень не був виштовхнутий з посудини, до нього ззовні треба прикласти деяку силу P .



Мал. 13

V

O

Ox

Мал. 14

Виведення формули для тиску газу не дуже складне, але досить громіздке. Поділимо його на чотири етапи. Спочатку обчислимо імпульс сили, що діє на поршень з боку однієї молекули під час зіткнення (I етап). Потім обчислимо кількість зіткнень молекул з поршнем за час Δt (II етап). Помноживши ці величини і взявши середнє значення квадрата швидкості молекул, знайдемо імпульс середньої сили, що діє на поршень з боку всіх молекул (III етап). На останньому етапі (IV етап) поділимо здобуту величину на час Δt і площу поршня S . В результаті дістанемо вираз для тиску газу.

Спочатку розглянемо випадок, коли швидкість v_0 молекули до зіткнення з поршнем (мал. 14) перпендикулярна до поверхні поршня. Молекули в нашій моделі ідеального газу — це тверді кульки. Стикаючись зі стінкою, вони відскакують від неї без зміни кінетичної енергії. Подібні зіткнення називають абсолютно пружними. При цьому модуль швидкості не змінюється, а напрям руху змінюється на протилежний: $v = -v_0$. Зміна імпульсу молекули дорівнює:

$$mv - mv_0 = mv - (-mv) = 2mv.$$

А якщо швидкість молекули напрямлена під довільним кутом до поршня (мал. 15), то під час зіткнення молекули з поршнем проекція v_{ox} її швидкості на напрям, перпендику-

лярний до поверхні поршня, змінює знак $u_x =$ а проекції V_{0y} і v_{0y} швидкостей на напрями, паралельні поверхні поршня, лишаються без зміни: $V_y = V_{0y}$ і $v_y = v_{0y}$. Те саме відбувається з м'ячем під час зіткнення з гладенькою стінкою, якщо вважати це зіткнення абсолютно пружним.

Зміна проекції імпульсу молекули на вісь Ox дорівнює:

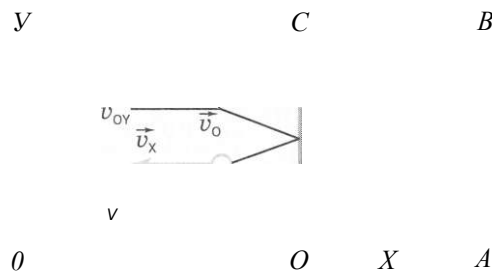
$$m u_x - m v_{0x} = m u_x - (-m u_x) = 2m u_x. \quad (9.1)$$

За законом збереження імпульсу сумарний імпульс молекули і поршня лишається незмінним. Це означає, що модуль зміни імпульсу поршня дорівнює модулю зміни імпульсу молекули. Інакше кажучи, під час зіткнення молекули з поршнем поршню передається імпульс, модуль якого дорівнює $2m |u_x|$.

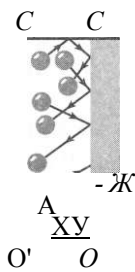
Згідно з другим законом Ньютона зміна імпульсу тіла дорівнює імпульсу сили — добутку сили на час її дії. Тому модуль імпульсу сили, що діє на поршень з боку молекули за час ударяння, дорівнює $2m |u_x|$.

Щоб обчислити імпульс сили, що діє на поршень з боку молекул, потрібно підрахувати кількість зіткнень молекул з поршнем за деякий інтервал часу Δt — набагато більший за час зіткнення з поршнем однієї молекули. За час Δt поршня можуть досягти лише молекули, які перебувають від нього на відстані, що не перевищує $\Delta x = |u_x| \Delta t$ (мал. 16). Молекули, які перебувають на більших відстанях, не встигають долетіти до поршня. Слід ще врахувати, що поверхні C досягають лише ті молекули, в яких $u_x > 0$, тобто які рухаються зліва направо.

Значення проєкцій швидкостей V_y і V_x не впливають на досягнення молекулами поршня CO . Якщо молекула пружно зіткнеться зі стінкою BC або AB (мал. 16), то проєкція швидкості u_x при цьому не зміниться, і молекула зміститься вздовж осі Ox також на відрізок $|u_x| \Delta t$.



Мал. 15



Мал. 16

Виділений на малюнку 16 об'єм $CC'O'B$ дорівнює $\frac{1}{2} |u_x| \Delta t$. Нехай в кожній одиниці об'єму посудини перебуває n - у молекул. Тоді в об'ємі V їх буде $N = nU - n \delta |o_x| \Delta t$. Внаслідок хаотичності руху лише половина молекул в середньому у виділеному об'ємі має проекцію швидкості $u_{yx} > 0$ і рухається зліва направо. У другій половини молекул $u_x < 0$, і вони рухаються в протилежному напрямі.

Отже, за час Δt кількість ударів z молекул об поршень, що дорівнює половині всіх молекул у виділеному об'ємі, становить

$$z = \frac{1}{2} n \delta |u_x| \Delta t. \quad (9.2)$$

Кожна молекула під час зіткнення змінює імпульс поршня на $2m |o_x|$. За час Δt всі 2 молекул змінять його імпульс на $2m |o_x|$. Згідно з другим законом Ньютона модуль $\Gamma \Delta t$ імпульсу сили, що діє на поршень, дорівнює модулю зміни його імпульсу:

$$\Gamma \Delta t = z \cdot 2m |o_x| = nm \delta |u_x| \Delta t. \quad (9.3)$$

Ми міркували так, ніби проекції швидкості всіх молекул на вісь Ox однакові за модулем. Насправді ж, швидкості молекул різні, і кожна з них, ударяючись об поршень, своєрідно впливає на тиск. Щоб урахувати це, треба взяти середнє за всіма молекулами значення квадрата проекції швидкості $\overline{u_x^2}$ замість u_x .

Вираз для середнього значення модуля імпульсу сили визначиться формулою

$$\Gamma \Delta t = nm \delta \overline{u_x^2} \Delta t.$$

Тепер треба врахувати, що квадрат модуля будь-якого вектора дорівнює сумі квадратів проекцій на осі координат Ox , Oy і Oz , тобто $\sigma^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$ (це узагальнення відомого вам з механіки виразу $V^2 = V_x^2 + V_y^2$ на випадок руху в просторі).

Між середнім значенням V^2 і середнім значенням квадратів проекцій існує таке саме співвідношення: $\overline{V^2} = \overline{V_x^2} + \overline{V_y^2} + \overline{V_z^2}$.

Оскільки напрями Ox , Oy і Oz рівноправні внаслідок хаотичності руху молекул, то середні значення квадратів проекцій швидкості дорівнюють одне одному: $\overline{V^2} = \overline{V_x^2} = \overline{V_y^2} = \overline{V_z^2}$. Тоді середнє значення σ^2 можна записати: $\overline{V^2} = 3\overline{V_x^2}$, або $\overline{V_x^2} = \frac{1}{3}\overline{V^2}$, тобто середній квадрат проекцій швидкості дорівнює середнього

квадрата самої швидкості. Поява множника - пов'язана з тримірністю простору і, отже, з існуванням трьох проекцій у будь-якого вектора.

Враховавши, що $V^2 = \overline{u^2}$, вираз для середнього значення модуля імпульсу сили буде таким:

$$EM = \frac{1}{3} \rho \overline{u^2} V \quad (9.4)$$

Для обчислення тиску газу p поділимо ліву і праву частини рівняння (9.4) на добуток AV :

$$p = \frac{1}{3} \rho \overline{u^2} \quad (9.5)$$

Цей вираз є **основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії**. Воно встановлює зв'язок між мікроскопічними величинами (маса молекули, кількість частинок в одиниці об'єму, середній квадрат швидкості їх поступального руху) і макроскопічною величиною — тиском, який характеризує газ як ціле і безпосередньо вимірюється на досліді.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів можна записати в іншому вигляді. Помножимо і поділимо праву частину рівняння (9.5) на 2 і дістанемо: $p = \frac{2}{3} n \overline{E_k}$.

Але $\overline{E_k} = E_k$ — середня кінетична енергія поступального руху молекул. Отже, $p = \frac{2}{3} n E_k$, тобто

$$(9.6)$$

тиск ідеального газу дорівнює $2/3$ добутку концентрації молекул n на середнє значення кінетичної енергії хаотичного поступального руху молекул E_k .

Таким чином, за допомогою моделі ідеального газу ми встановили зв'язок одного макроскопічного параметра газу — його тиску на стінки посудини з мікроскопічними параметрами — масою молекули, концентрацією молекул і середнім значенням квадрата швидкості їх хаотичного (теплого) руху, або середнім значенням кінетичної енергії теплового руху молекул.

Оскільки добуток $nm = \rho$ — густина газу, то основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії можна виразити ще так:

$$P = \frac{2}{3} \rho \overline{E_k} \quad (9.7)$$

Тобто, **тиск ідеального газу пропорційний добуткові густини газу і середнього квадрата швидкості поступального руху молекул.**

/ 1. Як обчислити зміну імпульсу молекули під час удару в стінку посудини? 2. Сформулюйте основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів і запишіть його формули. 3. Зв'язок між якими величинами встановлює основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів? 4. Які припущення було використано під час виведення основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії для ідеального газу?

Вправа 2 Маса молекули водню дорівнює $m = 3,3 \cdot 10^{-27}$ кг.

Вважаючи водень ідеальним газом, обчислити його тиск на стінки посудини при концентрації $n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$ і середній квадратичній швидкості теплового руху молекул $v_{\text{кв}} = 700 \text{ м/с}$.

2. Вважаючи водень в сонячній фотосфері (зовнішній видимій оболонці Сонця) ідеальним газом, визначити середню кінетичну енергію атомів Гідрогену. Концентрація атомів Гідрогену у фотосфері дорівнює приблизно $n = 1,6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, тиск дорівнює приблизно $p = 1,25 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

3. Концентрації молекул ідеального газу та їхні середні квадратичні швидкості в двох посудинах однакові. Маса газу у другій посудині вдвічі більша, ніж у першій. Яке відношення тисків P_1/P_2 у посудинах?

4. Визначити густину газу в колбі газонаповненої електричної лампи розжарювання, якщо молекули газу чинять на стінку колби тиск $p = 8 \cdot 10^4 \text{ Па}$, а середня квадратична швидкість поступального руху молекул $v_{\text{кв}} = 500 \text{ м/с}$.

5. Скільки молекул кисню потрапляє на кожен квадратний сантиметр поверхні нашого тіла за $t = 1 \text{ с}$? Модуль проекції швидкості молекул кисню на будь-яку вісь вважати рівним $V = 250 \text{ м/с}$. Густина кисню у повітрі дорівнює $\rho = 0,29 \text{ кг/м}^3$.

§ 10. Рівняння стану газу (рівняння Клапейрона)

З основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів можна дістати всі співвідношення, що пов'язують між собою величини, які визначають стан газу: його тиск p , температуру T і об'єм V , що його займає певна маса газу. Рівняння, яке пов'язує ці три величини (p , V , T), називають рівнянням стану газу.

Виведемо рівняння стану ідеального газу. Для цього в рівняння (9.6) підставимо $E_k = \frac{1}{2} n \cdot m \cdot v_{\text{кв}}^2$ і дістанемо:

$$pV = n \cdot kT = \frac{m}{M} \cdot n \cdot kT. \quad (10.1)$$

Це рівняння є **основним рівнянням стану ідеального газу**.

Оскільки в масі газу m міститься ν моль, а в одному молі — N_A молекул, то загальна кількість молекул

$$N = \nu \cdot N_A$$

Підставимо знайдене значення N в рівняння стану ідеального газу:

$$pV = \frac{171}{M} M_A kT. \quad (10.2)$$

Добуток kI_A , очевидно, також є сталою. Її називають *універсальною, або молярною, газовою сталою* і позначають літерою J . Отже,

$$K = \text{Ш}_\text{л} = 1,38 \cdot 10^{23} \text{ Дж/К} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \\ * 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}.$$

Замінивши в попередньому рівнянні добуток kI_A на K , дістанемо:

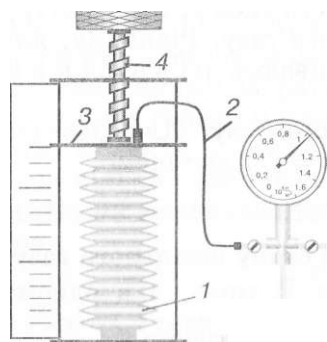
$$pV = \frac{p}{M} KT. \quad (10.3)$$

Це рівняння встановлює зв'язок між трьома параметрами, які характеризують стан газу: тиском p , об'ємом V і температурою T . Тому рівняння (10.3) називається **рівнянням стану ідеального газу**. Його можна записати і так:

$$M pVT, \quad (10.4)$$

де ρ — густина газу.

Рівняння стану в формі (10.2) або (10.3) зв'язує три величини — тиск p , об'єм V і температуру T даної маси газу. Всі ці величини можуть змінюватися. В цьому і полягає зміна стану газу. Газ можна розширювати і стискати, тобто змінювати його об'єм. При цьому змінюються тиск газу і його температура. Газ можна нагрівати і охолоджувати, тобто змінювати його температуру. При цьому можуть змінюватися тиск газу і його об'єм. Рівняння стану дає можливість враховувати всі ці зв'язані одна з одною зміни, обчислювати будь-яку з трьох величин, якщо відомі дві інші.



Мал. 17

Рівняння (10.3) ми дістали, застосувавши основні уявлення молекулярно-кінетичної теорії до ідеального газу. Для того щоб перевірити, чи можна застосовувати це рівняння на практиці для опису фізичних процесів у газах, виконаємо дослід з атмосферним повітрям, яке міститься в закритому гофрованому циліндрі 1 змінного об'єму (мал. 17). Циліндр з'єднується гумовим шлангом 2 з манометром через патрубок, впаяний в

метилену кришку 3. Об'єм циліндра можна змінювати гвинтом причому об'єм повітря всередині циліндра змінюється пропорційно його висоті. З рівняння стану ідеального газу (10.3) випливає, що при постійних значеннях маси m газу і молярної маси M відношення добутку тиску p газу на об'єм V до абсолютної температури T повинно мати постійне значення за будь-яких змін цих параметрів:

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad (10.5)$$

Щоб перевірити сталість для даної маси газу, циліндр, в якому знаходиться газ, поміщають у посудину з водою. Вимірявши тиск, об'єм і температуру газу, обчислюють значення $\frac{pV}{T}$. Потім змінюють температуру води в посудині (а значить, і газу в циліндрі) і об'єм газу, вимірюють тиск і знову визначають $\frac{pV}{T}$. Порівнюючи значення $\frac{pV}{T}$, переконуються, що вони залишаються майже незмінними (незначні відхилення визначаються ступенем точності окремих вимірювань).

Отже, рівняння стану ідеального газу в межах похибки експерименту застосовне для опису властивостей реального газу — повітря. Більш точні досліди показують, що за температур, далеких від абсолютного нуля, і малих значень густини рівняння (10.3) і (10.4) можна використовувати для опису властивостей будь-яких реальних газів. Лише за тиску в тисячі атмосфер відхилення результату експерименту від тих, які відповідають рівнянню стану ідеального газу, стають істотними. Гази з великою густиною навіть наближено не можна вважати ідеальними.

Рівняння, яке встановлює зв'язок між тиском, об'ємом і температурою газу, було вперше запропоноване французьким фізиком Б. Клапейроном і називається **рівнянням Клапейрона**.

Задача 1. Визначити масу повітря, яка потрібна для заповнення камери в шині автомобіля «Жигулі», якщо її об'єм 12 л. Камеру накачують за температури 27 °С до тиску $2,2 \cdot 10^5$ Па.

Р о з в' я з а н н я. Скориставшись рівнянням Клапейрона $pV = \frac{m}{M}RT$, визначимо масу повітря: $m = \frac{pV M}{RT}$

Підставимо числові значення величин, виражені в одиницях СІ:

$$m = \frac{2,2 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 300 \text{ К}} \approx 0,031 \text{ кг} = 31 \text{ г}$$

Задача 2. Балон об'ємом 100 л містить 5,76 кг кисню. За якої температури виникає небезпека вибуху, якщо балон витримує тиск до $5 \cdot 10^6$ Па?

Розв'язання. Небезпека вибуху виникає за такої температури, за якої тиск кисню дорівнюватиме $5 \cdot 10^6$ Па. Визначимо цю температуру з рівняння Клапейрона:

$$m = \frac{pVM}{RT} = \frac{5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,032 \text{ м}^3}{8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot T}, \text{ або } T = 61 \text{ }^\circ\text{C}$$

? 1. Який фізичний зміст рівняння стану газу? 2. Як можна перевірити застосовність рівняння стану ідеального газу для опису властивостей реальних газів? 3. За яких умов властивості реальних газів близькі до властивостей ідеального газу, а за яких істотно відрізняються від властивостей ідеального газу?

Вповава з ^ зварювальному цеху є 40 балонів ацетилену (C₂H₂) об'ємом 40 дм³ кожен. Усі вони увімкнуті в загальну магістраль. Після 12 год безперервної роботи тиск у всіх балонах знизився з $1,3 \cdot 10^7$ до $0,7 \cdot 10^7$ Па. Визначте витрату ацетилену, якщо температура в цеху залишалася незмінною і дорівнювала 32 С.

2. У балоні міститься стиснутий кисень за температури 25 Сі тиску $1,5 \cdot 10^7$ Па. Під час газового зварювання витрачено половину кисню. Визначте, який тиск встановиться в балоні, якщо температура газу знизилася до 15 С.

3. Повітряну кулю об'ємом 600 м³ заповнено воднем за температури 27 °С і тиску 10^5 Па. Водень перед заповненням повітряної кулі знаходився в газових бомбах під тиском $4 \cdot 10^6$ Па і за температури 7 С. Який об'єм кожної газової бомби, якщо їх потрібно було 200 штук?

4. Під яким тиском перебуває вуглекислий газ у вогнегаснику об'ємом $V = 2$ дм³, якщо маса вогнегасника до заповнення газом була $m_1 = 4,2$ кг, а після заповнення $m_2 = 5,6$ кг? Температуру газу вважати рівною $t = 37$ С.

5. Об'єм балона електричної лампи розжарювання $V = 150$ см³. В середині знаходиться $m = 0,4$ г газу за температури $t = 30$ Сі тиску $p = 8 \cdot 10^4$ Па. Яким газом заповнена лампа?

6. При виготовленні електролампи її балон заповнюють інертним газом. Тиск газу за $t = 20^\circ\text{C}$ становить $p_1 = 8 \cdot 10^4$ Па. Який тиск встановлюється в балоні працюючої лампи за температури $T_2 = 425$ К? Об'єм вважати постійним.

7. У кінці процесу стискання газу в циліндрі карбюраторного двигуна внутрішнього згоряння тиск був $p_1 = 9 \cdot 10^5$ Па, в кінці процесу згоряння палива став рівним $p_2 = 35 \cdot 10^5$ Па. Визначте температуру газу в циліндрі в кінці процесу згоряння палива. Температура в кінці процесу стискання дорівнює $t_1 = 400$ С. Поршень у процесі згоряння палива можна вважати нерухомим.

§ 11. Ізопроеци в газах

Якщо в газі відбуваються якісь процеси, то звичайно змінюються всі три його параметри: p , V і T . Природно, що найпростішими є процеси, які відбуваються зі зміною лише двох параметрів, а третій залишається сталим. Ці процеси

дістали назву *ізопроеесів* (від грецького «ізо» — рівний, однаковий). Рівняння стану газу для них легко дістати з рівняння Клапейрона, вважаючи один з параметрів сталою величиною. Розглянемо ізопроееси, які відбуваються за сталої температури і називаються *ізотермічними*.

Ізотермічний процес. Якщо в рівнянні стану (10.3) вважати $T = \text{const}$, права частина рівняння буде величиною сталою:

$$pV = \text{const}. \quad (11.1)$$

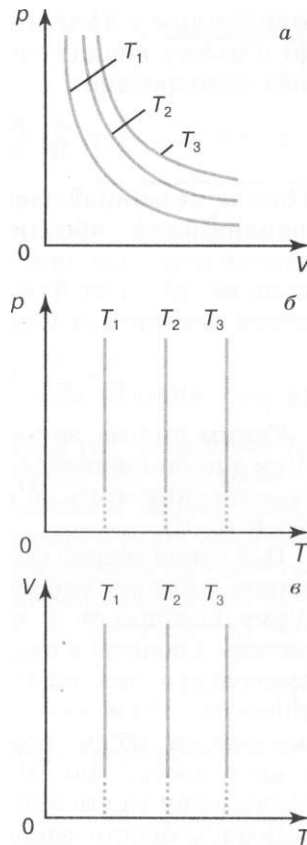
Ця формула виражає закон, встановлений дослідним шляхом у середині XIX ст. англійським ученим Р. Бойлем і французьким фізиком Е. Маріоттом. Закон Бойля—Маріотта, або рівняння стану ідеального газу при ізотермічному процесі, означає: **добуток тиску даної маси газу на об'єм, що його займає газ за сталої температури, є величиною сталою.**

Закон Бойля—Маріотта можна перевірити експериментально за допомогою описаного вище приладу (див. мал. 17). Повільно змінюючи об'єм повітря в циліндрі за незмінної температури, спостерігають за показаннями манометра і переконуються, що зі зменшенням або збільшенням об'єму тиск відповідно зростає або зменшується у стільки ж разів.

Графічно залежність між тиском і об'ємом газу за сталої температури зображають добре відомою з курсу математики гіперболою. Кожному значенню температури відповідає своя крива (мал. 18, а). Ці криві називають ізотермами (кривими однакових температур). Чим вища температура, за якої відбувається процес, тим вище розташована ізотерма ($T_1 < T_2 < T_3$).

У системах координат p, T (мал. 18, б) і V, T (мал. 18, в) ізотермічний процес зображається прямою, паралельною відповідно осі p або V . Ці прямі є також ізотермами. Третій параметр (V або p) не зберігає вздовж них сталою значення.

Ізобарний процес. Нехай тепер газ знаходиться в умовах,



Мал. 18

коли сталим є його тиск p . З рівняння Клапейрона випливає, що в цьому випадку сталим буде відношення об'єму газу до його температури

$$\frac{V}{T} = \frac{m}{M} \cdot R = \text{const} \quad (11.2)$$

тобто за незмінної маси газу і сталого тиску об'єм газу прямо пропорційний абсолютній температурі. Цей закон було встановлено дослідним шляхом у 1802 р. французьким фізиком Ж. Гей-Люссаком. Формулу закону Гей-Люссака можна переписати у такому вигляді:

$$V = V_0 \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad \text{або} \quad V = V_0 \cdot \frac{T}{T_0} \quad (11.3)$$

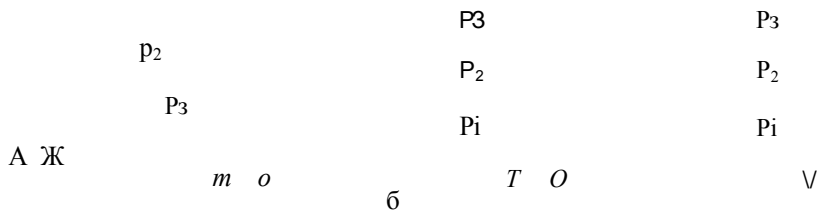
Таким чином, за незмінної маси газу і сталого тиску його об'єм з підвищенням температури на 1 градус збільшується на $\frac{1}{273}$ частину того об'єму, який газ займав за температури 273 К (0 °C).

Цей закон можна експериментально перевірити за допомогою раніше описаної установки (с.36). Для цього циліндр змінного об'єму поміщають у посудину з водою, температуру якої (а значить, і повітря в циліндрі) можна змінювати. З підвищенням температури тиск повітря збільшується. За допомогою гвинта 4 змінюють об'єм газу так, щоб тиск залишився попереднім. Вимірюючи об'єм повітря в циліндрі і його температуру, встановлюють, що відношення об'єму газу до абсолютної температури за сталого тиску — величина стала.

Досить просто закон Гей-Люссака можна проілюструвати за допомогою колби із зігнутою трубкою (мал. 19). У горизонтальній частині трубки є крапля рідини, яка відокремлює газ у колбі від атмосферного повітря. Якщо підігрівати колбу (навіть руками), то крапля рідини зміститься вправо, тобто об'єм газу, який знаходиться в колбі, збільшиться, а тиск так само дорівнюватиме атмосферному.

Перехід газу з одного стану в інший за сталого тиску називають *ізобарним процесом*. Графічно такий процес в координатних осях V, T зображується прямою, продовження якої проходить через початок координат, — *ізобарою*. Кут її нахилу а до осі температур залежить від тиску газу: чим більший тиск, тим менший кут нахилу (на малюнку 20, а маємо $p_2 > p_1$). Справді, з формули (11.2) дістаємо рівняння ізобари:

i.
—^



Мал. 20

$$T \sim \frac{1}{p} \text{ Я м}$$

де $m \cdot Я$ — стала величина (тим більша, чим менший тиск p).

Отже, за однієї і тієї самої температури газ займатиме тим більший об'єм, чим менший його тиск. На діаграмах з координатними осями p, T або p, V ізобари мають вигляд прямих, паралельних осі T чи відповідно осі V (мал. 20, б і в).

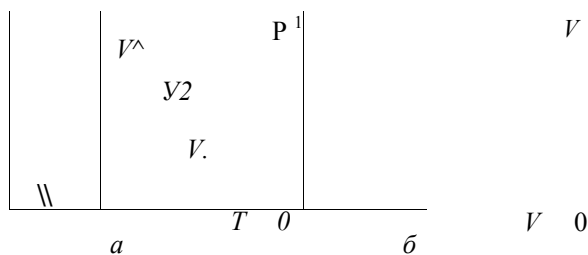
Ізохорний процес. Розглянемо випадок, коли об'єм V газу залишається сталим. З рівняння Клапейрона випливає, що за цих умов сталим буде відношення тиску газу до його температури:

$$p - m \cdot T = \text{const} \quad (11.4)$$

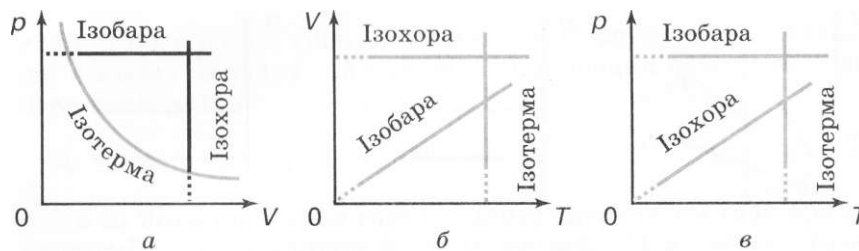
тобто за сталого об'єму тиск газу прямо пропорційний його абсолютній температурі.

Цей закон експериментально встановив французький учений Ж. Шарль. Закон можна також перевірити експериментально за допомогою установки (див. мал. 17).

Перехід газу з одного стану в інший за сталого об'єму називають *ізохорним процесом*. Графік цього процесу в координатах p, T — пряма лінія, продовження якої проходить через початок координат (мал. 21, а); її називають *ізохорою*. Кут нахилу а ізохори до осі температур тим більший, чим менший об'єм газу (на мал. 21, а маємо $У_3 > У_2 > У_A$). В



Мал, 21



Мал. 22

системах координат p , V і V , T ізохора має вигляд прямої, паралельної осі p або відповідно T (мал. 21, б і в).

Таким чином, ми переконалися, що основні газові закони (Бойля—Маріотта, Гей-Люссака і Шарля) — це окремі випадки рівняння Клапейрона.

Цікаво зіставити графіки всіх ізопроесів у різних системах координат (мал. 22).

Задача 1. У балоні об'ємом **100 л** міститься газ під тиском **$4,9 \cdot 10^5$ Па**. Який об'єм займе газ за нормального атмосферного тиску (**$1,01 \cdot 10^5$ Па**)?

Температура газу не змінюється.

Розв'язання. В умові задачі йдеться про ізоермічну зміну стану газу, яка описується законом Бойля—Маріотта:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$\text{звідси } V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2}, \text{ або } V_2 = \frac{4,9 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 100 \text{ м}^3}{1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 48,5 \text{ м}^3$$

Задача 2. До якої температури треба ізобарно охолодити певну масу газу, початкова температура якого **37°C** , щоб його об'єм зменшився при цьому на одну чверть?

Розв'язання. Температуру T_2 знайдемо із закону Гей-Люссака:

$$\text{звідси } T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1, \text{ або}$$

$$T_2 = 0,75 \cdot 300 \text{ К} = 225 \text{ К}, \text{ або } t = -48,5^\circ\text{C}.$$

Задача 3. За температури **5°C** тиск повітря в балоні дорівнює **10^4 Па**. За якої температури тиск у ньому буде **$2,6 \cdot 10^4$ Па**?

Розв'язання. Із закону Шарля

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

знайдемо температуру: $T_2 = \frac{P_2 T_1}{P_1}$, або

$$T_2 = 278 \text{ К} \cdot \frac{2,6 \cdot 10^4 \text{ Па}}{10^4 \text{ Па}} = 722,8 \text{ К}, \text{ або } t = 449,8^\circ\text{C}.$$

Задача 4. Манометр, встановлений на балоні із стиснутим киснем, показував за температури $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ тиск $1,8 \cdot 10^6\text{ Па}$, а за температури $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ — тиск $2 \cdot 10^6\text{ Па}$. Чи відбувалося витікання газу з балона?

Розв'язання. Щоб з'ясувати, чи витікав газ із балона, обчислимо, яким повинен бути тиск p_2 кисню за температури T_2 . Якщо він дорівнюватиме p_2 , то витікання не буде. Оскільки об'єм балона не змінюється, то йдеться про ізохорну зміну стану газу, яка описується законом Шарля:

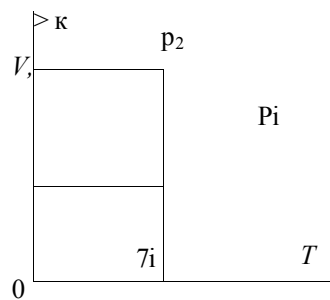
$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ звідси } p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1}, \text{ або } p_2 = 2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Отже, витікання кисню не було.

Задача 5. На малюнку 23 зображено дві ізобари: $p_x = \text{сопві}$ і $p_2 = \text{сопзі}$. Який тиск більший?

Розв'язання. Проведемо на графіку будь-яку ізотерму. Вона перетне ізобару $p_2 - \text{сопзі}$ при більшому значенні об'єму V_2 , ніж ізобару $p_1 = \text{сопві}$. Але за однієї і тієї самої температури тиск газу тим більший, чим менший його об'єм, що випливає із закону Бойля—Маріотта:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}; \text{ отже, } p_2 < p_1.$$



Мал. 23

? 1. Що таке ізопроцеси? 2. Як можна експериментально перевірити закони Бойля—Маріотта, Гей-Люссака і Шарля? 3. Накресліть, користуючись координатними осями p, V , ізотерму, ізохору й ізобару.

Вправа 4 у кисневій системі літака міститься $2,8 \cdot 10^3\text{ м}^3$ кисню під тиском $2 \cdot 10^7\text{ Па}$. На максимальній висоті підйому пілот з'єднує за допомогою крана цю систему з порожнім балоном об'ємом $5 \cdot 10^2\text{ м}^3$. Який тиск встановиться в ній? Процес розширення газу відбувається за сталої температури.

2. Тиск у кабіні космічного корабля за температури 290 К дорівнює $9,7 \cdot 10^4\text{ Па}$. Як зміниться тиск повітря з підвищенням температури на 8 К ?

3. Чому балони зі стиснутими газами (киснем, воднем, ацетиленом) не можна нагрівати вище $35\text{ }^{\circ}\text{C}$?

4. На графіку (мал. 24) зображено залежність тиску газу від температури. Як змінювався об'єм даного газу під час переходу його із стану 1 у стан 2? Маса газу не змінювалася.

p

0

Мал. 24

5. Манометр на балоні із стиснутим газом за температури $T_1 = 300$ К показав тиск $p_1 = 1,52 \cdot 10^6$ Па, а під час зниження температури до $T_2 = 280$ К тиск $p_2 = 1,42 \cdot 10^6$ Па. Визначте за цими даними, чи витікав газ із балона.

6. Газопроводом подається вуглекислий газ під тиском $p = 3,9 \cdot 10^5$ Па і за температури $T = 280$ К. Яка швидкість проходження газу в трубі з площею поперечного перерізу каналу труби $S = 5$ см², якщо за $t = 10$ хв проходить 2 кг вуглекислого газу? Молярна маса вуглекислого газу $M = 0,44$ кг/моль.

§ 12- Застосування стиснутих і розріджених газів у техніці

Велика стисливість газу, залежність тиску і об'єму газу від температури, легкість регулювання тиску роблять газ незамінним робочим тілом у теплових двигунах і двигунах, що працюють на стиснутому газі. Він є одним з найдосконаліших амортизаторів, що застосовуються в ряді пристроїв.

У механічних майстернях і цехах заводів широко використовують пневматичні інструменти ударної дії: молоти, вібратори, трамбовки, палебої і т. д., а також пневматичні свердлильні і шліфувальні машини, гайковерти тощо. Використання цього обладнання приблизно у 6 раз підвищує продуктивність праці порівняно з роботою ручним, немеханізованим інструментом. Під час виконання різноманітних операцій на металорізальних верстатах застосовують пневматичні затискні пристрої: пневматичні патрони, пневматичні слюсарні лещата тощо. Вони створюють великі сили для затискання деталей і дають змогу регулювати їх у широких межах, забезпечуючи задану послідовність дії затискних механізмів.

У цехах машинобудівних заводів з великосерійним виробництвом впроваджені пневматичні вантажопідйомні пристрої: крани, підймальні столи, штовхачі тощо. Пневматичні пристрої дедалі ширше використовують для автоматизації виробничих процесів, які успішно конкурують з механічними, електричними та іншими системами. Це пояснюється їх економічністю і простотою конструкції.

Для виконання ряду допоміжних робіт у машинобудуванні (піскоструминне очищення поверхонь від іржі й окалини, видалення стружки з верстатів, нашарування розпилюванням металу, нанесення захисного шару на поверхню готових деталей під час їх консервації тощо) створено пневматичний інструмент, який працює від струмини стиснутого повітря.

Найбільшим споживачем стиснутого повітря є гірничорудна промисловість. Так, добування кам'яного вугілля і руди здійснюється за допомогою пневматичних відбійних молот-

ків, перфораторів, машин для буріння отворів під час підривних робіт і багатьох інших пневматичних інструментів.

Цікавий приклад використання стиснутого повітря — застосування його в апаратах на повітряній подушці. Принцип їх дії дуже простий. У простір між днищем апарата і поверхнею, над якою він рухається, за допомогою потужних компресорів нагнітають повітря, утворюючи ніби подушку зі стиснутого повітря, яка трохи піднімає апарат над поверхнею. Щоб такий апарат рухався в горизонтальному напрямі, використовують гвинтові або турбореактивні двигуни. В багатьох країнах світу сконструйовано сотні різноманітних машин на повітряній подушці: мотоцикл і моторолери, автомобілі, катери тощо. Особливо інтенсивно ведуться роботи над створенням потягів на дуже тонкій повітряній подушці (повітряному змащенні), що дає можливість досягти швидкостей руху близько 400 км/год.

Пневматичні вимірні прилади дають змогу вимірювати в найкоротший час розміри з точністю до 10^{-8} м, допускаючи при цьому мінімальні похибки. Завдяки високій точності вимірювань за допомогою пневматичних приладів стало можливим створення автоматичних методів контролю і сортування виробів масового виробництва за розмірами.

Не менш важливі і різноманітні застосування розріджених газів або газів у стані вакууму. Вакуумні установки широко використовують у кондитерській і харчовій промисловості, на тваринницьких фермах (пневматичні вакуумні годівниці та доїлки для худоби), для пресування пластмас і зварювання металів. Високий вакуум потрібен в електричних і багатьох електронних лампах, рентгенівських і телевізійних трубках, лічильниках і прискорювачах елементарних частинок. Але особливо важливе застосування вакууму в металургії. Без нього не можна було б спікати заготовки із твердосплавних порошків, вести рафіноване очищення ртуті, цинку, магнію, барію, виготовляти деталі з танталу і ніобію, відновлювати метали з руд і хімічних сполук, добувати високоякісні сталі і сплави (вакуумні печі, камери вакуумування, розливання у вакуумі тощо).

§ 13. Насичена і ненасичена пара

У природі, техніці і побуті ми часто спостерігаємо перетворення рідких і твердих речовин у газоподібний стан. В ясний літній день швидко висихають мокра білизна, калюжі, які залишилися після дощу. З часом зменшуючись, зникають шматки сухого льоду, зменшуються розміри шматочків нафталіну, яким пересипають вовняні речі тощо. У всіх цих випадках спо

стерігається процес перетворення речовин у газоподібний стан — у пару.

Пароутворення відбувається двома способами — *випаровуванням* і *кипінням*. Розглянемо спочатку випаровування, яке можна визначити як пароутворення, що відбувається лише з поверхні рідини.

Цей процес відбувається за будь-якої температури, що легко пояснюється молекулярно-кінетичною теорією. Молекули рідини, як і газу, мають різні швидкості. Деякі з них мають достатню кінетичну енергію для того, щоб відірватися від поверхні і вийти із сфери дії молекулярних сил. Тому над рідиною завжди є її вільні молекули, які утворюють пару.

Оскільки відриваються і вилітають з рідини найшвидкіші молекули, середня кінетична енергія молекул, які залишилися, зменшується. Внаслідок цього рідина під час випаровування охолоджується. Це явище використовують у техніці, зокрема побутовій. Так, шафа електричного холодильника охолоджується завдяки тому, що рідина, яка випаровується в холодильному агрегаті, поглинає енергію з навколишнього середовища. Щоб температура рідини у процесі випаровування залишалася сталою (тобто щоб не змінювалася її внутрішня енергія), треба безперервно підводити до неї енергію, яка дорівнює роботі, виконуваній проти сил зчеплення молекул і проти сили зовнішнього тиску.

У результаті хаотичного руху над поверхнею рідини молекули пари можуть повертатися в неї. Цей процес називають *конденсацією пари*. З наближенням до поверхні рідини сили притягання прискорюють молекулу, надаючи їй додаткової кінетичної енергії, такої, яку затрачено на подолання цих сил, і, повернувшись, молекула має таку саму кінетичну енергію, яку мала під час випаровування. Тому *в процесі конденсації пари виділяється стільки ж енергії, скільки було затрачено на її утворення*.

Якщо рідина перебуває у відкритій посудині, то випаровування її відбувається доти, поки вся вона не перетвориться в пару. З курсу фізики 8-го класу і повсякденного життя ви знаєте, що швидкість випаровування тим більша, чим вища температура рідини, чим більша її поверхня, чим швидше видаляється пара, яка утворилася над поверхнею, і чим менший зовнішній тиск. Швидкість випаровування залежить також від природи речовини, яка випаровується. Так, ефір випаровується швидше за воду, а вода — швидше за олію, що пояснюється різними силами взаємодії між молекулами цих речовин.

Дещо інша картина випаровування спостерігається тоді, коли рідина перебуває в закритій посудині і займає лише

частину її об'єму. На початку процесу кількість молекул, які вилітають з рідини, перевищує кількість молекул, які знову повертаються в неї, і концентрація молекул пари зростає. Але чим більше стає молекул, які вилетіли з рідини, тим більше їх потрапляє назад у рідину. Нарешті настає такий момент, коли кількість молекул, які вилітають з рідини за одиницю часу, виявляється такою самою, як і кількість молекул, що повертаються в неї за той самий час. Очевидно, починаючи з цього моменту, концентрація молекул пари буде сталою. Такий стан називають *динамічною рівновагою рідини і пари*. **Пару, яка перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають насиченою.**

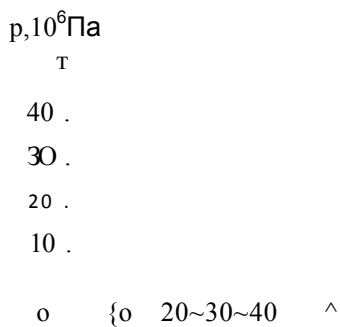
Таким чином, можна зробити висновок, що насичена пара має за даної температури найбільшу кількість молекул в одиниці об'єму (або, інакше кажучи, максимальну густину) і чинить найбільший тиск.

У різних рідин динамічна рівновага з парою настає за різної густини пари (концентрації молекул). Причина цього полягає в неоднаковості сил молекулярної взаємодії. З рідин, в яких сили взаємного притягання частинок великі, наприклад із ртуті, можуть вилітати лише найшвидші молекули, кількість яких незначна. З рідин з малими силами притягання, наприклад із ефіру, за тієї самої температури вилітає багато молекул, і динамічна рівновага настає тільки за умови значної їх концентрації в парі.

Пару, яка не перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною (не досягла насичення), **називають ненасиченою**. Іншими словами, ненасиченою буде пара над поверхнею рідини, коли випаровування переважає над конденсацією. Очевидно, що густина ненасиченої пари менша за густину насиченої пари.

Властивості ненасиченої пари можна описувати газовими законами для ідеального газу: Бойля—Маріотта, Шарля, Гей-Люссака, Клапейрона. Властивості пари тим точніше відповідають цим законам, чим менш насиченою є пара, тобто чим менша її густина.

Залежність між тиском і температурою насиченої пари не підлягає закону Шарля, тобто закон Шарля до насиченої пари незастосовний. Розглянемо причину цього. Нагрівання ідеального газу за сталого об'єму приводить до підвищення його тиску внаслідок зростання середньої кінетичної енергії молекул (частішими стають їх удари об стінку посудини, і тим більший імпульс передають вони під час кожного удару). В результаті нагрівання насиченої пари зростає не лише середня кінетична енергія молекул, а й кількість цих молекул (внаслідок інтенсивнішого випаровування зростає маса пари). Тому тиск насиченої пари з підвищенням температури зростає



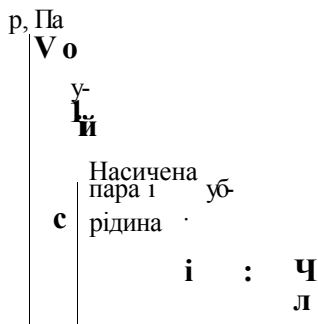
Мал. 25

швидше, ніж тиск ідеального газу. На малюнку 25 зміну тиску ідеального газу показано пунктирною лінією.

? 1. Що відбувається з насиченою парою у разі ізотермічного зменшення (збільшення) її об'єму? 2. Що треба зробити для підвищення тиску насиченої пари? 3. Чи застосовні закони ідеального газу до насиченої пари? Чому? Як змінюється тиск насиченої пари зі зміною її об'єму?

§ 14. Ізотермічна температура

Спробуємо зобразити графічно перехід ненасиченої пари в рідину під час зменшення її об'єму без зміни температури. В цьому випадку тиск пари зростатиме доти, поки не досягне тиску насиченої пари за даної температури. Ділянка графіка *AB* (мал. 26) є гілкою ізотерми; точка *B* відповідає утворенню насиченої пари. З цього моменту за подальшого зменшення об'єму починається конденсація пари, а тиск її залишається сталим. Відповідна гілка *BC* ізотерми (разом з тим і ізобари, окрім крайніх точок) характеризує стан речовини, який існує одночасно у вигляді рідини і насиченої пари. Потім настає момент, коли вся пара перетворюється в рідину, об'єм речовини в цьому стані зображається точкою *C*. Оскільки рідина майже нестискувана, то частина ізотерми *CO*, яка відповідає ізотермічному стисканню рідини, майже паралельна осі ординат. Криву *ABCO* називають ізотермою пари і рідини.



Мал. 26

Густина рідини звичайно значно більша за густину її пари, тому чітко видно межу поділу між ними.

Під час нагрівання густина насиченої пари зростає, а густина рідини зменшується (на мал. 27 показано залежність густини рідкого ефіру та його пари від температури). Тобто зі зростанням температури їх густини зближуються і за деякої температури T_k стають однаковими. В цей момент між рідиною і парою зникає межа поділу, теплота пароутворення пере-

творюється на нуль, пару і рідину не можна розрізнити. Температуру $T_{ю}$ за якої відбувається таке явище, називають критичною температурою, а стан речовини, за якого зникає відмінність між фізичними властивостями її рідини і пари, називають критичним станом. Можна сказати, що за критичної температури спостерігається не два стани речовини — газоподібний і рідкий, а один. Під час дальшого нагрівання речовина залишається газом за будь-якого тиску, і розділити її на пару і рідину за допомогою стискання неможливо.

$\rho, \text{кг/м}^3$

4

0,08

0,04

$^{\circ} 273 \quad 373 \quad 473 \quad T$

Мал. 27

Тиск насиченої пари речовини за її критичної температури називають *критичним тиском*. Він є найбільшим із можливих значень тиску насиченої пари цієї речовини. Для води, наприклад, критичний тиск дорівнює $2,2 \cdot 10^7$ Па (225,6 атм), для оксиду карбону (вуглекислий газ) — $7,35 \cdot 10^6$ Па (75 атм), а для гелію — всього $0,23 \cdot 10^6$ Па (2,3 атм). Об'єм, що його займає речовина у критичному стані, називають *критичним об'ємом*. Він відповідає найбільшому значенню об'єму, який може займати дана маса речовини у рідкому стані.

Якщо запаяти в тонкостінній скляній ампулі таку кількість ефіру, щоб його критичний об'єм дорівнював внутрішньому об'єму ампули, то можна продемонструвати перехід ефіру у критичний стан. Будемо рівномірно нагрівати таку ампулу з ефіром. Спочатку межа між рідиною і парою чітка, поверхня рідини увігнута (мал. 28, а). З нагріванням рідина розширюється, її густина зменшується, і поверхня стає плоскою (мал. 28, б). Потім ефір починає бурхливо випаровуватися (мал. 28, в), але густина його продовжує зменшуватися, оскільки він розширюється; густина ж його насиченої пари зростає. За температури 194°C видима межа поділу рідкого ефіру і його пари розпливається (мал. 28, г), насичену пару і рідину неможливо відрізнити одну від одної, їх властивості стають однаковими. За температури вище 194°C вся ампула заповнюється однорідною прозорою речовиною.

$\Gamma \quad \partial\Gamma$

и $V/ \quad \text{ЧУ} \quad V/$

Якщо ампулу охолоджувати, всі процеси відбуваються в ній у зво~

Мал. 28

ротній послідовності: за температури 194 С в ампулі миттєво утворюється густий туман (мал. 28, г), потім з'являється плоска межа між рідким ефіром і його паром (мал. 28, д), поверхня рідини поступово стає увігнутою і т. ін. Критичні температури так само, як і критичні тиски, об'єми і густини, в різних речовинах різні (див. табл. 1).

Таблиця 1

Критичні температури й тиски деяких речовин

Речовина	Критична температура, С	Критичний тиск, $\times 10^6$ Па (атм)
Вода	374,2	22,13 (225,6)
Ефір етиловий	193,8	3,59 (37,0)
Вуглекислий газ	31,0	7,35 (75,0)
Кисень	-118,8	5,04 (51,4)
Азот	-147,1	3,39 (34,6)
Водень	239,9	1,30 (13,5)
Гелій	-267,9	0,23 (2,3)

51 Зауважимо ще раз, що жодна речовина за температури, вищої від критичної, не може існувати в рідкому стані, якому б тиску вона не піддавалась. Якщо ж температура речовини дорівнює критичній, для її переведення з газоподібного стану в рідкий треба створити тиск, що дорівнює критичному; за температур, нижчих за критичну, газ перетворюється в рідину, коли тиск менший за критичний. Тому можна сказати, що принципової відмінності між газом і паром немає. Температури речовин у газоподібному стані за нормальних умов перевищують критичну. Паром ж називають газоподібний стан речовини, для якої звичайні температури виявляються нижчими за її критичну температуру. Така речовина за звичайних умов може перебувати як у рідкому, так і в газоподібному станах.

? 1. Яку температуру називають критичною? 2. За критичної температури питома теплота пароутворення будь-якої рідини дорівнює нулю. Чому? 3. Який стан речовини називають критичним? У чому полягають його особливості? 4. Чи можна перетворити в рідину пару азоту за температури 20 С? Відповідь поясніть.

§ 15. Зрідження газів

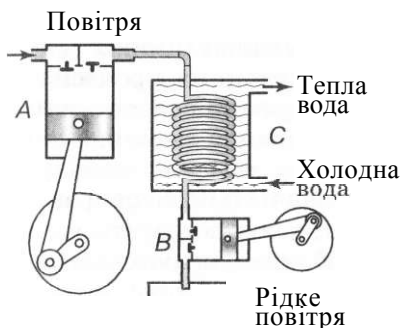
Подібність газів до ненасиченої пари рідин і підпорядкованість тим самим законам наводило на думку про можливість перетворення газів у рідину (за аналогією з конденсацією

пари). Справді, перший газ (аміак) було переведено у рідкий стан уже в 1799 р. Особливий внесок в одержання зріджених газів було зроблено англійським фізиком М. Ф а р а д е є м (1791—1867), який перетворив газ у рідину в результаті одночасного охолодження і стискання. М. Фарадею удалося дістати в рідкому стані всі відомі на той час гази, за винятком азоту, кисню, метану, оксиду нітрогену і оксиду карбону.

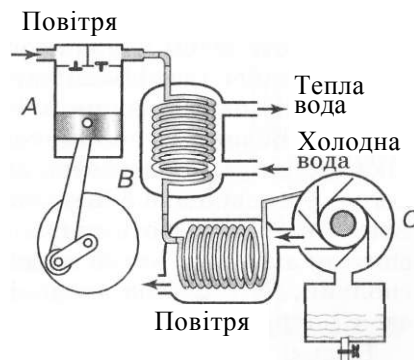
До того як було встановлено існування критичної температури, робилися спроби зріджувати й ці гази, збільшуючи тиск. Однак після відкриття критичної температури для кожної речовини стало зрозумілим, що добування рідкого азоту, кисню тощо вимагає їх охолодження до температури, нижчої за критичну, тобто глибшого охолодження, ніж те, яке застосовувалося раніше. Охолодивши азот, кисень і водень нижче відповідних критичних температур і застосувавши більші тиски, їх також удалося перевести у рідкий стан. У 1908 р. дістали і рідкий гелій, критична температура якого становить $-267,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Досить широко використовується метод охолодження газів до температури, нижчої за критичну, внаслідок виконання ними роботи за адиабатного розширення. Холодильні машини, які працюють на основі цього принципу, називають *детандерами*. Детандери бувають двох видів: поршневі і турбінні.

Розглянемо принцип дії поршневого детандера (мал. 29). Газ (повітря), який надходить у компресор А, від стискання до кількох мільйонів паскалів (десятьків атмосфер) нагрівається. Для попереднього охолодження його пропускають через змійовик С, який обтікає проточна вода, після чого він надходить у розширювач (детандер) Б. Розширюючись, газ штовхає поршень і виконує роботу за рахунок своєї внутрішньої енергії. При цьому він охолоджується настільки, що його температура стає нижчою за критичну, і він перетворюється в рідину, яка стікає в посудину £).



Мал. 29



Мал. 30



ПЕТРО КАПИЦА

(1894 - 1984)

Видатний російський фізик. Створив нові методи зрідження водню і гелію, сконструював нові типи зріджувачів (поршневі, детандерні і турбодетандерні установки). Розробив новий турбінний метод одержання великих кількостей рідкого кисню. Розробив технічні умови одержання рідкого гелію, вивчив його властивості, відкрив надтекучість рідкого гелію.

У 1938 р. її. Л. Капіца запропонував досить продуктивний турбодетандер для зрідження газів, який став основою для побудови промислових установок. Такий турбодетандер складається з компресора *A* (мал. 30), теплообмінника *B* і невеликої турбіни *C*. Стиснутий компресором до кількох десятків мільйонів паскалів газ проходить через теплообмінник і, охолонувши, спрямовується на турбіну. Від швидкого обертання турбіни газ різко розширюється і виконує роботу за рахунок зменшення своєї енергії. Його температура знижується настільки, що частина газу зріджується. Газ, який вже охолодився, але ще не встиг перейти у рідкий стан, переходить у теплообмінник, де охолоджує наступну порцію стиснутого газу, а потім повертається в компресор і знову стискається.

Зріджені гази широко застосовуються як у фізичних дослідженнях, так і в техніці. Найбільше виробляється рідкого повітря, з якого потім добувають у рідкому стані майже всі гази, що входять до його складу. Нині це найдешевший спосіб добування чистого кисню, який широко застосовується в суміші з ацетиленом для автогенного зварювання і різання металів, підземної газифікації вугілля, для доменних процесів, в металургії кольорових металів, під час одержання синтетичних алмазів. Великим споживачем рідкого кисню є космічна техніка, де він використовується не лише як джерело «повітряного» середовища, а й як складова частина пального для ракет. Азот, який добувають з рідкого повітря, використовується для синтезу аміаку, з якого виробляють добрива і нітрогеновмісні сполуки, аргон, неон та інші інертні гази — для заповнення електричних ламп розжарення і газосвітних ламп.

Низькі (кріогенні) температури знаходять дедалі більше застосування в біології і медицині. Так, рідкий азот засто-

совують для тривалого зберігання крові, плазми, кісткового мозку, тканин і окремих органів людини. З успіхом використовується кріохірургічний інструмент, за допомогою якого можна місцево заморожувати окремі ділянки хворих органів, які треба усунути. Нова галузь науки — кріобіологія вивчає процеси в клітинах і тканинах за їх глибокого охолодження.

? 1. Чому М. Фарадею не вдалося перетворити в рідину кисень, водень, азот і деякі інші гази? 2. Який процес лежить в основі охолодження газу під час його зрідження? 3. Який принцип дії турбодетандера? 4. Наведіть приклади практичного використання зріджених газів.

§ 16. Кипіння. Залежність температура кипіння від тиску

Вище ми розглянули один із двох способів перетворення рідин у пару — випаровування. Але можливий і інший спосіб пароутворення — кипіння, добре відоме з повсякденного життя. В відкритій посудині рідина випаровується за будь-якої температури, але кипить вона у тій самій відкритій посудині тільки за певної температури. Це найістотніша відмінність кипіння від випаровування. Кипіння супроводжується, як ви знаєте з курсу фізики 8-го класу, утворенням у всьому об'ємі рідини бульбашок пари, які швидко зростають і спливають на поверхню. Проте механізм перетворення рідини в пару під час кипіння і випаровування в основному однаковий.

Нагріватимемо воду у відкритій скляній посудині (колбі) так, щоб можна було спостерігати явища, які відбуваються всередині посудини (мал. 31). Спочатку звернемо увагу на туман, який утворився над колбою. Він свідчить про випаровування з поверхні рідини в посудині. Виходячи назовні, водяна пара змішується з холодним повітрям і конденсується. Під час підвищення температури в окремих місцях більш нагрітих стінок колби стають помітними численні маленькі бульбашки. Їх розміри поступово зростають, оскільки вони наповнюються паром води, яка випаровується зі стінок, тобто випаровування рідини відбувається не лише з її поверхні, а й всередині. Зі збільшенням розмірів бульбашок зростає виштовхувальна сила, яка діє на них з боку рідини, і, нарешті, вони відриваються від стінок посудини й



Мал. 31

піднімаються вгору. Досягнувши вільної поверхні води, бульбашки лопаються, і водяна пара, що містилася в них, виходить в атмосферу. Таке випаровування всередині рідини з виділенням бульбашок пари називають *кипінням*.

За яких саме умов бульбашки, розширюючись, можуть долати гідростатичний тиск рідини й атмосферний тиск і виходити на поверхню рідини? Очевидно, для цього тиск насиченої пари всередині бульбашок має бути не меншим за атмосферний (у разі невеликих глибин гідростатичним тиском рідини можна знехтувати). Це означає, що **кипіння відбувається за такої температури, коли тиск насиченої пари рідини дорівнює атмосферному** (точніше трохи перевищує його).

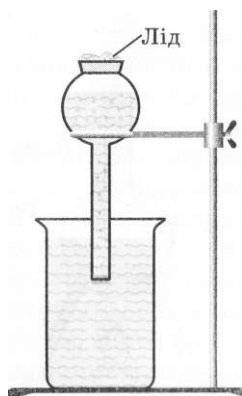
Отже, під час зменшення тиску на рідину температура її кипіння знижується, а під час збільшення тиску — підвищується. Переконаємося в цьому на досліді. Кипіння води під зниженим тиском можна продемонструвати за допомогою круглодонної колби (мал. 32). Заповнимо її водою більше, ніж наполовину і нагріватимемо до закипання рідини. Під час кипіння води колбу закриємо, попередньо погасивши полум'я, і перевернемо догори дном. Коли вода трохи охолоне і кипіння зовсім припиниться, покладемо на дно колби шматочки льоду. Бурхливе кипіння води відновиться.

Отже, під час зниження температури тиск пари, яка знаходиться над водою в колбі, зменшується, і рідина закипає знову за порівняно низької температури.

Другим прикладом може бути добре відоме альпіністам зниження температури кипіння води у міру підймання над рівнем моря. Зі збільшенням висоти місцевості тиск повітря зменшується, і вода закипає за нижчої, ніж 100 °С, температури.

Кипіння води під зниженим тиском знаходить застосування у цукровій промисловості. Кристалізацію цукру проводять у котлах зі зниженим тиском, завдяки чому цукровий сироп бурхливо кипить за температури всього в кілька десятків градусів. При цьому не виникає небезпеки пригорання цукру і швидко видаляється зайва вода.

Навпаки, у тому випадку, коли потрібно підвищити температуру води вище 100 °С, створюють досить великий тиск над її поверхнею. Пристрої, які застосовуються з цією метою (їх називають *автоклавами*), широко використовують у хімічній і харчовій



Мал. 31

промисловості, в медицині для стерилізації хірургічних інструментів, для обробки деревини на паперових фабриках. Кипіння під підвищеним тиском використовується у добуванні синтетичної нафти, гліцерину, жирних кислот тощо.

Властивість рідини закипати під тиском за вищих температур покладена в основу дії потужних парових двигунів високого тиску. У парових турбінах потужністю 200 тис. кВт використовується пара під тиском порядку $2 \cdot 10^7$ Па і за температури близько 600 °С. Такі високі параметри пари забезпечують значну економію пального і високий ККД турбін.

? 1. Чим відрізняється явище кипіння рідини від її випаровування? 2. За якої умови починається кипіння рідини? 3. Як залежить температура кипіння рідини від зовнішнього тиску? 4. Чи може вода кипіти за температури, нижчої 100 °С? Вищої 100 °С?

§ 17. Вологість повітря

В атмосфері Землі, особливо в нижніх шарах, в результаті випаровування міститься величезна кількість водяної пари. Наявність її в повітрі є необхідною умовою існування життя на Землі. Помірна вологість повітря забезпечує нормальне життя і діяльність людини. Надмірна вологість шкідлива для деяких виробничих процесів, для зберігання продуктів і матеріалів. Про вміст водяної пари в атмосфері щоденно повідомляють у зведенні погоди.

Щоб дізнатися, скільки міститься у повітрі водяної пари можна пропустити певний об'єм повітря через речовину, яка вбирає водяну пару, і знайти масу пари, яка знаходиться в 1 м³ повітря. **Величину, яка вимірюється кількістю водяної пари (в грамах), що міститься в 1 м³ повітря, називають абсолютною вологістю повітря.** Інакше кажучи, абсолютну вологість вимірюють густиною водяної пари, яка знаходиться в повітрі.

Практично виміряти кількість водяної пари в 1 м³ повітря дуже важко. Але числове значення абсолютної вологості мало відрізняється від тиску водяної пари за таких самих умов, виміряного в міліметрах ртутного стовпа. А тиск газу вимірюється значно простіше. Тому в метеорології прийнято називати абсолютною вологістю повітря тиск водяної пари, яка міститься в ньому за даної температури, виміряний у міліметрах ртутного стовпа.

За абсолютною вологістю повітря ще не можна встановити, наскільки воно сухе чи вологе. Якщо температура низька, то дана кількість водяної пари в повітрі може виявитися дуже близькою до насичення, тобто повітря буде вологим. За вищої температури та сама кількість водяної пари далека від

насичення і повітря сухе. Наприклад, за абсолютної вологості 6 мм рт. ст. в жаркий липневий полудень повітря буде дуже далеко від насичення, а в холодний осінній день ця сама кількість водяної пари може насичувати його так, що з'являється туман, мряка.

Наскільки водяна пара, яка знаходиться у повітрі, близька до стану насичення, показує *відносна вологість*.

Відносною вологістю повітря **називають** величину, яка вимірюється відношенням абсолютної вологості до кількості **пари**, необхідної для насичення 1 м³ повітря за тій самої **температури**. Її виражають звичайно у відсотках. Отже, відносна вологість повітря показує, який відсоток становить абсолютна вологість p_a від густини водяної пари p_n , яка насичує повітря за даної температури:

$$\phi = \frac{p_a}{p_n} \cdot 100\% \quad (17.1)$$

З рівняння Клапейрона

$$p = \frac{M}{M} \cdot \frac{p_a}{p_n} = \frac{p_a}{p_n} \cdot P^*$$

Тому в метеорології відносною вологістю називають величину, яка вимірюється відношенням тиску водяної пари, яка міститься у повітрі, до тиску водяної пари, яка насичує повітря за тієї самої температури.

Відносна вологість повітря залежить не тільки від абсолютної вологості, а й від температури. Якщо кількість водяної пари у повітрі не змінюється, то зі зниженням температури відносна вологість зростає, оскільки чим нижча температура, тим ближче водяна пара до насичення. Для обчислення відносної вологості користуються відповідними таблицями (див. табл. 2), де подано значення p_n (або p_n^*).

Задача 1. У цех заводу треба подати 20 000 м³ повітря за температури 18 °С і відносної вологості 50 %. Температура повітря надворі 10 °С, а відносна вологість 60 %. Скільки води треба додатково випарити, щоб повітря, яке надходить знадвору, набуло необхідних температур і вологості?

Розв'язання. За таблицею 2 знаходимо густину насиченої пари (тобто масу водяної пари в 1 м³) за 18 °С, $p_{n1} = 15,4 \text{ г/м}^3$. Отже, 20 000 м³ повітря за 18 °С і відносній вологості $\phi_1 = 50\%$ має містити $m_1 = 15,4 \text{ г/м}^3 \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ м}^3 \cdot 0,5 = 154 \text{ кг}$ водяної пари. За цією ж таблицею знаходимо густину насиченої пари за 10 °С, $p_{n2} = 9,4 \text{ г/м}^3$.

Таким чином, у тому самому об'ємі повітря за температури 10 °С і відносній вологості $\phi_2 = 60\%$ знаходилося $m_2 = 9,4 \text{ г/м}^3 \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ м}^3 \cdot 0,6 = 112,8 \text{ кг}$ водяної пари. Отже, додатково треба випарити $m_1 - m_2 = 154 - 112,8 = 41,2 \text{ кг}$ води.

Таблиця 2

Густина і тиск насиченої водяної пари за температури від 0 до 30 °С

°С	ρ_n , г/м ³	p_n , мм рт. ст.
0	4,8	4,6
1	5,2	4,9
2	5,6	5,3
3	6,0	5,7
4	6,4	6,1
5	6,8	6,6
6	7,3	7,0
7	7,8	7,6
8	8,3	8,0
9	8,8	8,6
10	9,4	9,2
11	10,0	9,8
12	10,7	10,5
13	11,4	11,2
14	12,1	12,0
15	12,8	12,0
16	13,6	13,6
17	14,5	14,5
18	15,4	15,5
19	16,3	16,5
20	17,3	17,5
21	18,3	18,7
22	19,4	19,8
23	20,6	21,1
24	21,8	22,4
25	23,0	23,8
26	24,4	25,2
27	25,8	26,7
28	27,2	28,4
29	28,7	30,0
30	30,3	31,8

Ми вже з'ясували, що відносна вологість повітря залежить від температури. Нехай абсолютна вологість повітря за 28 °С дорівнює 13,6 г/м³. Оскільки густина насиченої водяної пари p_n за цієї температури дорівнює 27,2 г/м³ (див. табл. 2), то відносна вологість становить

$$\phi_1 = \frac{13,6}{27,2} = 50 \% .$$

Припустимо, що температура повітря знизилась до 16 °С, а абсолютна вологість не змінилась. За цієї температури відносна вологість повітря

$$\phi_2 = \frac{13,6}{13,6} = 100 \% ,$$

тобто повітря буде насиченим водяною парою. Якщо ж температура знизиться до 10 °С, то з кожного кубічного метра повітря сконденсується по 13,6 г - 9,4 г = 4,2 г водяної пари.

Таким чином, знижуючи температуру, можна довести відносну вологість повітря до 100 %, не змінюючи кількість пари, яка є в ньому. **Температуру, за якої відносна вологість повітря становить 100 % (повітря виявляється насиченим водяною парою), називають точкою роси.** В розглянутому вище прикладі точка роси дорівнює 16 °С. Якщо температура повітря стане хоча б трохи нижчою за точку роси, пара почне конденсуватися, з'являться туман і краплі роси на різних предметах.

Задача 2. Температура повітря увечері була 18 °С, а відносна вологість 65 %. Вночі температура знизилась до 4 °С. Чи випала вночі роса? Якщо так, то скільки водяної пари сконденсувалося з 1 м³ повітря?

Р о з в' я з а н н я. За таблицею 2 знайдемо густина насиченої пари за $i_1 = 18$ °С ($p_{n1} = 15,4$ г/м³). Тоді абсолютна вологість повітря $p_a = p_{n1} \cdot 0,65$, або $p_a = 10,01$ г/м³.

Але таку густина має насичена водяна пара за температури «11 °С. Отже, роса почне випадати вже за температури 11 °С.

Щоб з'ясувати, скільки водяної пари сконденсується з 1 м³ повітря під час охолодження його до 4 °С, знайдемо за таблицею 2 густина насиченої пари за $i_2 = 4$ °С ($p_{n2} = 6,4$ г/м³). Таким чином, $\Delta t = 10,01$ г - 6,4 г = 3,61 г.

Точку роси можна визначити за допомогою *гігрометра* (мал. 33). Він складається з металевого резервуара P з відпорованою передньою стінкою і термометра T . У резервуар наливають невелику кількість ефіру. За допомогою груші G крізь ефір продувають повітря. Ефір випаровується, і температура стінок резервуара знижується. У разі досягнення

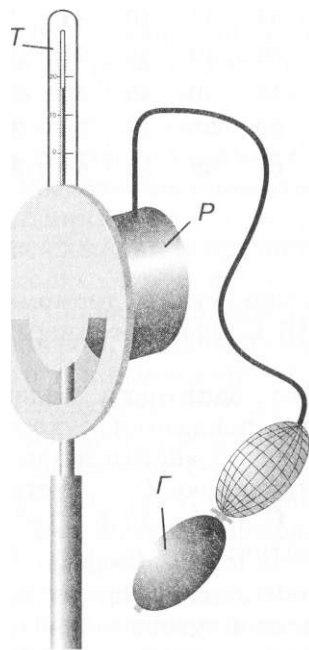
точки роси на передній стінці резервуара починає конденсуватися пара, яка міститься в повітрі (стінка пітніє).

Точку роси відлічують за шкалою термометра, за таблицею знаходять абсолютну вологість навколишнього повітря.

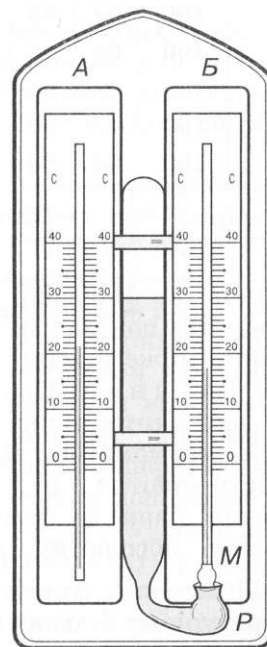
Щоб швидше визначити вологість, користуються *психрометром* (мал. 34). Він складається з двох однакових термометрів А і Б; резервуар одного з них обгорнутий марлею *М* (або батистом), кінець якої опущено у посудину *Р* з водою. Вода піднімається по тканині і, випаровуючись, охолоджує поверхню резервуара термометра. Показання вологого термометра *Б* знижуються порівняно з показаннями сухого *А*. Різниця їх показань тим більша, чим вища швидкість випаровування води з поверхні тканини на резервуарі термометра. Швидкість же випаровування залежить від відносної вологості навколишнього повітря: швидкість випаровування тим вища, чим нижча відносна вологість повітря.

За різницею показань сухого і вологого термометрів можна обчислити абсолютну і відносну вологість.

Щоб прискорити знаходження відносної вологості повітря, необхідні обчислення виконують заздалегідь і зводять у спеціальну таблицю (табл. 3), яка дає змогу за показаннями сухого і вологого термометрів відразу визначати відносну вологість.



Мал. 33



Мал. 34

Таблиця 3

Психрометрична таблиця

Показання сухого термометра, °С	Різниця показань сухого і вологого термометрів, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	82	63	45	28	11	–	–	–	–	–
2	100	84	68	51	35	20	–	–	–	–	–
4	100	85	70	56	42	28	14	–	–	–	–
6	100	86	73	60	47	35	23	10	–	–	–
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	–	–
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	–
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39
Відносна вологість, %											

Задача 3. Надвечір на березі річки сухий термометр психрометра показав 20 °С, а вологий 16 °С. За якої температури вранці може утворитися туман?

Розв'язання. Щоб відповісти на запитання задачі, треба визначити точку роси. Знаючи показання сухого і вологого термометрів, можна за таблицею 3 знайти відносну вологість повітря ($\phi = 66\%$), за таблицею 2 густину насиченої пари за температури 20 °С ($p_n = 17,3 \text{ г/м}^3$) і обчислити абсолютну вологість повітря: $p_a = \phi \cdot p_n$ або $p_a = 11,42 \text{ г/м}^3$. Тепер за таблицею 2 знаходимо, за якої температури ця кількість водяної пари насичуватиме повітря, тобто точку роси. Такою температурою буде приблизно 13 °С. Саме за цієї температури може утворитися туман.

; 1. Що таке абсолютна і відносна вологість повітря? 2. Як визначають абсолютну і відносну вологість в метеорології? 3. Як змінюється вологість повітря в приміщенні, якщо різниця показань термометрів психрометра зменшується? 4. Що таке точка роси? 5. Чому випадання роси відбувається звичайно під ранок? 6. Як пояснити утворення туману?

Вправа 5 Кондиціонер має подати в цех заводу $50\,000\text{ м}^3$ повітря за температури $15\text{ }^\circ\text{C}$ і відносної вологості 40% . Повітря на вулиці має температуру $0\text{ }^\circ\text{C}$ і відносну вологість 80% . Потрібно зволожувати чи підсушувати повітря, що подається в цех? Скільки води слід додатково випарити в повітря, що подається, чи відібрати від нього?

2. У кімнаті за температури $0\text{ }^\circ\text{C}$ відносна вологість повітря 80% . Якою буде відносна вологість цього повітря, якщо його температура підвищиться до $20\text{ }^\circ\text{C}$?

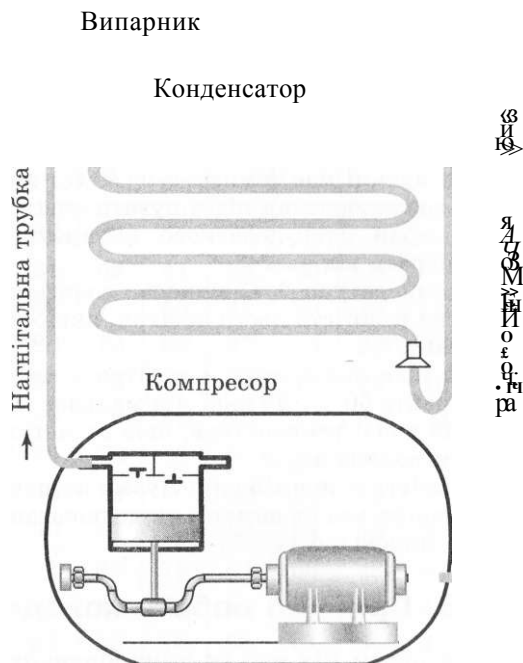
3. Під час роботи відносна вологість повітря в майстерні за температури $15\text{ }^\circ\text{C}$ становить 50% . До якої мінімальної температури може знижуватися в ній вночі температура, щоб на металевих предметах не конденсувалася водяна пара?

4. Допустима вологість у приміщенні музею не повинна перевищувати 70% . Чи виконується ця вимога, якщо показання вологого і сухого термометрів відповідно 17 і $21\text{ }^\circ\text{C}$?

§ 18. Принцип робо™ холодильника

Охолодження рідин під час їх випаровування покладене в основу роботи холодильників — приладів для створення помірно низьких температур, необхідних здебільшого у харчовій промисловості і в побутових умовах (для зберігання продуктів, медикаментів тощо).

Розглянемо принцип дії так званого компресійного холодильника (мал. 35), прикладом якого може бути широко розповсюджений побутовий холодильник. Як робоче тіло у ньому використовують фреон. Фреоном заповнена система конденсатора і випарника. Компресор, який приводиться в дію електродвигуном, відкачує газоподібний фреон з випарника і нагнітає його в конденсатор. Під час стискання фреон нагрівається. Охолодження його до кімнатної температури відбувається в конденсаторі, розташованому звичайно на задній стінці холодильної шафи. Охолоджений до кімнатної температури за підвищеного тиску, створеного у конденсаторі за допомогою компресора, фреон переходить у рідкий стан. З конденсатора рідкий фреон через капілярну трубку надходить у випарник. Відкачування пари фреону з випарника за допомогою компресора підтримує в ньому знижений тиск. У разі зниженого тиску у випарнику рідкий фреон кипить і випаровується навіть за температури, нижчої від $0\text{ }^\circ\text{C}$. Енергія на випарову



Мал. 35

вання фреону відбирається від стінок випарника, викликаючи охолодження їх. Відкачана пара фреону надходить у кожух компресора, звідки знову в конденсатор і т. д., по замкнутому колу.

Найнижча температура, яку можна дістати у випарнику (морозильній камері), визначається значенням тиску пари фреону, оскільки температура кипіння фреону, як і будь-якої іншої рідини, знижується зі зниженням тиску. У разі постійної швидкості надходження рідкого фреону з конденсатора у випарник через капілярну трубку тиск пари фреону у випарнику буде тим нижчий, чим довше працює компресор. Якщо немає потреби добиватися зниження температури у випарнику до гранично можливого значення, то компресор періодично зупиняється шляхом вимкнення електродвигуна, який приводить його в дію. Компресор вмикається автоматичним пристроєм, який підтримує у холодильній шафі задану температуру.

? 1. На чому ґрунтується дія холодильників? 2. Які гази використовують як робоче тіло для холодильників? 3. Ви, мабуть, звертали

увагу на те, що задня стінка працюючого побутового холодильника тепла. Чому? 4. Внаслідок чого охолоджується випарник? 5. У жаркий літній день домогосподарка відкрила дверці працюючого холодильника, щоб охолодити повітря в кімнаті. Чи змогла вона досягти бажаного результату? Чому?

§ 19. Особливості рідкого стану речовини

У попередніх параграфах ми розглянули властивості речовини в газоподібному стані. Тепер ознайомимося з деякими властивостями рідин. У рідину перетворюється будь-який газ за досить низької температури і високого тиску.

Які ж особливості рідкого стану? Чим він відрізняється від газоподібного?

Густина речовини в рідкому стані значно більша, ніж у газоподібному. Це означає, що в рідинах молекули практично щільно упаковані. На таких малих відстанях істотну роль відіграють сили взаємодії між молекулами. Тому властивості рідин, на відміну від газів, визначаються не тільки рухом молекул, а й їх взаємодією. Обчислити сили взаємодії між молекулами — завдання неймовірно складне. Воно не розв'язане і досі, оскільки ще не вдалося створити рівняння стану рідини, аналогічне рівнянню стану ідеальних газів. Однак багато властивостей рідини добре вивчені експериментально.

У рідині можна спостерігати окремі явища, характерні і для газів. Молекули рідини, як і молекули газу, здійснюють безперервні невпорядковані (хаотичні) рухи, і середня кінетична енергія цих рухів визначає температуру рідини. Хоча «свобода» цих рухів обмежена силами взаємодії між молекулами, молекули все ж можуть переміщатися з одного місця в інше. Тому рідина має таку властивість, як *текучість*. Завдяки цій властивості рідина набуває форми посудини, в якій вона перебуває. Молекулярні рухи уможливають змішування різних рідин (явище дифузії). Однак перемішування рідин відбувається набагато повільніше, ніж газів.

Хоч не всі рідини складаються з молекул — вони можуть складатися й з атомів, і з йонів, для спрощення користуватимемося терміном «молекула» і надалі.

Під час нагрівання рідини розширюються, але меншою мірою, ніж газу. Завдяки малій відстані між молекулами рідини майже не стискаються. Це легко зрозуміти, бо у разі спроби дальшого зменшення відстаней між молекулами різко зростають сили відштовхування між ними. Для зменшення об'єму рідини, яка перебуває під атмосферним тиском всього на 1 %, тиск на неї необхідно збільшити в сотні чи навіть

тисячі разів. Всі ці відмінності між рідиною і газом мають, в основному, кількісний характер. Однак велика різниця між густиною рідини і газу зумовлює і якісні відмінності між ними.

Найхарактернішою відмінністю рідини від газу є те, що рідина зберігає свій об'єм, а на межі з газом чи паром утворює вільну поверхню. Саме тому ми можемо налити півчашки кави, тримати в колбі воду, яка займає не весь об'єм колби. Гази ж завжди займають весь наданий їм об'єм.

У наступних параграфах розглянемо явища, пов'язані з існуванням в рідині вільної поверхні, так звані поверхневі явища.

§ 20. Властивості поверхні рідини. Поверхневий натяг

Всі ви, напевне, милувалися маленькими краплями роси, які на листках рослин набувають форми майже правильних кульок. Це явище спостерігав ще Г. Галілей, якого дуже дивувало, чому великі краплі води не розпливаються по всьому листку капусти, а набувають форми маленьких кульок. Таку ж форму мають краплі води на парафіні чи жирній поверхні, пролита на стіл ртуть тощо. Якщо ці краплі стикаються, вони зливаються в одну краплю, форма якої також наближається до кулястої. У космічному кораблі, який перебуває в стані невагомості, кулястої форми набувають не тільки окремі краплі, а й великі об'єми рідини.

Ці явища здаються дуже дивними. Адже ми звикли, що рідина набуває форми посудини, в якій вона знаходиться, і вільної форми не має. Виявляється, що так буває не завжди.

Галілей спостерігав, як змащена жиром голка може плавати на воді і як легкі комахи-водомерки швидко ковзають по поверхні води, як ковзанярі по льоду. Ці спостереження начебто суперечать існуванню архімедової сили. Але якщо голка прорве поверхню рідини, вона тоне, як і має бути під час дії архімедової сили. Як пояснити ці явища?

Покладемо лезо безпечної бритви, трохи вкрите жиром, на поверхню води. Воно не тоне. Коли лезо «плаває» на воді, то можна помітити невелике прогинання поверхні води. Якщо лезо занурити в глиб води, воно піде на дно. Це означає, що властивості поверхні рідини відрізняються від властивостей решти рідини. Як це можна пояснити?

Вся справа в тому, що молекули на поверхні рідини перебувають в інших умовах, ніж молекули всередині рідини. На кожен молекулу всередині рідини діють сили притягання з боку сусідніх молекул, які оточують її з усіх боків (мал. 36).

Результуюча цих сил дорівнює нулю. Над поверхнею рідини знаходиться пара, густина якої в багато разів менша за густину рідини, і взаємодією молекул пари з молекулами рідини можна знехтувати. Молекули на поверхні притягуються лише молекулами, які лежать нижче. Тому рівнодійна сил притягання, які діють на молекули поверхневого шару, не дорівнює нулю. Під дією цих сил молекули поверхневого шару втягуються всередину, кількість молекул на поверхні зменшується, і площа скорочується.

Однак усі молекули не можуть втягнутися всередину. На поверхні залишається така кількість молекул, за якої площа поверхні виявляється мінімальною за даного об'єму рідини. Ось чому рідини під дією молекулярних сил набувають сферичної форми, за якої поверхня мінімальна.

Скорочення поверхні рідини під впливом притягання її молекул всередину рідини відбувається так, ніби вздовж її поверхні діяла сила і викликала її скорочення. Цю силу називають *силою поверхневого натягу*.

Для виявлення дії сили поверхневого натягу скористаємося властивістю деяких рідин, наприклад мильної води, створювати тонкі плівки. Якщо опустити в мильну воду дротяне кільце і вийняти його, то воно затягується мильною плівкою — тонким шаром рідини. Покладемо на цю плівку невелику петельку з шовкової нитки (мал. 37, а) і проткнемо плівку в області, охопленій петелькою. Відразу ж оточуюча петельку мильна плівка, діючи на всі її елементи з однаковою силою, розтягне її і надасть їй форму кола (мал. 37, б).

Візьмемо вертикальний прямокутний дротяний каркас (мал. 38), одна сторона якого (СІ) рухома, і також утворимо на ньому мильну плівку. Якщо дати змогу рухомій стороні каркаса вільно переміщатися, вона під час скорочення плівки підніматиметься вгору. Щоб утримати її у початковому положенні СІВ_{IV} треба прикласти до неї достатню силу, наприклад підвісити невеликий тягарець.

Це означає, що з боку мильної плівки на горизонтальну частину каркаса СБ діє сила, яка намагається скоротити поверхню плівки. За модулем ця сила дорівнює вазі тягарця, яка зрівноважує її.

Отже, **сила поверхневого натягу — це сила, яка діє вздовж поверхні рідини, перпендикулярно до лінії, яка обмежує поверхню, і спрямована в бік її скорочення.**

Якщо проводити дослід з каркасами різних розмірів, то

-К-

Мал. 36

можна виявити, що абсолютна величина сили поверхневого натягу P пропорційна довжині l рухомої сторони каркаса, а відношення P/l для плівки з даної рідини завжди одне й те саме. Не залежить воно і від матеріалу каркаса. Отже, відношення сили поверхневого натягу, яка діє на межі поверхні рідини, до довжини цієї межі характеризує вільну поверхню самої рідини.

Відношення сили поверхневого натягу до довжини периметра, який обмежує поверхню рідини, називається **поверхневим натягом**. Цю величину позначають літерою σ :

$$\sigma = \frac{F}{l}. \quad (20.1)$$

З формули (20.1) видно, що поверхневий натяг вимірюють у **ньютонах на метр** (Н/м).

Задача 1. Вертикальний прямокутний дротяний каркас, одна горизонтальна сторона (перетинка) якого рухома і може ковзати по бічних, опускають у мильну воду, а потім витягують. Мильна плівка, що утворилася на каркасі, скорочуючись, піднімає горизонтальну перетинку завдовжки 75 мм в тому випадку, коли її маса і маса підвішеного до неї тягарця не перевищують 1,14 г. Визначити поверхневий натяг плівки.

Розв'язання. Оскільки мильна плівка має дві поверхні, то сила поверхневого натягу, яка діє на рухому сторону каркаса, $P = 2al$. Умову переміщення плівки можна записати так: $mg = 2aL$, звідси

$$a = \frac{mg}{2L} \approx 7,4 \cdot 10^{-2} \text{ н/м}.$$

Усі описані явища можуть створити враження, що поверхня рідини являє собою реальну натягнуту плівку, яку можна стягнути з рідини, мов шкірку з персика. Насправді такої натягнутої пружної плівки на поверхні рідини не існує. Будь-які молекули, які опиняються на її поверхні, знаходяться в особливих умовах порівняно з молекулами всередині рідини. І, як ми бачили, саме цим пояснюються властивості поверхневого шару.

Щоб переконатися в цьому, повернемося ще раз до досліду з мильними плівками. Дослід показує, що сила поверхневого натягу, незважаючи на збільшення поверхні, залишається сталою. Вага тягарця (див. мал. 38) одна й та сама за будь-якого значення переміщення рухомої сторони каркаса. Цим поверхня рідини відрізняється від пружних, наприклад гумових, плівок, в міру розтягнення яких збільшується відстань між молекулами вздовж поверхні, і пружна сила зростає. Поверхневий шар рідини не має пружних властивостей.

Із підвищенням температури рідини збільшується середня відстань між її частинками, а отже, сили молекулярного притягання зменшуються. Це означає, що поверхневий натяг має залежати також від температури. Досвід свідчить, що з підвищенням температури рідини поверхневий натяг зменшується і за умови критичної точки, коли густини рідини і пари однакові, поверхневий натяг дорівнює нулеві.

Поверхневий натяг істотно залежить від домішок до рідин. Речовини, які послаблюють поверхневий натяг рідини, називають *поверхнево-активними*. Найвідомішими поверхнево-активними речовинами для води є мило і пральні порошки. Вони сильно знижують її поверхневий натяг (приблизно з $7,5 \cdot 10^{-2}$ до $4,5 \cdot 10^{-2}$ Н/м). Це полегшує миття і прання білизни, оскільки високий поверхневий натяг чистої води не дає їй проникати між волокнами тканини і в дрібні пори. З молекулярної точки зору вплив поверхнево-активних речовин пояснюється тим, що сили притягання між молекулами самої рідини більші за сили притягання між молекулами рідини і домішок. Тому молекули рідини, розміщені у поверхневому шарі, з більшою силою втягуються всередину рідини, ніж молекули домішок. Внаслідок цього молекули рідини переходять з поверхневого шару в глиб її, а молекули поверхнево-активної речовини витісняються на поверхню.

? 1. Чим пояснюється текучість рідин? 2. Яка найбільш характерна особливість відрізняє рідину від газу? 3. Чим різняться стани молекул на поверхні і всередині рідини? 4. Чому вільна поверхня рідини скорочується? 5. Що таке поверхневий натяг? 6. Чи змінюється кількість молекул, які припадають на одиницю площі поверхні, у разі збільшення поверхні рідини?

Вп ава 6 СКЛЯИУ пластинку підвісили до динамометра.

Після цього нею доторкнулися до поверхні рідини і потім відірвали від неї. Для якої з рідин — ртуті, води чи гасу — динамометр покаже в момент відривання найбільшу силу?

2. Краплі рідини відриваються від кінця трубки в момент, коли сила тяжіння, яка діє на краплю, стає рівною силі поверхневого натягу, яка діє на периметр, що обмежує поверхню краплі. Обчисліть поверх-

невий натяг спирту, якщо з трубки впало $n = 100$ крапель, загальна маса яких $m = 0,71$ г. Діаметр трубки ($i = 1$ мм).

3. Для визначення поверхневого натягу мильного розчину використали динамометр і дротяне кільце діаметром $s_i = 12$ см і масою $m = 20$ г. Під час відривання кільця від поверхні рідини динамометр показав силу $P = 0,227$ Н. Яке значення дістали для поверхневого натягу в результаті досліду?

4. Хворому приписали приймати певну кількість крапель ліків. Як треба змінити їх число, якщо краплі відлічують у жарко натопленому приміщенні?

§ 21. Явища змочування і незмочування

З явищами змочування і незмочування ви вже ознайомилися в 7-му класі і знаєте, що вони є результатом дії молекулярних сил. Пригадаємо деякі з розглянутих тоді прикладів і дослідів.

Вода, потрапивши на покритий жиром чи парафіном папір, утворює сферичні краплі, а на чистому склі розпливається тонким шаром. Ртуть на склі не розпливається подібно до води, а збирається в окремі краплі, на цинковій, мідній чи залізній поверхнях вона розпливається тонким шаром. Отже, різні рідини поведуть себе по-різному на одній і тій самій твердій поверхні; і в той же час, поведінка однієї і тієї самої рідини залежить від того, з яким твердим тілом вона стикається.

Про рідину, яка розпливається тонкою плівкою по твердому тілу, кажуть, що вона *змочує* дане тверде тіло. Про рідину, яка не розпливається, а, навпаки, стягується в краплю, кажуть, що вона *не змочує* це тіло.

Чим же пояснюються явища змочування і незмочування? Чому одна й та сама рідина змочує поверхні одних твердих тіл і не змочує поверхні інших? Для пояснення цих явищ слід враховувати не лише сили притягання молекул рідини одна до одної, які приводять до стягування її в краплю, а й сили притягання між молекулами рідини і молекулами твердого тіла (опори). Якщо ці сили більші за сили притягання між молекулами самої рідини, то рідина розпливається по поверхні твердого тіла. Якщо ж переважають сили притягання між молекулами самої рідини, то вона стягується в краплю.

У деяких випадках ми зацікавлені в тому, щоб поверхня твердого тіла, наприклад водонепроникної тканини, не змочувалась водою. Це досягається тим, що тканину просочують речовиною, молекули якої взаємодіють з молекулами води слабше, ніж молекули води одна з одною.

І навпаки, коли потрібно, щоб тканина добре змочувалась водою, треба її покрити речовиною (милом, пральним порошком), молекули якої взаємодіють з тканиною сильніше, ніж

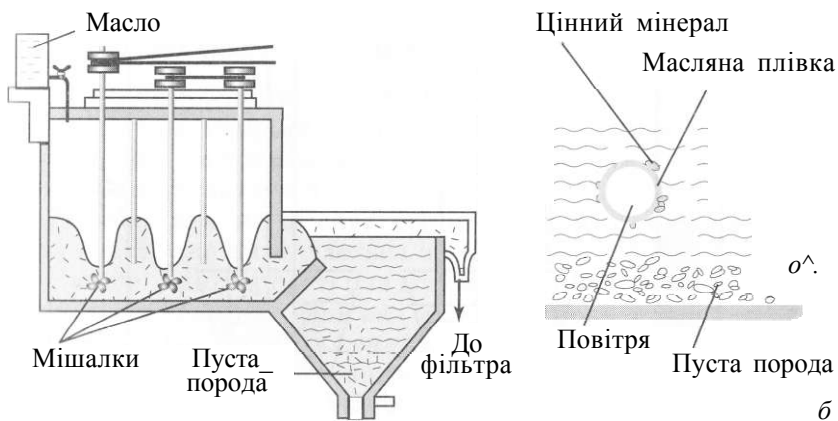
молекули води одна з одною. Ось чому без мила не можна відмити засмальцьовані поверхні, жирні руки тощо.

Явище змочування має велике практичне значення під час склеювання, паяння, фарбування тіл, змащення тертьових поверхонь тощо. Особливо широко застосовується воно у флотаційних процесах (збагачення руд цінною породою). В основу цих процесів покладені явища зміни сили поверхневого натягу рідини різними домішками і неоднакове змочування нею різних твердих тіл.

Практично флотацію здійснюють так: гірську породу, яка складається з крупинок руди цінного металу і з крупинок пустої породи, подрібнюють у порошок, де розміри частинок становлять 0,1—0,01 мм. Цей порошок змішують з водою, в яку додано трохи масла (мал. 39, а). При цьому утворюється піна; бульбашки повітря, оточені плівкою масла, легко прилипають до змочуваних маслом крупинок металеві руди, піднімаючи їх вгору, в той час як шматочки пустої породи, змочені водою, осідають на дно відстійника (мал. 39, б). В результаті руда металу відокремлюється від пустої породи.

Якщо треба вилучити кілька металів із суміші руд, то, користуючись флотацією, спочатку відокремлюють руди від гірської породи, а потім знову за допомогою флотаційних процесів — РУДУ одного металу від руди іншого, вводячи у ванну поверхнево-активні речовини. Вони змінюють силу поверхневого натягу рідини в ній так, що бульбашки повітря у більшій кількості прилипають до крупинок руди одного металу, ніж іншого: перші з них спливають, а другі — тонуть.

Під час механічної обробки металів, а також під час буріння свердловин у гірських породах їх змочують спеціальними рідинами, що полегшує і прискорює їх обробку.



Мал. 31

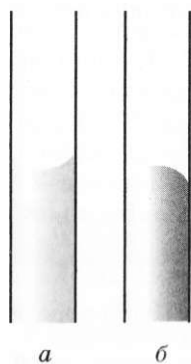
Явище змочування доводиться враховувати і під час конструювання космічних апаратів. Справа в тому, що у стані невагомості змочувальна рідина розпливається по стінках посудини, у якій вона знаходиться, а незмочувальна збирається великою краплею всередині посудини. Тому матеріал стінок і форму паливних баків доводиться вибирати так, щоб паливо утримувалось біля отворів, через які відбувається його перекачування до двигунів.

- ? 1. За яких умов рідина змочує тверде тіло? Не змочує тверде тіло?
 2. Чи можна змащувати тертьові поверхні машин рідкими мастильними матеріалами, які не змочують ці поверхні? Чому?
 3. Чому водоплавні птахи виходять сухими з води?

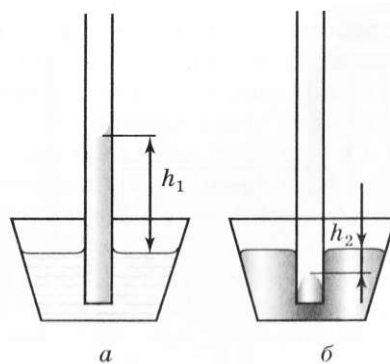
§ 22. Капілярні явища

Змочування чи незмочування рідиною стінок посудини впливає на форму вільної поверхні рідини в посудині. Якщо рідину налито в широкую посудину, то форма її поверхні визначається силою тяжіння, яка, природно, забезпечує плоску і горизонтальну поверхню. Однак біля самих стінок посудини поверхня рідини все ж викривляється: рідина, що змочує стінки, біля країв посудини піднімається (рідина прилипає до стінки), утворюючи так званий *увігнутий меніск* (мал. 40, а). Незмочувальна рідина опускається біля стінок посудини (рідина відходить від стінок), утворюючи *опуклий меніск* (мал. 40, б).

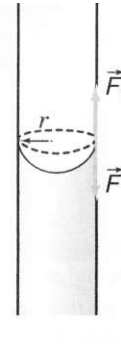
Утворення меніска рідиною у вузьких трубках приводить до несподіваних явищ. Опустимо в рідину, наприклад у воду, дуже вузьку скляну трубку, яку називають *капілярною* (від латинського слова «капілларіс» — волосяний). Здавалося б (див. підручник з фізики для 7-го класу), однорідна рідина і в



Мал. 40



Мал. 41



Мал. 42

широкій посудині, і в трубці має встановитися на одному рівні. Однак дослід показує, що коли трубка дуже вузька, то вода, яка змочує стінки трубки, піднімається в ній на певну висоту H над її рівнем у широкій посудині (мал. 41, а). Якщо аналогічний дослід провести з рідиною, яка не змочує стінок трубки, то виявиться, що рівень рідини в капілярі буде нижчим на H_2 , ніж у широкій посудині (мал. 41, б). Ці явища називаються *капілярними*.

Як же пояснити капілярні явища? Можна припустити, що вони пов'язані з тим, який меніск утворює рідина в капілярі — увігнутий чи опуклий. А це, як ми знаємо, залежить від того, змочує рідина тверде тіло (меніск увігнутий) чи не змочує (меніск опуклий).

Розглянемо випадок, коли рідина в капілярі утворює увігнутий меніск, наприклад у скляній трубці, опущеній у воду (мал. 42). Якщо рідина добре змочує тверде тіло, то меніск має форму, близьку до півсфери. В цьому випадку з боку рідини на лінію її зіткнення з твердим тілом, довжина якої $2r$, діє напрямлена вниз сила поверхневого натягу, модуль якої дорівнює

$$P = a \cdot 2r,$$

де r — радіус капіляра.

З боку твердого тіла на рідину діє така сама за модулем сила P_0 спрямована вгору. Вона й викликає підймання рідини в капілярі на таку висоту H , за якої сила тяжіння P_m , яка діє на стовп рідини, стане рівною за модулем силі P , а отже, і силі поверхневого натягу P :

$$P = P_m, \text{ або } a \cdot 2r = m \cdot g.$$

Маса піднятого стовпа рідини дорівнює

$$m = \rho V = \rho g r H,$$

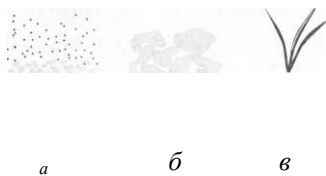
де ρ — густина рідини. Отже,

$$a \cdot 2r = \rho g r H \cdot g, \text{ звідки } H = \frac{2a}{\rho g} \quad (22.1)$$

Ми бачимо, що висота підймання рідини в капілярі тим більша, чим менший радіус капіляра r . Крім того, висота підймання залежить від властивостей самої рідини — її поверхневого натягу a і густини ρ .

Рідина, яка не змочує стінки капіляра, опускається на відстань H , яка визначається за тією самою формулою.

Явище капілярності надзвичайно поширене в природі, техніці та побуті і відіграє важливу роль у різноманітних процесах. Так, надходження поживних речовин з ґрунту в рослини (в стебла і листя) відбувається значною мірою завдяки капілярності. Тканини рослин пронизані величезною кількістю вузьких каналів, якими розчини солей від коренів поширюються по всій рослині.



Мал. 43

Підняття води з'глибоких шарів ґрунту також зумовлюється капілярністю, що необхідно враховувати в сільському господарстві. Капілярами ґрунту волога піднімається на поверхню і випаровується (мал. 43, а). Для збереження води капіляри, що утворилися в ґрунті, слід руйнувати; це досягається оранкою і боронуванням (мал. 43, б). Але іноді потрібно, навпаки, посилити надходження води до поверхні землі, до коренів рослин. У цьому випадку ґрунт коткують, збільшуючи кількість капілярних каналів (мал. 43, в).

У будівельній практиці доводиться враховувати можливість підняття води капілярними порами будівельних матеріалів. Наприклад, цегла і бетон мають широко розгалужену систему капілярів, якими вода може піднятися на значну висоту, спричиняючи відволоження стін будинку. Щоб захистити фундамент і стіни від впливу ґрунтових вод і вологості, вдаються до гідроізоляції: обмазують кладку гарячим бітумом, заливають її гідрофобним цементом, прокладають між фундаментом і стінами шар толю, смоли або іншої речовини, яка перешкоджає проникненню води.

Дуже часто доводиться стикатися з капілярними явищами в побуті. Застосування рушників, салфеток, гігроскопічної вати, марлі, промокального паперу тощо можливе завдяки наявності в них капілярів.

Дуже часто доводиться стикатися з капілярними явищами в побуті. Застосування рушників, салфеток, гігроскопічної вати, марлі, промокального паперу тощо можливе завдяки наявності в них капілярів.

? 1. Як пояснити змочування (незмочування) рідиною поверхні твердого тіла? Наведіть приклади явищ змочування і незмочування. 2. Чи можна відливати метал у форми, які змочуються розплавом даного металу? Чому? 3. Яку рідину можна налити у склянку вище її країв? 4. Чому змочувальна рідина піднімається в капілярі, а незмочувальна — опускається? 5. Від чого залежить висота підняття (опускання) рідини в капілярі? 6. Чи зміниться висота підняття рідини в капілярі, якщо його нахилити? 7. Весною землю орють і боронують. Поясніть, чому це сприяє збереженню води в ґрунті.

Вправа 7

Час вимірювання поверхневого натягу спирту піднявся у капілярній трубці, діаметр каналу якої 0,15 мм, на висоту 7,6 см. Чому дорівнює поверхневий натяг спирту за результатами дослідження? Густина спирту $\rho = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

2. У техніці для змащення підшипників ковзання, які працюють в умовах відносно невеликих швидкостей, застосовують гнотове змащення: один кінець гнота опускають у масло, а за допомогою другого масла надходить на змащувану поверхню (цапфу або шийку вала). Визначте, на яку висоту може піднятися масло гнотом, якщо

- його виготовлено з тканини, діаметр капілярів якої 0,2 мм. Густина масла $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$, поверхневий натяг $a = 26 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.
3. У посудину з гарячою водою опущено капілярну трубку. Чи змінюватиметься рівень води в трубці під час її охолодження?
 4. Атмосферний тиск вимірюють чашковим ртутним барометром, діаметр трубки якого дорівнює 5 мм. Яку поправку треба вносити у нідліки за цим барометром, щоб дістати правильні значення атмосферного тиску? Яка відносна похибка вимірювань, якщо барометр показує 97,5 кПа?
 5. Опустіть у воду край промокального паперу і виміряйте, на яку максимальну висоту піднімається вода. За цією висотою оцініть приблизно діаметр капілярних каналів волокон паперу.
 6. У скляній капілярній трубці вода на Землі піднімається на висоту $h_{\text{Земля}} = 1 \text{ см}$. На яку висоту підніметься вода в тій самій трубці на Місяці, де прискорення вільного падіння $g = 1,6 \text{ м/с}^2$?

§ 23. Кристалічні й аморфні тверді тіла. Внутрішня будова кристалів

У попередніх параграфах ви дізналися про те, як речовина з газоподібного стану може перейти в рідкий і з рідкого — в газоподібний. Газ за температури, нижчої за критичну, стає рідиною, якщо його стиснути. Якщо ж температура газу вища за критичну, його треба перед стисканням охолодити.

Але відомо, що під час подальшого охолодження речовина зазнає ще одного перетворення: рідина перетворюється в *тверде тіло*. Від рідини тверде тіло відрізняється передусім тим, що воно не лише має певну форму, а й зберігає її. Друга характерна ознака твердого тіла — його *міцність*. Ця властивість полягає в тому, що розірвати тіло на дві чи більше частин можна лише за певної деформації. Рідина, а тим більше газ, міцності не мають.

Далі ви дізнаєтеся про будову твердого тіла, ознайомитеся з його найважливішими властивостями.

Кристалічні й аморфні тіла. З курсів фізики і хімії 8—9-х класів ви вже знаєте, що різноманітні тверді тіла, з якими людині доводиться мати справу в практичній діяльності, можна поділити на дві групи, які істотно відрізняються за своїми властивостями. Одну групу утворюють тіла кристалічні, другу — аморфні. У фізиці твердими тілами називають лише кристалічні тіла. Аморфні тіла, хоча вони і можуть бути твердими, розглядають як дуже в'язкі рідини.

Як відомо, кристалічні тіла мають певну температуру плавлення, незмінну за сталого тиску; в'язкість аморфних речовин під час нагрівання зменшується, і вони переходять у рідкий стан, розм'якшуючись поступово.

Кристали характеризуються наявністю значних сил

міжмолекулярної взаємодії і зберігають сталим не лише свій об'єм, а й форму. Правильна геометрична форма є істотною зовнішньою ознакою будь-якого кристала в природних умовах. Всі ми бачили геометрично правильні візерунки, утворювані кристаликами льоду на поверхні віконних шибок і правильні форми сніжинок (мал. 44). Легко виявити пра-

вильну форму кристалів кухонної солі, гірського кристалю тощо. Розглядаючи окремі кристали, можна переконатися, що вони обмежені плоскими, ніби шліфованими гранями у вигляді правильних многогранників (мал. 45).

Кристали певної речовини можуть мати різну форму, оскільки вона залежить від умов їх утворення. Вони можуть відрізнятися і кольором. Відомо, наприклад, що кристали кварцу бувають безбарвними, рожевими, чорними, фіолетовими, темно-вишневими. Однак для кристалів кожної речовини характерною є сталість кутів між їх ребрами і відповідно між їх гранями. Так, кристали кухонної солі трапляються у вигляді кубів, паралелепіпедів чи призм, але завжди у кожній вершині кристала сходяться три ребра, які утворюють між собою прямі кути. Так само у вершині кристала кальциту (ісландського шпату) сходяться три ребра, які утворюють один гострий кут $78^{\circ}08'$ і два тупих кути по $101^{\circ}52'$. Вимірявши кути між усіма гранями невідомого кристала, можна за спеціальним каталогом визначити, кристал якої речовини досліджується.

Монокристали і полікристали. Іноді весь шматок твердої речовини, наприклад цукру, солі, гірського кристалю тощо, може становити собою один кристал так званий моно кристал. В інших випадках тіла складаються з безлічі кристалів, які зрослися між собою. Прикладом можуть бути «морозні візерунки» на вікнах, візерунки цинку на оцинкованому залізі, цукор-рафінад тощо.

Мал. 45

Кристалічну будову мають усі метали у твердому стані. Кристали деяких з них можна побачити навіть неозброєним оком, наприклад, уважно придивившись до зламу чавуну чи загартованої сталі. Кристали більшості металів можна побачити лише в лупу або мікроскоп. Тіло, яке складається з безлічі невпорядковано розміщених дрібних кристалів, називають полікристалічним, або полікристалом. Таким чином, усі метали є полікристалічними речовинами.

Основна макроскопічна особливість монокристалів — *анізотропія їх властивостей*, тобто неоднаковість фізичних (механічних, теплових, електричних, магнітних, оптичних) властивостей у різних напрямках кристалів.

Анізотропія механічних властивостей монокристалів виявляється насамперед у тому, що їх міцність у різних напрямках різна. Монокристали легше руйнуються в одних напрямках, ніж в інших, і саме тому їх злами плоскі. Наприклад, шматочок слюди, який є кристалом, легше розщепити на тоненькі пластинки, ніж розірвати ці пластинки на частини. Якщо, наприклад, виготовити з монокристала кулю, а потім ударити по ній молотком, то вона розколеться у певних напрямках на шматки, грані яких утворять кути, характерні для даної речовини. Це означає, що міцність монокристала у цих напрямках найменша.

В анізотропії теплових властивостей монокристалів можна переконатися на такому досліді. Покриємо слюдяну (кристалічне тіло) і скляну (аморфне тіло) пластинки тонким шаром парафіну і потім доторкнемося до них однаково нагрітими цвяхами. Побачимо, що поверхня розплавленого парафіну має на слюді форму еліпса (мал. 46, а), а на склі — круга (мал. 46, б). Це й свідчить про те, що на відміну від скла слюда має різну теплопровідність у різних напрямках.

Так само електричний опір, швидкість поширення світла та інші фізичні величини мають неоднакові значення для різних напрямків у монокристалі.

Анізотропія, як і інші особливості монокристалів, — наслідок впорядкованого розміщення частинок у кристалі.

Полікристалічні тіла є *ізотропними*, тобто їх фізичні властивості, як і аморфних тіл, у всіх напрямках однакові. Це пояснюється тим, що полікристали складаються з величезної кількості невпорядковано орієнтованих дрібних кристаликів, які зрослися між собою. В межах кожного такого окремо взятого кристалика спостерігається анізотропія властивостей, але внаслідок їх хаотичної орієнтації полікристал у цілому не

А

а *б*

Мал. 46

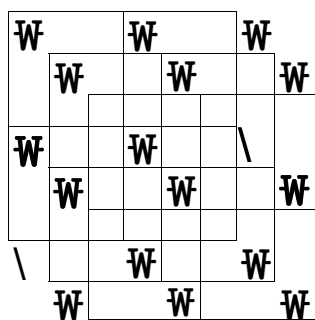
виявляє анізотропії, тобто він ізотропний. Чим менші кристалики, які утворюють полікристалічне тіло, тим воно однорідніше і водночас ізотропніше. Висока ізотропність матеріалу забезпечується його дрібнокристалічною будовою.

Широке застосування в сучасній фізиці і техніці дістали монокристали. Майже всі напівпровідникові прилади — це монокристали із спеціально введеними домішками, які надають їм тих чи інших властивостей. За останні роки виникла нова галузь електроніки — молекулярна електроніка, яка ґрунтується на створенні в монокристалі під час його вирощування ділянок з різними властивостями. Видатним досягненням молекулярної електроніки було створення молекулярних підсилювачів і генераторів мікрохвильового випромінювання — мазерів і потужних генераторів випромінювання оптичного діапазону — лазерів. Основними деталями багатьох типів цих приладів, які дістали назву квантових підсилювачів і генераторів, є монокристали.

Дослідження процесів утворення кристалів і створення нових із наперед заданими властивостями — одне з найважливіших завдань сучасної фізики. Тепер опрацьовано спеціальні методи вирощування великих кристалів, які дають змогу дістати зразки, лінійні розміри яких дорівнюють десяткам сантиметрів.

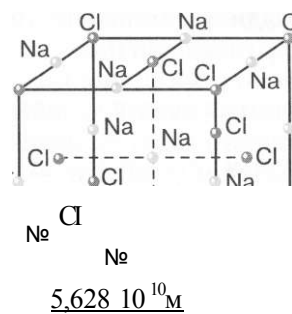
Внутрішня будова кристалів. Залежність фізичних властивостей кристалів від напрямку і правильність їх геометричних форм давали підстави для припущення про впорядкованість частинок, які утворюють кристал. Така гіпотеза висловлювалася багатьма вченими, але лише на початку минулого століття вона була підтверджена експериментально за допомогою рентгенівських променів.

Нині будову кристалів вважають такою. Частинки, з яких складається кристал, під час теплового руху коливаються навколо положень рівноваги, які називають *вузлами*. Якщо їх подумки з'єднати прямими лініями, матимемо свого роду «скелет» кристала. Таке зображення кристала називають *кристалічною просторовою решіткою* (мал. 47). В ній можна виділити комірку, яка є паралелепіпедом з характерним для цих кристалів розміщенням частинок. Цю комірку називають елементарною кристалічною решіткою. Якщо переносити її на відстань, що дорівнює довжині її ребра, можна утворити як завгодно великий монокристал. Прикладом найпростішої елементарної решітки є решітка кухонної солі NaCl (мал. 48). Вона являє собою куб, ребро якого дорівнює $5,628 \cdot 10^{-10}$ м; у вузлах розміщені йони Натрію і Хлору.

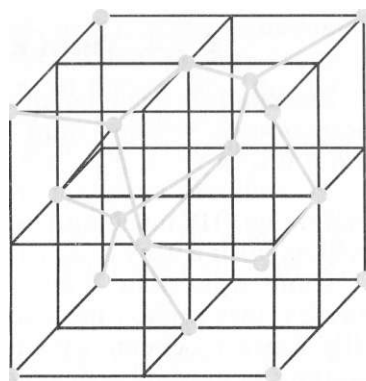


Мал. 47

Інші кристали мають складнішу будову. На малюнку 49 зображено кристалічні решітки графіту (а) і алмазу (б); в їх вузлах містяться атоми Карбону. Вузол — це положення рівноваги частинки, яка входить до складу кристала, тобто точка. Відстань між вузлами умовно позначає відстань між центрами атомів і молекул. Кристалічні решітки, зображені на малюнках 48 і 49, аж ніяк не відображають ні взаємних відстаней частинок, ні їх відносних розмірів, але дають змогу легко уявити собі взаємне розміщення центрів частинок



Мал. 48

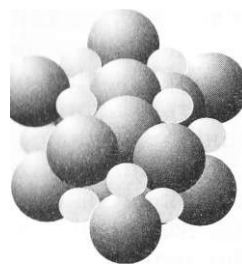


Мал. 49

у просторі. Насправді атоми і молекули розміщені («упаковані») у кристалах щільно: вони дотикаються або навіть перекривають одна одну. На малюнку 50 зображено модель щільної «упаковки» йонів у кристалі кухонної солі.

Таким чином, тверднення означає кристалізацію речовини. Отже, найголовнішою ознакою твердого тіла є його кристалічна структура.

Той факт, що в твердому тілі кожна частинка розміщена в певному місці — у вузлі кристалічної решітки,— не означає, що частинки в твердому тілі нерухомі. Як у газі й рідині, частинки і в твердому тілі здійснюють хаотичні рухи, а середня кінетична енергія частинок визначає температуру тіла.



Мал. 50

Однак теплові рухи частинок твердого тіла не такі вільні, як у газах або навіть в рідинах. У твердому тілі частинки здійснюють малі, порівняно з відстанями між ними, коливання навколо вузлів решітки. Коли б ми могли бачити молекули твердого тіла, то помітили б, що вони «дрижать». Вузол кристалічної решітки — це не місце, в якому частинка закріплена, а точка, навколо якої частинка коливається. Під час підвищення температури зростає розмах (амплітуда) коливань.

? 1. Яка істотна зовнішня ознака кристала? 2. У чому полягає анізотропія властивостей кристала? 3. Чому в одних напрямках кристал розколюється легше, ніж в інших? 4. Як переконатися в анізотропії теплових властивостей монокристала? 5. Чому полікристалічні тіла ізотропні? 6. Що означає вираз: «Тверде тіло має кристалічну структуру»? 7. Чи здійснюють частинки твердого тіла хаотичні рухи? Який характер цих рухів?

§ 24. Типи кристалів

Залежно від фізичної природи сил, які діють між частинками, розрізняють чотири типи кристалів (і кристалічних решіток): йонні, атомні, металічні і молекулярні.

Розглянемо дуже коротко характерні властивості цих типів кристалів. (Відповідний матеріал досить детально вивчали на уроках хімії в 9-му класі. Тут він значною мірою повторюється.)

Йонні кристали. У вузлах решітки йонних кристалів знаходяться позитивно і негативно заряджені йони. Сили взаємодії між ними в основному електростатичні. Механізм утворення йонних кристалів розглянемо на прикладі кухонної солі NaCl . Атом Натрію легко втрачає один електрон, який приєднується до атома Хлору. Таким чином утворюються два йони із зарядами протилежних знаків. Ці йони, як видно з малюнка 48, розміщуються у вузлах кристалічної решітки так, що відстань між протилежно зарядженими йонами менша, ніж між одноіменно зарядженими. Оскільки різнойменно заряджені тіла притягуються, а однойменно заряджені відштовхуються, електричні сили притягання між йонами переважають сили відштовхування і утримують їх у вузлах решітки.

В йонному кристалі не можна виділити окремих молекул, весь кристал є ніби однією гігантською молекулою. Такі кристали мають значну міцність. До них належить більшість неорганічних сполук, зокрема солі.

Атомні кристали. Їх кристалічні решітки утворюються внаслідок щільної упаковки атомів, найчастіше однакових (під час взаємодії однакових атомів йони не утворюються). Атоми, що перебувають у вузлах, зв'язані зі своїми найближчими сусідами ковалентним зв'язком. Нагадаємо, що в результаті

такого зв'язку сили взаємодії між частинками виникають внаслідок взаємного обміну валентними електронами між кожними двома сусідніми атомами.

За умови ковалентного зв'язку електрони не переходять від одного атома до іншого (йони не утворюються), а виникає одна чи кілька спільних електронних пар, тобто електрони, кожен з яких раніше належав одному атому, стають тепер спільними для обох атомів.

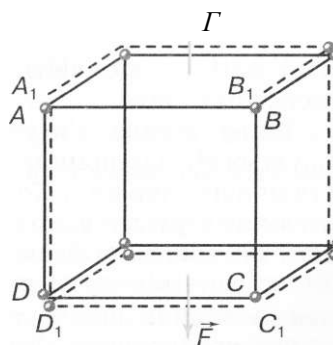
Речовини з атомною кристалічною структурою найміцніші, вони характеризуються високою твердістю і тугоплавкістю (алмаз, графіт, германій, сульфід цинку ZnS , оксид берилію BeO та ін.).

Молекулярні кристали. У вузлах їх кристалічної решітки перебувають молекули речовини, зв'язок між якими забезпечується силами молекулярної взаємодії. Внаслідок того, що ці сили слабкі (значно слабші сил йонного і ковалентного зв'язків), молекулярні кристали плавляться за дуже низької температури (тверді гелій, водень, кисень, азот), легко випаровуються («сухий лід», нафталін). Прикладами молекулярних кристалів можуть бути також кристали бромів Br_2 , йоду I_2 , льоду H_2O , більшість кристалів органічних речовин.

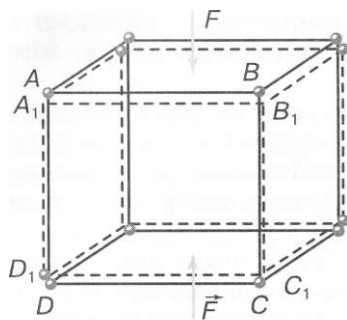
Металічні кристали. У всіх вузлах решітки металічних кристалів розміщені позитивні йони металу. Між ними хаотично, подібно до молекул газу, рухаються електрони, які відокремилися від атомів під час кристалізації металу. Ці електрони, взаємодіючи з позитивними йонами решітки, є ніби «цементом», утримуючи йони; інакше решітка розсипалася б під дією електричних сил відштовхування між йонами. Разом з тим ці електрони утримуються йонами в її межах. Наявність вільних електронів у металі забезпечує добру електропровідність і теплопровідність цих речовин.

§ 25» Деформація твердих тіл

Кожна частинка в кристалі (молекула, атом чи йон) перебуває в певному положенні рівноваги, в якому сили відштовхування і притягання з боку інших частинок, які утворюють кристал, однакові. Але якщо якась зовнішня сила змістить частинку трохи вбік від її положення рівноваги, відразу ж якась із цих сил перевищить решту. Якщо, наприклад, тіло розтягувати (мал. 51), то відстані між частинками кристала збільшуються, при цьому сили при-



Мал. 51



Мал. 52

тягання починають переважати сили відштовхування і прагнуть повернути частинки в попереднє положення рівноваги. Навпаки, якщо тіло стискати (мал. 52) і тим самим зближати атоми чи молекули кристала, переважатимуть сили відштовхування, які прагнуть повернути частинки в початкове положення рівноваги.

Спостерігати і безпосередньо вимірювати сили, які діють на окремі молекули, атоми чи йони, не

можна. Але якщо зовнішні сили зміщують частину тіла, змінюючи його форму і розміри (тобто спричиняють деформацію тіла), то і протидіючі їм внутрішні сили — сили пружності — діятимуть на ту саму частину тіла, прагнучи ліквідувати зміну його форми чи розмірів, що виникла в результаті дії зовнішніх сил. Таким чином, спостережувані на практиці сили пружності є рівнодіючими (геометричними сумами) дуже великої кількості сил взаємодії між окремими частинками тіла.

Конструюючи машини, верстати, ті чи інші споруди, обробляючи різні матеріали, важливо знати, як деформуватиметься кожна деталь під дією сил, за яких умов її деформація не впливатиме на роботу машини в цілому, при яких навантаженнях почнеться руйнування деталі і т. ін. Вивченням цих важливих для техніки питань займається багато технічних наук, зокрема матеріалознавство. Розглянемо лише деякі основи вчення про деформацію тіл.

З курсу фізики 9-го класу ви знаєте, що при малих деформаціях твердого тіла виникає сила пружності $F_{\text{п}}$, модуль якої визначається законом Гука:

$$F_{\text{п}} = k \cdot \Delta l \quad (25.1)$$

де Δl — абсолютне значення деформації тіла, а k — жорсткість тіла.

Тепер можна з'ясувати детальніше, чому виникає сила пружності. Для прикладу розглянемо деформацію розтягу кристалічного стержня. Кожна частинка в стержні, який має кристалічну структуру, до його деформації розміщена так, що сума сил, які діють на неї з боку інших частинок, дорівнює нулю. Якщо один кінець стержня закріплений, а до другого прикладена зовнішня сила F то вона надає частинкам тіла біля цього кінця прискорення. Частинки починають рухатися і зміщуються відносно їх «нормального» положення. При цьому на

кожну з них почнуть діяти сили з боку сусідів, які намагаються повернути частинки в попереднє положення. В свою чергу частинки, що змістилися, діють на ще не зміщені частинки, надаючи їм прискорення, внаслідок чого зміщуються і вони. Стержень виявляється деформованим, і в ньому виникають сили пружності P_n . Коли б тіло не було закріплене, воно почало б рухатися (хоча й деформоване) з прискоренням, яке залежить від маси тіла. Якщо тіло закріплене, воно деформується доти, доки сила пружності P_n не стане рівною за модулем зовнішній силі P . Після цього тіло перебуватиме в *рівновазі*. Отже, сила пружності P_n , викликана деформацією, дорівнює за модулем і протилежна за напрямом зовнішній силі. Ми розглядатимемо лише випадок рівноваги. Після припинення дії зовнішньої сили P частинки в стержні повернуться на свої початкові місця, зникне і викликана нею сила пружності. Деформація, яка зникає разом з припиненням дії сили, називається *пружною*.

Деформація, яка не зникає після припинення дії зовнішньої сили, називається *пластичною*.

Дослід показує, що при малих (пружних) деформаціях розтягу і стиску жорсткість k стержня пропорційна площі його поперечного перерізу A і обернено пропорційна його довжині l , так що можна записати:

$$k = E \quad (25.2)$$

де E — коефіцієнт пропорційності. Підставивши цей вираз у формулу (25.1) і поділивши обидві частини рівності на l , дістанемо:

$$\sigma = \epsilon \cdot E \quad (25.3)$$

У лівій частині цієї рівності замість модуля сили пружності P_n тепер стоїть відношення $\frac{F}{A}$. Ця величина називається

механічною напругою (або просто *напругою*). Її прийнято позначати грецькою літерою σ (сигма). Напруга вимірюється в тих самих одиницях, що й тиск, тобто в *паскалях* (Па).

У правій частині рівності замість видовження $\frac{\Delta l}{l}$ ми бачимо тепер відношення $\frac{\Delta l}{l_0}$ яке називають *відносним видовженням*: позначається літерою ϵ (епсilon). Воно показує, яку частину початкової довжини становить видовження. Це зручніша характеристика деформації, ніж видовження. Адже під час розтягу стержня (або його стиску) змінюється довжина кожної ділянки стержня, так що у довшого стержня і видовження буде більшим (за тієї самої сили пружності), а відносне видовження буде

одним і тим самим. Відносне видовження часто виражають у відсотках.

Нарешті, замість жорсткості k у формулі (25.3) стоїть величина E , зв'язана з k співвідношенням $E = k \cdot \frac{l}{S}$. Величина E

називається *модулем пружності* (іноді її називають також *модулем Юнга*).

Таким чином, формулу, яка виражає закон Гука, можна тепер записати у такому вигляді:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{S \cdot E} \quad (25.4)$$

На відміну від жорсткості k , яка характеризує даний стержень, модуль пружності характеризує механічні властивості матеріалу незалежно від конструкції виготовлених з нього деталей. Оскільки відносне видовження — величина безрозмірна, то модуль пружності виражається в тих самих одиницях, що й механічна напруга, тобто в паскалях. У сталі, наприклад, модуль пружності дорівнює $2,2 \cdot 10^{11}$ Па, у свинцю $1,7 \cdot 10^{10}$ Па, а у графітових ниток 10^{12} Па. Чим більший модуль пружності матеріалу, тим більшою буде напруга σ в стержні, виготовленому з даного матеріалу, за даного відносного видовження стержня.

Задача, Залізний стержень завдовжки 1,5 м під навантаженням 5000 Н не повинен розтягуватися більше, ніж на 0,3 мм. Якого перерізу треба взяти стержень? Модуль Юнга для заліза $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м².

Розв'язання. За законом Гука $F = \frac{E \cdot S}{l} \Delta l$, звідси $S = \frac{F \cdot l}{E \cdot \Delta l}$
 $S = 1,25 \cdot 10^{-4}$ м² = 1,25 см².

Деформація стиску за своїм характером не відрізняється від деформації розтягу і може розглядатися як від'ємний розтяг. У цьому випадку в формулі закону Гука перед видовженням тіла ставиться знак «мінус».

Деформації розтягу зазнають різні троси, які використовуються під час підняття вантажів, буксирування машин і барж, балки будівельних ферм тощо; деформації стиску — колони і фундаменти будівель, стіни будинків, стояки мостів тощо.

? 1. Як записується закон Гука для деформації розтягу? 2. Які деталі зазнають деформації розтягу? 3. Яка різниця між жорсткістю тіла і модулем пружності речовини?

Вправа 8 1• Чому дорівнює абсолютне видовження сталюго троса довжиною $l = 10$ м і площею поперечного перерізу $S = 3$ см² у разі підвішування на нього вантажу масою $m = 6$ т? Модуль пружності сталі дорівнює $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.
 2. Щоб підвищити стійкість залізобетонних конструкцій проти утворення тріщин, їх виготовляють з напруженої арматури: сталюну

дротину каркаса спочатку розтягують, а потім заливають бетоном. Пояснити, чому такі конструкції з напруженою арматурою мають підвищену механічну міцність.

3. Виготовляючи на заводі залізобетонні конструкції, стальну арматуру піддають попередньому напруженню (розтягу) за допомогою гідравлічної установки. Стальні стержні завдовжки 6 м діаметром 20 мм розтягують на 2 мм. Визначте силу, необхідну для цього, якщо модуль Юнга для сталі $E = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

§ 26. Види деформацій

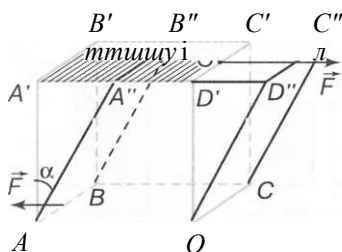
Тіл, які б не деформувалися, в природі не існує. В той самий час часто доводиться мати справу з такими малими деформаціями, що їх важко виявити. Наприклад, якщо наступити на цеглину, то її висота зменшиться приблизно на 0,00005 см. За такої деформації сусідні атоми наближаються один до одного приблизно на $2 \cdot 10^{-14}$ см.

Серед деформацій, які виникають у твердих тілах, можна виділити п'ять основних видів: розтяг, стиск, зсув, кручення і згин. Однак будь-які деформації твердих тіл можна звести до двох видів: розтягу (стиску) і зсуву. Деформацію розтягу ми вже розглянули. Вона виникає, якщо до однорідного стержня, закріпленого на одному кінці, прикласти силу P уздовж його осі в напрямі від стержня (розтяг) або вздовж осі до стержня (стиск).

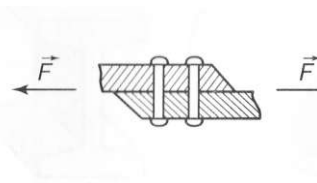
Деформація зсуву. Уявімо собі брусок у вигляді паралелепіпеда, закріпленого на плоскій поверхні (мал. 53). Якщо до його верхньої і нижньої граней прикласти рівні за модулем і протилежно напрямлені сили, паралельні до цих граней, можна спостерігати зсув верхніх шарів бруска відносно нижніх на невеликий кут α . Зсув паралельних шарів тіла один відносно одного під дією сил, паралельних до цих шарів, називається *деформацією зсуву*.

Якщо силу P збільшити вдвічі, то й кут α збільшиться вдвічі. Досліди показують: якщо деформації пружні, кут зсуву α прямо пропорційний модулю P прикладеної сили.

Деформації зсуву зазнають усі балки в місцях опор, заклепки (мал. 54), болти, що скріплюють деталі, тощо. Зсув



Мал. 53



Мал. 31

a

б

Мал. 55

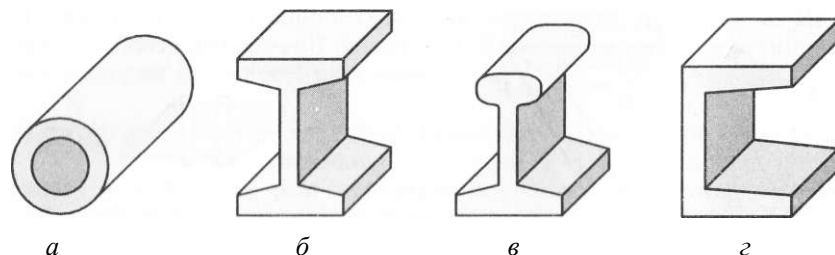
на великі кути призводить до руйнування тіла — *зрізу*. Зріз дістаємо за допомогою ножиць, долота, зубила, пилки.

Деформація згину. Якщо закріпити один кінець горизонтально розміщеного стержня, а на вільний кінець подіяти силою i^7 , напрямленою вертикально вниз (мал. 55, а), то стержень зігнеться. Покладемо стержень на дві опори, а до його середини прикладемо силу Γ , напрямлену перпендикулярно до нього (мал. 55, б). При цьому стержень прогнеться. Під час згину одна сторона — опукла — зазнає розтягу, а друга — увігнута — стиску. Всередині зігнутого тіла є шар, який не зазнає ні розтягу, ні стиску і називається *нейтральним шаром*.

Отже, згин — деформація, що зводиться до розтягування і стискання, неоднакових в різних частинах тіла. Поблизу нейтрального шару тіло майже не зазнає деформації. В цьому шарі малі й сили, що виникають під час деформації. Тому площу поперечного перерізу зігнутої деталі можна значно зменшити навколо нейтрального шару. У сучасній техніці і в будівництві замість стержнів і суцільних брусків здебільшого використовують труби (мал. 56, а), двотаврові балки (мал. 56, б), рейки (мал. 56, в), швелери (мал. 56, г), що полегшує конструкцію й економить матеріал.

Сама природа в процесі еволюції наділила людину і тварин трубчастими кістками кінцівок і зробила стебла злаків трубчастими, поєднавши економію матеріалу з міцністю і легкістю «конструкції».

Деформація кручення. Якщо до торців стержня прикласти дві пари сил, які повертають ці торці в протилежні боки

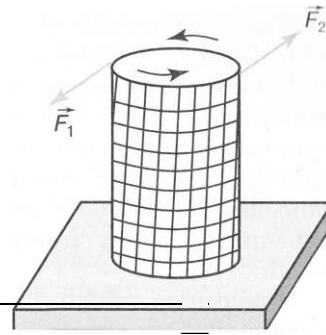


Мал. 56

(мал. 57), то виникає деформація, яка називається *крученням*. Під час кручення окремі шари тіла, як і під час зсуву, залишаються паралельними, але повертаються один відносно одного на деякий кут. Деформація кручення — це неоднорідний зсув.

Деформація кручення виникає, наприклад, під час закручування гайок (мал. 58). Деформації кручення зазнають також вали машин, свердла тощо.

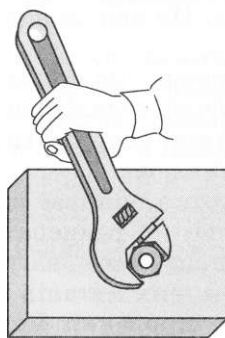
Деталі машин і конструкцій часто зазнають складних деформацій, однак їх можна розглядати як різні поєднання деформацій розтягу, стиску, зсуву. Це значно полегшує розрахунок механічних властивостей конструкцій і деталей машин.



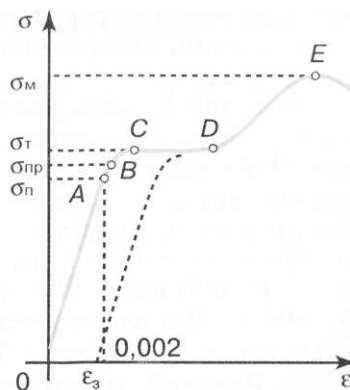
Мал. 57

§ 27- Механічні властивості твердих тіл. Діаграма розтягу

Залежність відносного видовження зразка від прикладеної до нього напруги є однією з найважливіших характеристик механічних властивостей твердих тіл. Графічне зображення цієї залежності називається *діаграмою розтягу*. По осі ординат відкладається механічна напруга σ , прикладена до зразка, а по осі абсцис — відносне видовження ϵ (мал. 59). При невеликих напругах відносне видовження прямо пропорційне напруженню, після зняття навантаження розміри тіла повністю відновлюються. Така деформація, як уже зазначалося, називається пружною. Максимальна напруга σ_p , за якої деформація ще залишається пружною, називається *межею пропорційності* (точка А).



Мал. 58



Мал. 59

Якщо навантаження ще збільшити, то деформація стає нелінійною, напруга перестає бути прямо пропорційною відносному видовженню. І все-таки за невеликих нелінійних деформацій після зняття навантаження форма і розміри тіла практично відновлюються (ділянка АВ діаграми). Максимальну напругу, за якої ще не виникають помітні залишкові деформації, називають *межею пружності* $a_{\text{пр}}$. Межа пружності перевищує межу пропорційності лише на соті частки відсотка.

У разі навантажень, які перевищують межу пружності $a_{\text{пр}}$, зразок після зняття навантаження не відновлює свою форму, або початкові розміри. Такі деформації називаються *залишковими*, або *пластичними*.

В області пластичної деформації (ділянка ВС) деформація відбувається не пропорційно збільшенню напруги. На горизонтальній ділянці СД матеріал «тече» — деформація зростає за незмінної напруги. Напруга a_t (ордината точки С), за якої матеріал «тече», називають *межею текучості*.

Якщо в області пластичних деформацій зняти з тіла напругу, то його розміри не дорівнюватимуть початковим. На діаграмі (мал. 59) розвантаження зображається пунктирною кривою. У тіла зберігається залишкова деформація v_3 .

Матеріали, в яких область текучості СД значна, можуть без руйнування витримувати великі деформації. Такі матеріали називають *пластичними*. Пластичні — пластилін, мідь, свинець, золото. Якщо ж область текучості матеріалу майже відсутня, він без руйнування може витримати лише невеликі деформації. Такі матеріали називають *крихкими*. Прикладами крихких матеріалів можуть бути скло, цегла, мармур, фарфор, чавун, загартована сталь.

Матеріал у процесі деформації іноді зміцнюється. В цьому можна переконатися, згинаючи товсту мідну дротину або пластину. Для того щоб розігнути зразок, треба прикласти значно більше зусилля, ніж для його згинання. Це явище називається *наклепуванням*.

Після точки *E* крива йде вниз, це означає, що подальша деформація аж до розривання відбувається за дедалі меншої напруги. Найбільша напруга a_m , яку здатний витримати зразок без руйнування, називається *межею міцності*.

На пружність і пластичність тіл істотно впливає температура. Мало пластичне і пружне за кімнатної температури залізо стає м'яким і пластичним, якщо його нагріти до 800—900 С. Цю властивість заліза та інших металів широко використовують під час обробки і виготовлення металевих виробів. Навпаки, матеріали, м'які і пластичні за кімнатної температури, стають пружними від досить сильного охоло-

дження. Так, виготовлена із свинцю пружина за температури рідкого повітря (-183 °C) набуває великої пружності, а свинцевий дзвіночок, який за кімнатної температури не дзвонить через високу пластичність, за температури рідкого повітря дзеленчить не гірше за срібний.

Однією з найважливіших механічних характеристик матеріалів є їх міцність, тому що в основному саме завдяки їй стають надійними різні споруди і машини. Під міцністю розуміють здатність матеріалу опиратися руйнуванню і залишити деформації, які виникають внаслідок зовнішніх впливів.

Ви вже знаєте, що будь-який матеріал характеризується межею міцності, тобто напругою, коли він, зазнавши деформації, руйнується. Цілком зрозуміло, що під час конструювання машин і споруд не можна розраховувати на їх роботу в таких умовах, коли напруги, яких вони зазнають, близькі до межі міцності матеріалу, з якого вони мають бути виготовлені, оскільки це завжди створюватиме небезпеку поломок і руйнувань. Для того щоб машини і різні споруди були надійними, під час їх проектування конструктори враховують необхідний запас міцності. Очевидно, що всі ці об'єкти мають працювати в області пружних деформацій.

Коефіцієнтом безпеки (або запасом міцності) називається відношення межі пропорційності a_n даного матеріалу до максимальної напруги a_m , якої зазнаватиме деталь конструкції в роботі:

$$n = \frac{a_n}{a_m}$$

Залежно від необхідної надійності різних деталей і конструкцій коефіцієнт безпеки обирають звичайно в межах від 2 до 10. Під час постійних навантажень коефіцієнт безпеки може бути менший, ніж при змінних. Особливо великим має бути коефіцієнт безпеки у деталей, які зазнають різного роду ударів: у гвинтів літаків і теплоходів, циліндрів і поршнів двигунів внутрішнього згоряння, стволів артилерійських гармат тощо.

Задача 1. Обчисліть діаметр сталюого стержня у гака підйомного крана, розрахованого на навантаження 8-Ю⁴ Н, якщо необхідно забезпечити коефіцієнт безпеки $n = 6$. Руйнуюча напруга (межа міцності) $a_m = 10^8$ Н/м².

Розв'язання. Діаметр стержня має бути таким, щоб у разі підняття вантажу 8-Ю⁴ Н напруга в тросі не перевищувала $\frac{F}{S}$ де $n = 6$ — коефіцієнт безпеки. Отже,

$$F \leq \frac{a_m S}{n}$$

$$\text{звідси } d = \sqrt{\frac{4nF}{\pi a_m}}, d \approx 3,2 \text{ см.}$$

Задача 2. Якої найбільшої висоти можна скласти цегляну стіну за умови, що напруга в її основі не повинна перевищувати $8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$? Густина цегли $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$.

Розв'язання. Позначимо максимальну висоту стіни H , а площу її основи S . Стіна тисне на основу з силою

$$P = m\vec{g} = P\vec{g} =$$

і створює в ній напругу $a = \dots$. Ця напруга не повинна перевищувати допустиму a_d , тобто $a_d = \dots$

$$H = \frac{8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2}{2400 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2} \approx 34 \text{ м.}$$

Підвищення міцності матеріалів — одне з найважливіших завдань науки і практики. Для підвищення міцності, наприклад металів, їх піддають термічній обробці і обробці тиском або вводять у них зміцнювальні домішки (легування). Нині ведеться пошук шляхів одержання бездефектних металів, які мають винятково високу міцність.

? 1. Які тіла називають пружними? пластичними? 2. Які з поданих нижче деформацій мають бути пружними, а які залишковими: а) прогинання рейок під вагою потяга; б) розтяг сталюго троса під час піднімання ліфта; в) стискання заготовки у разі кування пневматичним молотом; г) згинання труби на спеціальному верстаті для згинання труб? 3. Скло за твердістю не поступається інструментальній сталі. Чому ж із скла не виготовляють різальних інструментів? 4. Що розуміють під міцністю матеріалу? 5. Наведіть приклади деталей, які мають різний коефіцієнт безпеки. Чому коефіцієнт безпеки у них різний?

Вправа 9 ** баштовий кран С-464 має вантажопідйомність 50 000 Н. Визначте, з яким коефіцієнтом безпеки він працює, якщо його гак підвищено на чотирьох сталюних тросах, кожен з яких складається з 300 дротин діаметром 0,4 мм. Межа міцності сталі, з якої виготовлено трос, дорівнює $9,8 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.
2. Будівельна сталь марки Ст 3 (мостова) має межу міцності $4,5 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$. Деталі з цієї сталі мають працювати із коефіцієнтом безпеки $n = 3$. Яку найбільшу напругу розтягу можна допустити за цієї умови?
3. Який діаметр канатів мостового крана вантажопідйомністю 50 000 Н, якщо коефіцієнт безпеки каната дорівнює 3, а межа міцності $4 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$? Задачу розв'яжіть для випадків, коли кран має два канати і коли — чотири.

§ 28. Аморфні речовини та їх властивості

Вище вже йшлося про те, що поряд з кристалами існують тіла, які в побуті вважають звичайно твердими, хоча вони й не мають кристалічної будови. Це тіла, які складаються з так

званих аморфних речовин. До них належать природні сполуки (смоли, янтар, опал) і штучні (скло, плавлений кварц тощо). Іноді їх називають склоподібними або просто склом, оскільки типовим представником аморфних твердих речовин є скло.

На відміну від кристалічних аморфні тіла повністю ізотропні, тобто їх властивості однакові в усіх напрямках. У цьому ми переконалися раніше, спостерігаючи плавлення парафіну, нанесеного на скло. Ми знаємо, що кристали мають цілком певну температуру плавлення і графік процесу плавлення їх має горизонтальну ділянку, яка показує сталість температури плавлення під час переходу речовини з твердого стану в рідкий.

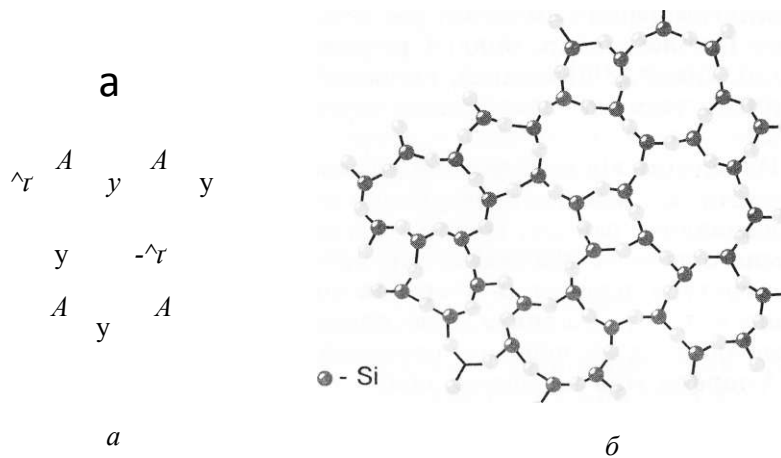
Аморфні тіла не мають певної температури плавлення.

Якщо, наприклад, нагрівати скло, воно стає м'яким і тягучим: його можна гнути, видувати з нього різноманітні вироби. Якщо скло продовжувати нагрівати, то його в'язкість зменшується і воно перетворюється в рідину. Таким чином, замість температури плавлення доводиться говорити про температурний інтервал розм'якшення, що є характерною особливістю аморфних речовин.

Друга їх характерна особливість — **пластичність**, тобто відсутність межі пружності. В цьому відношенні аморфні тіла більше нагадують рідини, ніж тверді тіла, відмінність їх від рідин полягає лише в ступені в'язкості. Якщо ми перекинемо кухоль з водою, то вода вилетіть за частку секунди. Якщо перекинути кухоль, заповнений смолою, то смола витече з нього тільки через кілька днів чи навіть тижнів.

І все ж саме смолі, як і іншим аморфним речовинам, притаманно багато властивостей твердого тіла. Візьмемо паличку із сургучу і покладемо її кінці на дві опори. Мине певний час, і вона під дією сили тяжіння провисне. Але ту саму паличку можна легко зламати руками, як крихке тверде тіло. Злам її буде гладеньким і блискучим. Якщо за кімнатної температури ударити молотком по шматку смоли, він розіб'ється на великі осколки блискучого чорного кольору з гострими кутами. Складені в якусь посудину, ці шматки через кілька тижнів зіллються і утворять суцільну масу. Можна залити смолою отвір лійки і дати затвердіти утвореному шару. Під час удару цей шар розбивається. Якщо ж з'єднати кінець лійки з насосом і потихеньку нагнітати повітря, можна за кілька хвилин видути велику бульбашку. Врешті-решт бульбашка лопне, але дістанемо не бризки рідини, як у випадку мильної бульбашки, а осколки.

Таким чином, залежно від характеру впливу (зокрема, часу, протягом якого діє сила) аморфні речовини поведуть себе або як крихкі тверді тіла, або як дуже в'язкі рідини. Ці



Мал. 60

властивості аморфних речовин пояснюються особливостями їх молекулярної будови, завдяки яким їх можна віднести швидше до рідин, ніж до твердих тіл.

Атоми або молекули аморфних тіл, як і молекули рідини, мають певний час «осілого життя» — час коливань біля положення рівноваги. Проте на відміну від рідин цей час у них досить великий. У цьому відношенні аморфні тіла наближаються до кристалічних, оскільки переходи атомів з одного положення рівноваги в інше відбуваються рідко.

У аморфних тіл на відміну від кристалів немає точного порядку в розміщенні атомів. Тільки найближчі атоми — сусіди — розміщуються за деяким порядком. Проте точного повторення в усіх напрямках того самого елемента структури (елементарної комірки), характерного для кристалів, в аморфних тіл немає.

Часто одна й та сама речовина може перебувати і в кристалічному, і в аморфному станах. Наприклад, кварц (SiO_2) може бути в кристалічній і в аморфній формі (кремнезем). Кристалічну форму кварцу схематично зображають у вигляді решітки з правильних шестикутників (мал. 60, а). Аморфна структура кварцу також має вигляд решітки, але неправильної. Крім шестикутників, у ній бувають п'яти- і семикутники (мал. 60, б).

Таким чином, за своєю внутрішньою будовою аморфні тіла близькі до рідин, відрізняючись від них лише меншими середніми відстанями між молекулами і в зв'язку з цим більшими силами молекулярного притягання. Тому *аморфні тіла можна вважати переохолодженими рідинами.*

Аморфний стан речовини нестійкий: через певний час аморфна речовина переходить у кристалічну. Часто цей перехід буває дуже тривалим і вимірюється роками та десятиліттями. Прикладом речовини, яка повільно переходить з аморфного стану в кристалічний, може бути скло. Спочатку прозоре, воно через багато років мутніє: в ньому утворюються дрібні кристалики силікатів різних матеріалів, які входять до складу скла.

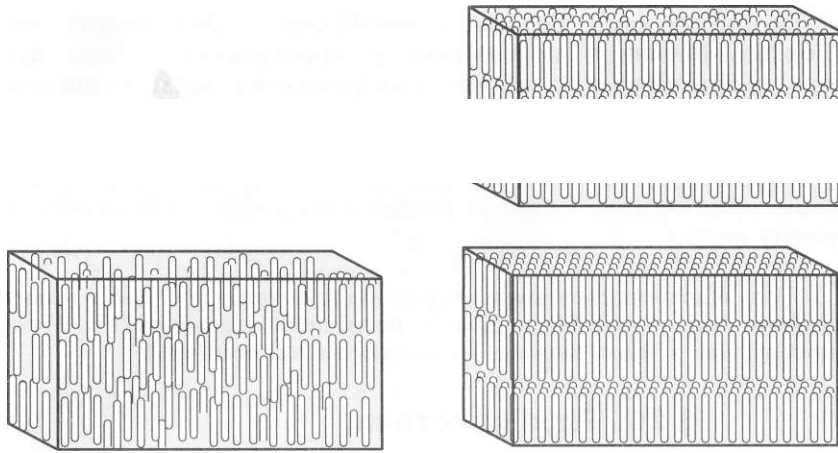
? 1. Чим відрізняються аморфні тіла від кристалічних? 2. Чи мають аморфні тіла дальній порядок у розміщенні частинок? 3. Чому аморфні тіла з часом можуть переходити в кристалічні?

§ 29. Рідкі кристали

Більшість речовин може перебувати в трьох агрегатних станах — твердому, рідкому й газоподібному. Однак деякі органічні речовини, молекули яких мають ниткоподібну форму або форму плоских пластин, можуть перебувати в особливому стані, маючи одночасно властивості анізотропії і текучості. Цей стан, який поєднує властивості кристала і рідини, називають *рідкокристалічним*. А речовини, які досить дивовижно поєднують властивості рідин і кристалів, дістали назву *рідких кристалів*. Вони текучі і утворюють краплі. Правда, їхні краплі можуть мати не сферичну, а видовжену форму. Детальне дослідження показало, що розміщення молекул у них має порядок, не властивий звичайним рідинам і твердим тілам. Якщо в твердих кристалах спостерігається дальній порядок у розміщенні частинок в будь-яких трьох взаємно перпендикулярних напрямках, то в рідких — в одному напрямі (одновісний дальній порядок).

Маючи впорядковану орієнтацію молекул в одному з напрямів, рідкі кристали характеризуються анізотропією фізичних властивостей: поверхневого натягу, електропровідності, магнітних і оптичних характеристик тощо. За механічними властивостями вони нагадують рідини, в'язкість яких коливається від рідкого клею до «твердого» скла.

Існують рідкі кристали в певному інтервалі температур, різному для різних речовин. Нагріваючись, вони перетворюються у звичайну рідину, від охолодження стають твердими кристалами. Розрізняють два основних типи рідких кристалів: нематичний (від грецького «нема» — нитка) і смектичний (від грецького «смекма» — мило). В нематичних рідких кристалах впорядкованість розташування молекул полягає в тому, що в певному об'ємі, який відповідає одному «монокристалу», поздовжні осі всіх молекул паралельні (мал. 61), а



Мал. 61

Мал. 62

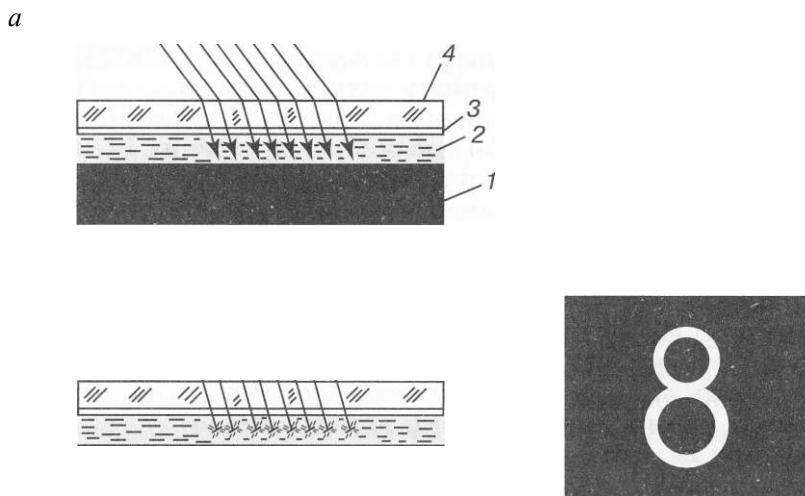
будь-який інший дальній порядок у розміщенні частинок відсутній. У смектичних рідких кристалах молекули розташовані шарами (мал. 62). Найпоширеніший приклад смектичного рідкого кристала — розчин мила у воді. Ті якості мила, які роблять його мийним засобом, безпосередньо пов'язані з його здатністю утворювати рідкі кристали. Мильний розчин складається з великої кількості подвійних шарів молекул мила, розділених шарами води. Коли ми миємо з милом руки, то шари молекул мила легко ковзають один відносно одного і шкіри, забираючи з неї бруд і передаючи його воді.

Вже вивчено понад 3000 речовин, які утворюють рідкі кристали. До них належить багато органічних речовин біологічного походження, наприклад дезоксирибонуклеїнова кислота, яка несе код спадкової інформації, і речовина мозку.

Багато рідких кристалів мають дуже цінну якість: деякі їх властивості різко змінюються за порівняно незначної зміни зовнішніх умов (температури, електричного і магнітного полів тощо). Це явище знайшло вже практичне застосування: на основі рідких кристалів опрацьовано перетворювач інфрачервоного зображення у видиме, лабораторний прилад для вимірювання коливань температури і т. ін.

Рідкі кристали використовуються в різних оптичних індикаторах, наприклад у циферблатах наручних годинників, на яких час фіксується не стрілкою, а зміною цифр. Будову і принцип дії таких індикаторів можна пояснити за допомогою малюнка 63.

Рідкокристалічна речовина 2 поміщається в зазор між чорною непрозорою для світла металевою пластинкою I і дуже



Мал. 63

тонкою, прозорою для світла металевою плівкою 3, нанесеною на покрівне скло 4. Якщо до обкладок конденсатора, що утворився, напруга не прикладена (мал. 63, а), світло, яке падає на циферблат, проходить крізь рідкий кристал і поглинається чорною металевою пластинкою. Циферблат спостерігачеві здається чорним.

Якщо на пластини подати напругу, то під дією електричного поля оптичні властивості рідкого кристала зміняться і він розсіюватиме світло, яке на нього падає. В результаті циферблат світитиметься в тих місцях, де створено електричне поле. Надавши верхньому електроду форму цифри, дістанемо свічення у вигляді цифри (мал. 63, б).

Надзвичайно велике значення рідких кристалів у біології та медицині. Немає сумнівів у тому, що дальші дослідження цих речовин не тільки розширять їх застосування в техніці, а й дадуть змогу проникнути в таємниці біологічних процесів.

§ 30. Створення матеріалів із наперед заданими технічними властивостями

Останнім часом у багатьох галузях народного господарства зростають потреби в економічних і високоякісних матеріалах, що мають певні технічні властивості. Для науки й техніки потрібні матеріали досить міцні та особливо стійкі проти нагрівання, дії хімічних реагентів, корозії.

В авіації, ракетній, космічній і ядерній техніці, радіоелектроніці прогрес був би просто неможливий без надміцних матеріалів, здатних витримувати температури до 2500 °С і вище.

Багато з використовуваних у техніці матеріалів не існує в природному стані — їх створила людина. В сучасній техніці використовується понад 20 тисяч конструкційних і будівельних матеріалів, і їх асортимент з кожним роком зростає за рахунок створення надміцних, жаростійких, хімічно стійких матеріалів та їх сплавів. Але якщо раніше нові матеріали створювалися в результаті простого відбору природних речовин із необхідними властивостями, то нині на основі знання залежності фізичних і хімічних властивостей речовини від її будови (структури) цілеспрямовано створюють матеріали із заздалегідь заданими механічними, тепловими, електромагнітними, оптичними та іншими властивостями.

Одним із засобів керування властивостями нових матеріалів є утворення різних сплавів. Сплавляючи в певному співвідношенні різні метали, дістають сплави з бажаними технічними властивостями. В розплавленому стані відбувається активне дифузійне перемішування частинок (йонів, атомів, молекул) вихідних речовин, яке у процесі кристалізації сприяє утворенню сплаву із властивостями, які відрізняються від властивостей його компонентів. Тепер виготовляються і використовуються тисячі металевих сплавів з різноманітними властивостями: дюралюміній (сплав алюмінію з міддю, магнієм і манганом), латунь (сплав міді з цинком), бронза (сплав міді з оловом, алюмінієм або свинцем), бабіт (сплав олова, стибію і міді), легована сталь (сплави заліза з нікелем, кобальтом, хромом та іншими металами) тощо. Тверді металеві сплави мають високу пластичність і міцність. Сплавляючи тугоплавкі метали (вольфрам, хром, ванадій, іридій, молібден тощо), дістають особливо тверді сплави, які використовують для виготовлення металорізального інструменту. На основі титану дістають легкі і надзвичайно міцні сплави, здатні працювати за температури 500—600 °С. За густини $4,5 \cdot 10^3$ кг/м³ титан має модуль пружності приблизно в 2 рази більший, ніж залізо, і в 6 раз більший, ніж алюміній. Ці якості титанових сплавів зробили їх незамінними в надзвуківій авіації, космічній техніці та інших галузях науки і техніки.

Для роботи у разі великих механічних навантажень використовувалися переважно метали та їх сплави. Однак метали непридатні в агресивних середовищах або за високих температур, оскільки зазнають корозії, а під час нагрівання стають пластичними і набувають плинності, тобто повільно і безперервно деформуються під впливом навантажень чи механічних напруг. З метою підвищення міцності металів у їх

кристалічні решітки вводять атоми інших елементів, таких, як Карбон, Силіцій, Нітроген, Бор. В результаті дістають сполуки металів з Карбоном (карбіди), Силіцієм (силіциди), Бором (бориди), Нітрогеном (нітриди), які дістали назву металопоподібних. Ці з'єднання, зберігаючи значною мірою властивості металів (міцність, електропровідність тощо), одночасно набувають і нових (твердість, теплостійкість, хімічна стійкість). Атоми металу і неметалу зв'язуються між собою дуже міцними ковалентно-металевими зв'язками.

Карбіди деяких металів (Титану, Цирконію, Гафнію, Ванадію, Танталу, Ніобію, Молібдену тощо) дуже тверді і тугоплавкі речовини. Підвищення цих цінних якостей досягається в результаті сплавлення між собою різних карбідів чи карбідів з металами: нікелем, кобальтом, хромом тощо. Так, деталі із сплаву карбідів танталу, гафнію і цирконію можуть працювати за температури до 3000 °С. Найтугоплавкішим з усіх відомих матеріалів є сплав карбідів танталу (80 %) і гафнію. Його температура плавлення дорівнює 4215 С.

Металопоподібні сполуки знаходять широке і різноманітне застосування у сучасній техніці: захисні покриття під час добування жароміцних волокон, в металургії, енергетиці тощо.

З кожним роком зростає застосування в техніці так званих бінарних сполук неметалів: Карбону, Силіцію, Нітрогену і Бору, тобто продуктів з'єднання між собою двох різних атомів цих елементів. В кристалічній структурі бінарних сполук атоми зв'язані міцними ковалентними зв'язками. Тому ці речовини відзначаються винятковою твердістю, термостійкістю, вогнетривкістю і хімічною стійкістю.

Прикладом такої бінарної сполуки є карбід силіцію $8iC$, який в техніці називають карборундом. Його дуже широко використовують для виготовлення абразивів, вогнетривів і напівпровідників. Ниткоподібні монокристали карбіду силіцію використовують для армування металів і полімерів та добування в такий спосіб винятково міцних матеріалів.

Дуже міцний ковалентний зв'язок утворюють атоми Бору і Нітрогену в кристалічній структурі нітриду бору N_6 , причому існують три різні форми кристалічних решіток, дві з яких аналогічні алмазу і графіту. Нітрид бору, кристалічна решітка якого схожа з графітом — це білий порошок («білий графіт»), слугує кращим, ніж графіт, змащенням. Нітрид бору, що має кристалічну решітку, аналогічну алмазу, за твердістю не поступається йому і перевищує його за міцністю і термостійкістю. В техніці цей матеріал називають ельбором, кубонітом або боразоном. Різальні й абразивні інструменти, виготовлені на основі ельбору, в 10—20 раз перевищують за стійкістю твердосплавні інструменти. Такими інструментами можна обробляти сталь і

чавун, тоді як алмазні інструменти для цієї мети непридатні: під час розігрівання алмаз перетворюється в графіт.

У багатьох галузях науки і техніки широко використовують чудові механічні, електромагнітні й оптичні властивості монокристалів хімічних елементів і багатьох речовин, насамперед алмазу, рубіну, германію, кварцу, силіцію, сапфіру, ісландського шпату тощо. Але, на жаль, ці монокристали трапляються в природі дуже рідко і в більшості випадків мають тріщини, забруднення, дефекти кристалічної структури. У зв'язку з цим швидкими темпами розвиваються техніка і технологія штучного вирощування, або синтезу монокристалів багатьох хімічних елементів і сполук дуже високої хімічної чистоти з досконалою кристалічною структурою.

В Україні виробляються сотні штучних кристалів, у тому числі дорогоцінних і напівдорогоцінних: діамантів, смарагдів, рубінів, гранатів, сапфірів, аметистів, топазів тощо. Вирощені штучні монокристали ні в чому не поступаються природним, а деякі і значно їх перевищують, оскільки в процесі їх виготовлення учені й інженери можуть цілеспрямовано змінювати склад вихідних речовин, умови вирощування і тим самим створювати монокристали з необхідними властивостями.

Існують два основні способи вирощування монокристалів: кристалізація із розплаву і кристалізація із розчину.

Великим досягненням науки й техніки останніх сорока років була організація промислового виробництва синтетичних алмазів. Вони виявилися кращими за природні: твердіші, менш крихкі і стійкіші проти зношування. Наприклад, алмазні підшипники, які працюють без змащення у хронометрах вищого класу для морських кораблів і в інших особливо точних навігаційних приладах, роблять 60 млн обертів без помітного зношування. Синтетичні алмази у вигляді порошоків, паст і дрібних кристалів також використовують у приладах і деталях, які вимагають великої твердості. Їх застосовують для дуже точної обробки важливих деталей машин і приладів, виробів з твердої сталі, кераміки, природних алмазів. Алмазні різці, свердла, пилки, фільтри і коронки в сотні і тисячі разів довговічніші за звичайні, при цьому обробка ними твердих сплавів і пластиків прискорюється в 6—12 раз. Глибоке буріння свердловин ведеться тепер майже виключно за допомогою алмазного інструменту.

Висновки

Усі тіла складаються з молекул і атомів, які перебувають у безперервному хаотичному русі. Між атомами і молекулами існують сили взаємодії.

Дифузія в газах, рідинах і твердих тілах пояснюється тепловим рухом молекул. Броунівський рух є відображенням руху молекул рідини чи газу.

Тиск газу відображає спільний ефект співударянь зі стінкою великої кількості молекул.

Температура тіла — це міра середньої кінетичної енергії поступального руху його молекул.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів твердить, що тиск ідеального газу пропорційний добуткові числа молекул в одиниці об'єму, маси молекули і середнього квадрата швидкості руху молекул: $p = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2$.

Це рівняння можна також записати у вигляді

$$pV = NkT; \quad p = nkT; \quad pV = \frac{2}{3} E_k \quad \text{і} \quad p = \frac{2}{3} \frac{E_k}{V}$$

Для даної маси газу добуток тиску на об'єм, поділений на абсолютну температуру $\frac{pV}{T}$ є величина стала: $\frac{pV}{T} = \text{const}$ (рівняння стану ідеального газу — рівняння Клапейрона).

З рівняння стану ідеального газу $\frac{pV}{T} = \text{const}$ легко дістати закон Бойля—Маріотта (добуток тиску даної маси газу на його об'єм за сталої температури є величина стала: $pV = \text{const}$); закон Гей-Люссака (за незмінної маси газу і сталого тиску його об'єм прямо пропорційний абсолютній температурі: $V = \text{const} \cdot T$), закон Шарля (за незмінної маси газу і сталого об'єму тиск газу прямо пропорційний абсолютній температурі: $p = \text{const} \cdot T$).

З основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії випливає, що в однакових об'ємах будь-якого газу за однакових тисків і температур містяться однакові кількості молекул (закон Авогадро). Моль будь-якого газу за нормальних умов містить $6,022 \cdot 10^{23}$ молекул.

Тиск насиченої пари над її рідиною не залежить від об'єму пари і за незмінної температури сталий. З підвищенням температури тиск насиченої пари зростає і за температури кипіння рідини дорівнює атмосферному тиску.

Стан речовини, за якого густина рідини і густина її насиченої пари однакові, називають критичним. У критичному стані рідина має максимальний об'єм, а насичена пара — максимальний тиск. За температур вищих критичної газ не можна перетворити в рідину ні під яким тиском.

Абсолютна вологість повітря вимірюється кількістю водяної пари, яка міститься в 1 м^3 повітря. Відносна вологість вимірюється відношенням кількості водяної пари, яка є

в повітрі (абсолютної вологості), до тієї кількості пари, яка необхідна для насичення повітря за тієї самої температури.

Рідини займають проміжне положення між газами і кристалами. В розміщенні частинок рідини є певний порядок, тобто її молекули утворюють щось схоже на кристалічну решітку. На відміну від кристалів у рідинах цей порядок не поширюється на весь об'єм, а обмежується областю, яка містить лише невелику кількість частинок навколо даної (існує так званий ближній порядок).

Внаслідок взаємодії молекул виникає поверхневий натяг рідини. Його характеризують силою, прикладеною до контуру, який обмежує поверхню рідини. Цю силу називають силою поверхневого натягу. Кількісною характеристикою рідини є поверхневий натяг, який дорівнює відношенню сили поверхневого натягу до довжини межі поверхневого шару.

Поверхневий натяг рідини є причиною явища капілярності — підняття (опускання) рідини в трубках малого перерізу. Його широко використовують у техніці, зокрема в агротехніці.

Речовини у твердому стані за їх властивостями поділяють на дві групи: кристалічні й аморфні. Кристалічні тіла на відміну від аморфних мають певну температуру плавлення, незмінну за сталого тиску. Основна макроскопічна особливість монокристалів — анізотропія їх фізичних властивостей (механічних, електричних, магнітних, оптичних). Полікристалічні й аморфні тіла ізотропні.

Кожне тіло під дією зовнішніх сил змінює свій розмір чи форму. Це явище називають деформацією. Деформації бувають пружними (для них справджується закон Гука) і пластичними (непружними). Важливими характеристиками властивостей матеріалів є: а) межа пружності — напруга, за якої в тілі виникає залишкова деформація; б) межа текучості — напруга, за якої починається пластична деформація; в) межа міцності — напруга, яку витримує тіло перед руйнуванням.

ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

Молекулярно-кінетична теорія пояснює властивості тіл і явища, які відбуваються в речовині, виходячи з характеру руху і взаємодії частинок — молекул або атомів, і досягає в цьому значних успіхів. Наприклад, тиск ідеального газу пояснюється бомбардуванням величезної кількості молекул стінок посудини, а кількісна залежність тиску від температури ґрунтується на зв'язку тиску з середньою кінетичною енергією поступального руху молекул газу.

Однак у ряді випадків методи молекулярної фізики виявляються занадто складними для кількісного опису явищ. Зокрема, для того щоб методами молекулярно-кінетичної теорії дістати кількісний зв'язок між параметрами реального газу, рідини або твердого тіла, слід враховувати сили, які діють між частинками речовини. Це в більшості випадків зробити складно, а часто взагалі неможливо.

Між тим багато співвідношень між параметрами стану речовини можна вивести, нічого не знаючи про внутрішній «механізм» явищ, які зумовлюють цей зв'язок. Розділ фізики, в якому вивчаються властивості тіл без врахування їх атомно-молекулярної будови, без використання уявлень про характер руху і взаємодії частинок, з яких ці тіла складаються, називається термодинамікою.

Термодинаміка розглядає властивості тіл і явища, які відбуваються в них, спираючись на певні загальні закони (начала) термодинаміки, які є узагальненням величезної кількості дослідних фактів. Закони термодинаміки і молекулярно-кінетична теорія доповнюють одне одного, розширюють можливості вивчення загальних властивостей макроскопічних систем, які складаються з великої кількості частинок.

Для опису явищ у термодинаміці використовуються поняття «термодинамічна система» і «термодинамічний про-

цес». Сукупність фізичних тіл, ізольовану від взаємодії з іншими тілами, називають *ізольованою термодинамічною системою*. Стан термодинамічної системи повністю описується певними незалежними фізичними параметрами. Будь-яка зміна, що відбувається в термодинамічній системі, називається *термодинамічним процесом*.

§ 31- Внутрішня енергія

Одним з найважливіших параметрів термодинамічної системи є її *внутрішня енергія*. З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що будь-яке макроскопічне тіло має внутрішню енергію. Поняття внутрішньої енергії макроскопічних тіл відіграє важливу роль у дослідженнях теплових явищ. Це зумовлено існуванням фундаментального закону природи — закону збереження енергії.

Відкриття закону збереження енергії стало можливим після того, як було доведено, що, крім механічної енергії, макроскопічні тіла мають ще й внутрішню енергію, яка зосереджена в самих тілах. Ця енергія входить до загального балансу енергетичних перетворень у природі.

З погляду молекулярно-кінетичної теорії внутрішня енергія макроскопічного тіла дорівнює сумі кінетичних енергій хаотичного руху всіх молекул (або атомів) відносно центра маси тіла і потенціальних енергій взаємодії всіх молекул одна з одною (але не з молекулами інших тіл).

До внутрішньої енергії відносять також і енергію, зв'язану з обертальними і коливальними рухами молекул, кінетичну і потенціальну енергію атомів, які утворюють молекулу (цю енергію називають хімічною), електронів і атомних ядер (внутрішньоатомну енергію), частинок, які входять до складу ядра (внутрішньоядерну енергію). Але оскільки в молекулярній фізиці розглядаються явища, під час яких відбуваються зміни лише кінетичної і потенціальної енергії молекул, а решта складових внутрішньої енергії не змінюється, надалі *під внутрішньою енергією ми будемо розуміти енергію хаотичного руху молекул і енергію їх взаємодії*.

Обчислити внутрішню енергію тіла, підраховуючи енергію всіх взаємодіючих між собою багатьох мільярдів частинок, практично неможливо, оскільки закони залежності сил взаємодії атомів і молекул од відстані між; ними складні, а взаємне розміщення частинок внаслідок теплового руху безперервно змінюється. Також хаотично змінюється і кінетична енергія окремих частинок. Тому потрібно вміти визначати середнє значення внутрішньої енергії (або її зміну) залежно

від макроскопічних параметрів, які можна безпосередньо виміряти.

Простий розв'язок ця задача має для випадку ідеального газу. Внутрішня енергія ідеального газу становить суму лише кінетичних енергій теплового руху його частинок, оскільки взаємодією частинок в ідеальному газі можна знехтувати. Найпростіше можна обчислити внутрішню енергію ідеального одноатомного газу (гелію, неону, аргону та ін.), бо його молекули здійснюють лише поступальний рух.

Середня кінетична енергія молекул такого газу дорівнює $\frac{3}{2}kT$. Тому внутрішня енергія газу, який складається з N молекул, дорівнює $U = \frac{3}{2}NkT$. Оскільки

$$K = \frac{3}{2}NkT, \text{ то } V = \frac{2}{3}K = \frac{2}{3}K. \quad (31.1)$$

Внутрішня енергія ідеального одноатомного газу залежить лише від одного параметра — його абсолютної температури $V = \frac{2}{3}(T)$. Вона не залежить від об'єму та інших макроскопічних параметрів системи. Зміна внутрішньої енергії даної маси ідеального газу відбувається лише за зміни його температури:

$$\Delta U = \frac{3}{2}Nk\Delta T, \quad (31.2)$$

Під час нагрівання газу його внутрішня енергія збільшується, а під час охолодження — зменшується.

Якщо збільшити масу газу, то збільшиться і його внутрішня енергія ($U \sim m$). Внутрішня енергія залежить від виду газу, тобто від його молярної маси: $V \sim \frac{1}{M}$ чим більше M , тим менше атомів буде в даній масі газу.

Якщо молекули ідеального газу складніші, ніж одноатомні, то його внутрішня енергія також пропорційна абсолютній температурі, але коефіцієнт пропорційності між U і T інший. Це пояснюється тим, що складні молекули не лише рухаються поступально, а й обертаються. Внутрішня енергія таких газів дорівнює сумі енергій поступального й обертального руху молекул.

Ми встановили, що внутрішня енергія ідеального газу залежить від одного параметра — температури. Від об'єму внутрішня енергія ідеального газу не залежить через те, що потенціальна енергія взаємодії його молекул, як вважають, дорівнює нулю.

У реальних газів, рідин і твердих тіл середня потенціальна енергія взаємодії молекул не дорівнює нулю. Щоправда, для газів вона набагато менша за середню кінетичну енергію, йле для твердих і рідких тіл порівнянна з кінетичною. Середня

потенціальна енергія взаємодії молекул залежить від об'єму речовини, оскільки зі зміною об'єму змінюється середня відстань між молекулами. Отже, **в загальному випадку внутрішня енергія разом з температурою T залежить ще й від об'єму V .**

Макроскопічні параметри T , V та інші визначають стан тіл. Від них залежить і внутрішня енергія макроскопічних тіл. Внутрішня енергія 17 макроскопічних тіл однозначно визначається параметрами, що характеризують стан тіла: температурою і об'ємом.

У результаті яких процесів може змінюватися внутрішня енергія? З курсу фізики 8-го класу вам відомо, що існує два види таких процесів: передавання теплоти і виконання роботи.

Кількість енергії, переданої від одного тіла до другого, називають по-різному залежно від способу передачі. Якщо способом передачі є виконання механічної роботи, то кількість переданої енергії так і називають — **р о б о т а**. Якщо ж енергія передається внаслідок теплопередачі, то передану енергію називають кількістю теплоти. Таким чином, **кількість теплоти, передана чи набута тілом разом з виконаною роботою, є мірою зміни внутрішньої енергії тіла чи системи тіл.**

? 1. Що таке внутрішня енергія макроскопічного тіла? 2. Чому дорівнює внутрішня енергія ідеального одноатомного газу? 3. Моль якого газу — водню чи гелію — має більшу внутрішню енергію за однакової температури газів? 4. Якими способами можна змінити внутрішню енергію тіла?

§ 32. Зміна внутрішньої енергії тіла під час теплопередачі (в процесі нагрівання й охолодження, плавлення й тверднення)¹

У разі теплопередачі обмін внутрішньою енергією між тілами відбувається за рахунок взаємодії молекул холодного тіла, які повільно рухаються, з молекулами гарячого тіла, які рухаються швидше. У результаті кінетичні енергії молекул вирівнюються і швидкості молекул холодного тіла збільшуються, а гарячого тіла — зменшуються. Наприклад, молекули металу плити, температура якої вища, ніж води в каструлі, мають в середньому більшу швидкість руху і кінетичну енергію, ніж частинки води. В результаті зіткнень

¹ Коротко повторюються відомості з курсу фізики 8-го класу.

швидкі молекули металу плити передають частину своєї кінетичної енергії молекулам металу каструлі, а ті в свою чергу — молекулам води, швидкість руху яких зростає.

Під час теплообміну енергія не перетворюється з однієї форми в іншу: частина внутрішньої енергії гарячого тіла передається холодному тілу.

Пригадаємо, як обчислюється зміна внутрішньої енергії під час теплообміну. У тому випадку, коли ця зміна відбувається лише завдяки теплопередачі, на основі закону збереження енергії можна твердити, що кількість теплоти поглинутої чи виділеної в розглядуваному процесі, дорівнює зміні внутрішньої енергії тіла: $Q = \Delta U$. З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що під час нагрівання чи охолодження тіла кількість переданої теплоти Q прямо пропорційна масі тіла m і зміні його температури i_2 - тобто

$$Q = \Delta U = cm(i_2 - i_1) = cm(T_2 - T_1). \quad (32.1)$$

Під час остигання тіла його кінцева температура i_2 менша за початкову i_1 і кількість теплоти, яку тіло віддає, від'ємна.

Коефіцієнт пропорційності c характеризує залежність зміни внутрішньої енергії тіла в процесі його нагрівання або охолодження від речовини і називається *питомою теплоємністю речовини*.

Питома теплоємність — це кількість теплоти, яку треба надати 1 кг речовини, щоб змінити її температуру на 1 К.

Одиниця питомої теплоємності — $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Різним речовинам

потрібна неоднакова кількість теплоти, щоб підвищити температуру 1 кг речовини на 1 К. Так, питома теплоємність води 4190 Дж/(кг·К), міді 380 Дж/(кг·К), а чавуну 460 Дж/(кг·К).

Питома теплоємність речовини не є її однозначною характеристикою. Залежно від умов, за яких здійснюється теплопередача, однакова кількість теплоти, передана тілу, може викликати різні зміни його внутрішньої енергії і, отже, температури. В таблицях звичайно наводяться дані про питому теплоємність речовини за умови постійного об'єму тіла, тобто за умови рівності нулю роботи зовнішніх сил після зміни об'єму тіла.

Зверніть увагу, що кількість теплоти — це не внутрішня енергія тіла; вона дорівнює зміні внутрішньої енергії під час теплообміну. Не можна говорити, що тіло містить таку-то кількість теплоти, в той же час тіло має певну внутрішню енергію.

Пригадаємо, як можна обчислити зміну внутрішньої енергії під час плавлення і тверднення тіла. Як ви знаєте, плав-

лення кристалічних тіл відбувається за цілком певної температури. Так, лід тоне (якщо атмосферний тиск нормальний) за 0 °С, свинець плавиться за 327 °С, залізо — за 1530 °С тощо. Щоб розплавити тверде кристалічне тіло, йому треба надати ззовні певну кількість теплоти. Перед початком плавлення передана тілу кількість теплоти $Q_x = C_{пл}(T_{пл} - T)$ йде на його нагрівання до температури плавлення. В міру нагрівання середня енергія молекул тіла зростає. В основному це відбувається завдяки зростанню середньої кінетичної енергії частинок, однак і їх потенціальна енергія також зростає, оскільки з підвищенням температури збільшуються відстані між молекулами. Це спричиняє послаблення сил притягання між частинками, які утворюють кристал. За високої температури ці сили зменшуються настільки, що починає руйнуватися кристалічна решітка — відбувається перехід речовини в рідкий стан. Після досягнення температури плавлення вся підведена до тіла енергія йде на збільшення потенціальної енергії молекул і подолання зв'язків між ними, а їх кінетична енергія (отже, і температура тіла, яке плавиться) залишається незмінною.

Кількість теплоти X , необхідну для перетворення 1 кг кристалічної речовини за температури плавлення в рідину за тієї самої температури, називають *питомою теплотою плавлення* цієї речовини. Тверднучи, 1 кг речовини віддає навколишньому середовищу таку саму кількість теплоти X .

Якщо для плавлення 1 кг речовини йому треба надати кількість теплоти X , то для плавлення m кг потрібно:

$$Y = X m. \quad (32.2)$$

Така сама кількість теплоти виділиться під час тверднення (кристалізації) m кг речовини.

Після повного переходу кристалічної речовини в рідину подальше надходження енергії витрачається на нагрівання утвореної рідини від температури плавлення $T_{пл}$ до якоїсь температури T_2 :

$$y_2 = c_{пл}(T_2 - T_{пл}). \quad (32.3)$$

Це зрозуміло, оскільки після руйнування кристалічної решітки надана кількість теплоти йде на збільшення кінетичної енергії молекул.

Задача. У плавильну піч завантажили 2000 кг чавуну, взятого за температури 20 °С. Яку кількість теплоти треба витратити на його плавлення? Скільки льоду, взятого за 0 °С, можна було б розплавити за рахунок цієї кількості теплоти? Питома теплота плавлення чавуну $1,4 \cdot 10^5$ Дж/кг, питома

теплоємність чавуну $0,46 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), температура його плавлення 1150 °С.

Розв'язання. Надана чавуну енергія йде на його нагрівання до температури плавлення і на плавлення, тобто

$$Q = c_1 T_1 (7^{1}_{\text{пл}} - m_0) + \lambda m_i \ll 1,32 \cdot 10^9 \text{ Дж.}$$

За рахунок цієї кількості теплоти можна розплавити льоду

$$m_2 = \frac{Q}{\lambda}; \quad m_2 = \frac{1,32 \cdot 10^9 \text{ Дж}}{3,3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}} = 4000 \text{ кг.}$$

Процеси плавлення і тверднення речовини широко використовують у техніці. На них ґрунтуються ливарне виробництво, виготовлення різних сплавів. В останні роки опрацьовано технологію виливання виробів з пластмас і каменю (з плавленого каменю виготовляють станини машин, труби тощо).

? 1. Які існують способи зміни внутрішньої енергії тіла? 2. Що таке кількість теплоти? Який спосіб зміни внутрішньої енергії характеризує ця величина? 3. Як обчислюють зміну внутрішньої енергії тіла під час його нагрівання і охолодження? 4. Питома теплоємність свинцю становить 130 Дж/(кг·К), а сталі 460 Дж/(кг·К). Яке тіло — свинець чи сталь — швидше нагрівається за інших однакових умов? 5. Як обчислюють кількість теплоти, необхідну для плавлення кристалічного тіла?

Вправа 10. Латунний калориметр масою $m_k = 128$ г, який містить воду $m_w = 240$ г за температури $t_w = 8,4$ °С, опустили металеве тіло масою $m_T = 380$ г, нагріте до температури $t_T = 100$ °С. Теплова рівновага встановилася за температури $t = 21,5$ °С. Визначте питому теплоємність речовини металевого тіла.

2. У батарею водяного опалення надходить щосекунди $6 \cdot 10^{-6}$ м³ води за температури 80 °С. Температура води, що виходить з батареї, становить 25 °С. Яку кількість теплоти дістане опалюване приміщення за добу?

3. Стальний різець масою 200 г нагріли до температури 800 °С і занурили для загартування у воду, взятую за температури 20 °С. Через певний час температура води підвищилася до 60 °С. Яка кількість теплоти була передана різцем воді?

4. Яка кількість теплоти потрібна для нагрівання і плавлення 10^4 кг сталевого лому в мартенівській печі, якщо початкова його температура 20 °С? Температура плавлення сталі 1500 °С. Питома теплота плавлення сталі $X = 2,7 \cdot 10^5$ Дж/кг.

5. У плавильній печі за одну плавку одержали 250 кг алюмінію за температури 660 °С. Визначити, наскільки змінилася внутрішня енергія алюмінію, якщо його початкова температура була 20 °С. Питома теплота плавлення алюмінію $X = 3,9 \cdot 10^5$ Дж/кг.

§33. Зміна внутрішньої енергії тіла під час теплопередачі (в процесі пароутворення, конденсації і згоряння палива)¹

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, як можна обчислити зміну внутрішньої енергії речовини під час її випаровування чи конденсації. Для перетворення 1 кг рідини в пару за сталої температури треба надати їй кількість теплоти, що дорівнює питомій теплоті пароутворення. Позначають цю величину літерою g і вимірюють у джоулях на кілограм (Дж/кг). Для перетворення m кг рідини в пару треба затратити кількість теплоти

$$Q = m \cdot g. \quad (33.1)$$

Під час конденсації пари в рідину виділяється така сама кількість теплоти.

Дуже велика питома теплота пароутворення води: $2,256 \times 10^6$ Дж/кг за температури 100°C . В інших рідинах (спирт, ефір, ртуть, гас тощо) питома теплота пароутворення менша в 3—10 раз.

Перетворення рідини в пару за сталої температури не приводить до збільшення кінетичної енергії молекул, але супроводжується збільшенням потенціальної енергії взаємодії молекул речовини. Адже середня відстань між молекулами газу в багато разів більша, ніж між молекулами рідини.

Задача 1. Яку кількість теплоти треба надати 5 кг льоду, взятого за температури -10°C , щоб його розплавити, а одержану воду нагріти до 100°C і випарити? Питома теплоємність льоду становить $2,1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), води $4,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), питома теплота плавлення льоду $3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг, питома теплота пароутворення води $g = 22,6 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Розв'язання. Надана в розглядуваному випадку кількість теплоти має бути витрачена на зміну внутрішньої енергії:

льоду під час нагрівання його до точки плавлення:

$$Q_1 = c_i m (t_{\text{пл}} - t_i);$$

льоду під час його плавлення:

$$Q_2 = \lambda m;$$

¹ Повторюються з певними доповненнями відомості з курсу фізики 8-го класу.

води, що утворилася з льоду, для нагрівання її до 100 °С:

$$Q_3 = c_2 m (T_2 - T_{пл})$$

води під час випаровування:

$$Q_4 = \lambda m.$$

Отже, повна кількість теплоти

$$Q = c_1 m (T_1 - T_2) + \lambda m + c_2 m (T_2 - T_{пл}) + \lambda m;$$

$$Q = 1,5 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Нарешті, пригадаємо, як обчислюється зміна внутрішньої енергії під час згоряння речовини. У 8-му класі ви дізналися, що види палива характеризуються питомою теплотою згоряння, тобто кількістю теплоти, яка виділяється у разі повного згоряння 1 кг палива. Позначають цю величину літерою q і вимірюють у джоулях на кілограм (Дж/кг). Наприклад, теплота згоряння природного газу $4,4 \cdot 10^7$ Дж/кг, бензину $4,6 \cdot 10^7$ Дж/кг, водню $1,4 \cdot 10^8$ Дж/кг. Щоб обчислити кількість теплоти, яка виділяється під час згоряння будь-якої маси палива, треба питому теплоту згоряння ц помножити на масу пг:

$$Q = qm. \quad (33.2)$$

Зауважимо, що потребу в паливі часто виражають в тоннах умовного палива, питому теплоту згоряння якого прийнято рівною $29,3 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Задача 2. Мартенівська піч працює на природному газі. Скільки газу треба спалити для виплавлення 50 т сталі, якщо ККД печі 40 %? Початкова температура сталі 20 °С, її питома теплоємність $0,46 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), питома теплота плавлення $2,7 \cdot 10^5$ Дж/кг, температура плавлення 1500 °С, питома теплота згоряння газу $4,4 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Розв'язання. Щоб нагріти до температури 1500 °С і розплавити сталь, їй треба надати кількість теплоти

$$c_1 m (T_1 - T_2) + \lambda m.$$

Однак під час згоряння газу лише 40 % виділеної кількості теплоти Q_2 йде на нагрівання і плавлення сталі. Тому

$$Q = c_1 m (T_1 - T_2) + \lambda m,$$

звідси

$$m_2 \ll 2700 \text{ кг.}$$

Якщо в теплообміні беруть участь кілька тіл, то кількість теплоти, що її віддають тіла, внутрішня енергія яких змен-

шується, має дорівнювати кількості теплоти, одержаної тілами, внутрішня енергія яких збільшується. Ця рівність становить відоме вам з курсу фізики 8-го класу *рівняння теплового балансу*; на його основі розв'язується багато практичних задач.

Задача 3. Для загартування сталевий лист, маса якого 240 кг, нагріли до температури 850 °С і опустили у ванну з маслом. Визначити кількість масла у ванні, якщо початкова температура його була 50 °С, а після занурення в нього нагрітого листа піднялася до 70 °С. Питома теплоємність сталі 0,46·10³ Дж/Дкг·К), масла 1,7·10³ Дж/Дкг·К).

Розв'язання. В теплообміні беруть участь два тіла: масло і сталевий лист. Отже, кількість теплоти, що віддає сталевий лист, дорівнює

$$= c_1 m_1 (T_1 - T_2),$$

а масло дістає

$$Q_2 = c_2 m_2 (T_2 - T_3).$$

Складемо рівняння теплового балансу:

$$= Q_2, \text{ або } c_1 m_1 (T_1 - T_2) = c_2 m_2 (T_2 - T_3),$$

звідси

$$m_2 = \frac{c_1 m_1 (T_1 - T_2)}{c_2 (T_2 - T_3)}; \text{ при } m_1 = 240 \text{ кг.}$$

1. Що називають питомою теплотою пароутворення? Як розуміти, що питома теплота пароутворення води дорівнює 2,26 · 10⁷ Дж/кг?
2. Наскільки внутрішня енергія 1 кг водяної пари за температури 100 °С більша за внутрішню енергію води за тієї самої температури?
3. Що означає вираз «питома теплота згоряння дров становить 10⁷ Дж/кг»? 4. У чому суть рівняння теплового балансу?

Вправа 11 розплавлення 1 т сталі використовується електродна потужністю 100 кВт. Скільки часу продовжуватиметься плавка, якщо вилівок до початку плавлення треба нагріти на 1500 °С? Питома теплоємність сталі 500 Дж/(кг·К), питома теплота плавлення 2,7·10⁵ Дж/кг.

2. Визначте витрату нафти для плавлення в печі 500 кг сталі, якщо ККД печі 70 %. Питома теплота згоряння нафти 4,61 · 10⁷ Дж/кг. Початкова температура сталі 10 °С, температура плавлення 1360 °С.
3. Щоб дістати цементний розчин, змішали 250 кг цементу і 1500 кг піску за температури 5 °С, а 300 кг води за температури 40 °С. Визначте температуру розчину, якщо питома теплоємність цементу 0,83 · 10³ Дж/Дкг · К), піску 0,92 · 10³ Дж/Дкг · К).

§ 34. Зміна внутрішньої енергії тіла під час виконання роботи

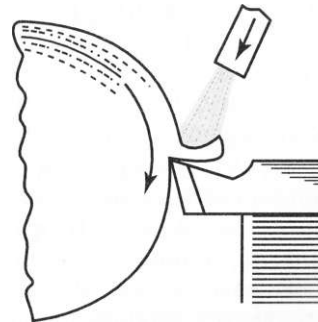
У механіці робота визначається як добуток модулів сили й переміщення, помножений на косинус кута між ними. Робота виконується, коли сила діє на рухоме тіло, й дорівнює зміні кінетичної енергії тіла.

У термодинаміці рух тіла як цілого не розглядається, а йдеться про переміщення однієї частини макроскопічного тіла відносно іншої. Внаслідок цього змінюється об'єм тіла, а його швидкість дорівнює нулю. Робота в термодинаміці, що визначається так само, як і в механіці, дорівнює зміні не кінетичної енергії тіла, а його внутрішньої енергії.

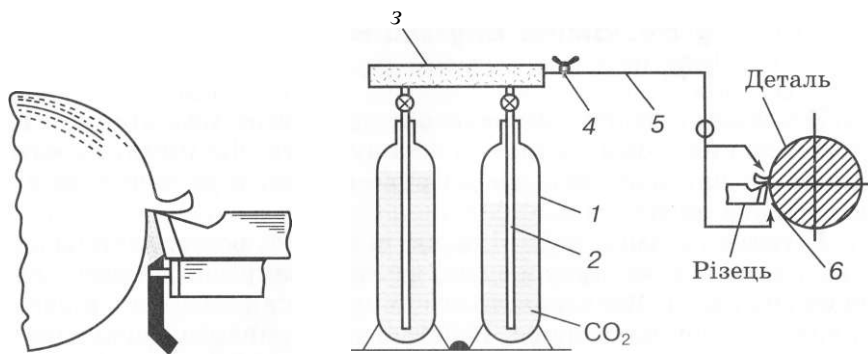
У тому, що внутрішня енергія тіл може змінюватися не лише під час теплообміну між ними, а й в процесі виконання цими тілами (або над ними) механічної роботи, неважко переконатися на прикладах.

Так, у процесі виконання роботи на металообробних (токарних, свердлильних, фрезерних, шліфувальних тощо) верстатах нагріваються різальний інструмент, а також деталь і стружка, що свідчить про збільшення їх внутрішньої енергії.

У сучасних швидкорізальних верстатах нагрівання інструменту настільки велике, що для його охолодження потрібні спеціальні заходи. Наприклад, подають до місця різання струмину рідини (мал. 64), яка, стикаючись з інструментом, різко знижує його температуру. В останні роки винайшли ефективніший спосіб охолодження такого інструменту, який ґрунтується на зміні внутрішньої енергії рідини в результаті її випаровування, тобто на використанні великої питомої теплоти пароутворення. При цьому спосіб охолоджувальна рідина розпиляється потоком повітря і подається безпосередньо в зону різання (мал. 65); випаровуючись, вона сильно охолоджує інструмент. Крім рідини, для охолодження різального інструменту використовують також гази (азот, охолоджене стиснуте повітря тощо); найчастіше застосовують вуглекислий газ. Рідка вуглекислота, яка перебуває в балоні 1 (мал. 66) під великим тиском (до 60 атм), подається з нього по сифонній трубці 2 і через кран 4, трубку 5 і спеціальну насадку 6 потрапляє в зону різання одночасно на передню і задню грані інструмента.



Мал. 93 номанітних електричних полях. Це



Мал. 65

Переходячи з рідкого в газоподібний стан, вуглекислота сильно охолоджується (до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). В камері 3 вуглекислий газ попередньо осушують. Це дає змогу успішно застосовувати такий вуглекислий газ під час фрезерування важкооброблюваних матеріалів (титану, нікелю, хрому тощо).

Зміна внутрішньої енергії під час виконання роботи є причиною нагрівання тіл, які труться, причому чим більша робота виконується, тим сильніше змінюється внутрішня енергія тіла і тим більше воно нагрівається. При недостатньому змащенні робота сил тертя може бути такою великою, що внаслідок нагрівання плавляться підшипники (наприклад, корінні і шатунні колінчастого вала тракторного чи автомобільного двигуна).

Здатність змінювати внутрішню енергію тіл під час виконання роботи (див. табл. 4) застосовують у техніці. Одним з прикладів є зварювання тертям. Зварювані деталі щільно притискають і потім приводять у швидке обертання одна відносно одної. В результаті виконання роботи на подолання сили тертя між деталями відбуваються розігрівання і плавлення їх поверхонь, і при стисканні вони зварюються. Цей вид зварювання застосовують для з'єднання частин валів, штоків з поршнями, виготовлення складного різального інструменту тощо.

У тому, що нагрівання тіла може відбуватися без надання йому певної кількості теплоти, а за рахунок виконання роботи, неважко переконатися і на простих дослідах. Зігніть і розігніть кілька разів мідну пластинку чи дротину, і ви виявите, що місце згину нагрілося. Вдарте кілька разів молотком по шматку свинцю, виявиться, що свинець також нагрівся.

Таким чином, внутрішня енергія тіла може змінюватися в результаті виконання роботи, причому ця зміна внутрішньої енергії завжди має дорівнювати виконаній над тілом роботі.

Способи зміни внутрішньої енергії

Механічна робота (подолання тертя, деформація, дроблення тіл тощо)		$A = Fz \cos \alpha$
Теплопередача	Нагрівання і охолодження тіл	$Q = mc(T_2 - T_1)$
	Плавлення і тверднення речовин	$Q = \lambda m$
	Пароутворення і конденсація	$Q = r m$
	Згоряння речовини	$Q = q m$

Задача. На скільки градусів нагріється залізна болванка, маса якої 2 кг, від удару молота, що має масу 350 кг і падає з висоти 2 м, якщо болванка поглинає 50 % кількості теплоти, яка виділяється під час удару? Питома теплоємність заліза $4,6 \cdot 10^2$ Дж/Дкг·К).

Розв'язання. Під час падіння молота сила тяжіння виконує роботу $m_2 g h$, і за рахунок половини цієї роботи відбувається зміна внутрішньої енергії болванки відповідно до формули $Q = mc(T_2 - T_1)$

$$m_2 g h = 2mc(T_2 - T_1),$$

звідси

$$T_2 = T_1 + \frac{m_2 g h}{2mc} = 300 \text{ К} + \frac{350 \cdot 9,8 \cdot 2}{2 \cdot 4,6 \cdot 10^2 \cdot 2} = 300,7 \text{ К}$$

? 1. Наведіть приклади перетворення механічної енергії у внутрішню і навпаки в техніці і в побуті. 2. Над тілом виконується робота 10 Дж. Наскільки змінюється його внутрішня енергія? 3. Як пояснити нагрівання різального інструменту (свердла, різця, фрези тощо) під час обробки деталі на верстаті?

Вправа 12 ^{токарем} У верстаті обточують вал зі швидкістю різання 100 м/хв. Сила різання дорівнює 2150 Н. Яку кількість теплоти треба відводити із зони різання щохвилини, якщо на нагрівання різця, деталі та стружки витрачається 80 % механічної енергії шпинделя?

2. З однакової висоти падають два тіла однакової маси — мідне й залізне. Яке з них внаслідок удару нагріється до вищої температури?

3. Паровий молот, що має масу 10 т, вільно падає з висоти 2,5 м на залізну болванку масою 250 кг. На нагрівання болванки іде 30 %

кількості теплоти, яка виділяється під час удару. Скільки разів слід ударити молотом, щоб температура болванки піднялась на 20 °С?
4. Маса тепловоза 3000 т. Швидкість його руху 72 км/год. Визначте кількість теплоти, що виділяється під час гальмування.

§ 35. Перший закон термодинаміки

Отже, внутрішня енергія тіла може бути змінена у процесі теплопередачі чи виконання роботи, причому обидва ці процеси можуть відбуватись і одночасно.

Наприклад, газ у циліндрі під поршнем може нагріватися за рахунок передачі йому певної кількості теплоти, і одночасно виконуватися робота на його розширення і стискання. З попередніх курсів фізики ви знаєте, що всі процеси у природі підлягають закону збереження і перетворення енергії. Природно, що і процеси зміни внутрішньої енергії тіл також відбуваються згідно з цим законом. Нагадаємо, що за законом збереження і перетворення енергії при всіх процесах, які відбуваються в природі, **енергія не виникає і не зникає, а лише перетворюється в рівних кількостях із одного виду в інший**. Відповідно до закону збереження і перетворення енергії зміна внутрішньої енергії системи ΔU дорівнює сумі наданої їй кількості теплоти Q і роботи A' , виконаної над системою зовнішніми силами:

$$\Delta U = Q + A'. \quad (35.1)$$

Це твердження прийнято називати *першим законом (началом) термодинаміки*. У формулі під A' розуміють роботу, яка виконується над системою зовнішніми силами (її вважають додатною величиною). Але можна розглядати і роботу A , виконану системою над зовнішніми тілами. Тоді її записують з від'ємним знаком, і рівняння (35.1) набуває вигляду:

$$\Delta U = Q - A, \text{ або } Q = \Delta U + A. \quad (35.2)$$

Останнє співвідношення є іншою формою запису першого закону термодинаміки. Воно показує, що підведена до системи кількість **теплоти** Q частково **йде на** збільшення її внутрішньої енергії ΔU і частково **на** виконання системою роботи A над зовнішніми тілами.

Суть першого закону термодинаміки полягає в тому, що внутрішня енергія тіла, яке взаємодіє з іншими тілами, змінюється за рахунок двох процесів — теплообміну і роботи зовнішніх сил чи роботи над зовнішніми тілами. Будь-яке збільшення внутрішньої енергії тіла обов'язково супровод-

жується зменшенням в рівній кількісній мірі енергії взаємодіючих з ним тіл, а зменшення внутрішньої енергії тіла — відповідним збільшенням енергії взаємодіючих з ним тіл. Внутрішня енергія системи, ізольованої від будь-яких взаємодій із зовнішнім середовищем, не змінюється за будь-яких взаємодій всередині системи.

Історично встановлення цього закону було пов'язане з невдачами щодо створення машини, яка б нескінченно довго виконувала роботу без надходження теплоти ззовні. В термодинаміці таку машину називають «вічним» двигуном першого роду.

Якщо до системи не надходить теплота ($Q = 0$), то робота A згідно з (35.2) може виконуватися лише за рахунок зменшення внутрішньої енергії: $A = -\Delta U$. Після того як запас внутрішньої енергії буде вичерпано, двигун припинить свою роботу. Отже, неможливо побудувати «вічний» двигун першого роду, оскільки неможливо нескінченно довго виконувати роботу за рахунок скінченного значення внутрішньої енергії якоїсь системи (машини).

Будь-яка машина може виконувати роботу над зовнішніми тілами лише за рахунок одержання ззовні певної кількості теплоти або зменшення її внутрішньої енергії.

Нагрівачи тіло за рахунок теплопередачі, ми збільшуємо його внутрішню енергію. Внаслідок його розширення під час нагрівання згідно з першим законом термодинаміки виконується робота проти сил, які перешкоджають розширенню (такими силами є сили зовнішнього тиску і сили притягання між молекулами речовини). На виконання цієї роботи потрібна додаткова кількість теплоти.

У випадку твердих тіл і рідин теплове розширення завжди мізерно мале, на нього йде незначна додаткова енергія, якою можна знехтувати. Тому згідно з першим законом термодинаміки під час нагрівання твердих тіл і рідин за рахунок теплопередачі без виконання роботи вся кількість теплоти витрачається лише на зміну їх внутрішньої енергії.

У випадку газів роботою, яка виконується газом під час розширення, нехтувати не можна.

? 1. Сформулюйте перший закон термодинаміки і запишіть його в математичному вигляді. 2. Яку машину називають «вічним» двигуном першого роду? Чому неможливий такий двигун?

§ 36. Робота під час розширення газу

У сучасному виробництві широко розповсюджені теплові двигуни, в яких внутрішня енергія перетворюється в механічну. Процес її перетворення здійснюється за допомогою розширення пари чи газу. Нагріті до високої температури і стиснуті пара чи газ мають значний запас енергії, яку передають частково під час розширення поршню двигуна або лопаткам турбіни. Інший принцип покладено в будову реактивних двигунів, де внаслідок витікання газу в один бік створюється реакція віддачі у протилежний. Але в усіх випадках робота виконується в результаті розширення газу.

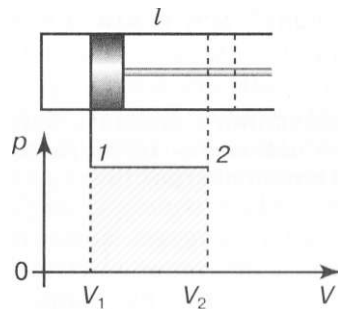
Щоб зрозуміти принцип дії теплових двигунів, необхідно розглянути умови, за яких газ може виконувати роботу.

Припустимо, що газ нагрівається ізобарно (за сталого тиску; $p = \text{const}$) і певна його маса знаходиться в циліндрі з рухомих поршнем, який може без тертя переміщатися вздовж осі циліндра (мал. 67). Початкова температура T_1 газу дорівнює температурі навколишнього середовища; поршень перебуває в спокої, якщо тиск на нього зсередини і ззовні однаковий, наприклад дорівнює атмосферному. У результаті нагрівання газ розширюватиметься. Енергія, яка підводиться в цьому випадку, витратиться частково на нагрівання газу, частково на виконання ним роботи.

Нехай під час підвищення температури газу до T_2 поршень переміститься на відстань l . Отже, газ, розширюючись і переміщуючи поршень, виконав тим самим роботу проти зовнішніх сил. Оскільки тиск залишався сталим, то діюча на поршень сила дорівнює: $P = p\delta$, де δ — площа поршня. Таким чином, виконана газом робота: $A = p\delta l$. Але δl — приріст об'єму газу $V_2 - V_1$. Отже,

$$A = p(V_2 - V_1), \quad (36.1)$$

тобто робота, виконана газом за ізобарного розширення проти зовнішніх сил, дорівнює добуткові тиску газу на приріст його об'єму.



Мал. 93 номанітних електричних полях. Це

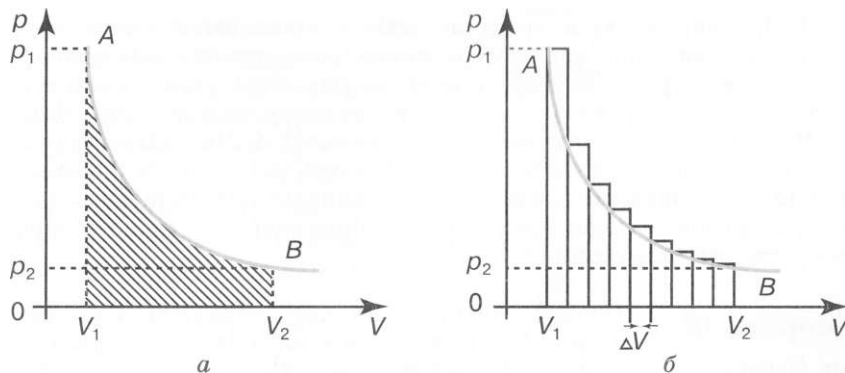
Під час розширення газ виконує додатну роботу, оскільки напрям сили і напрям переміщення поршня збігаються. Розширюючись, газ передає енергію навколишнім тілам. Якщо газ стискується, то формула (36.1) для роботи газу правильна. Але тепер $V_2 < V_1$ і тому $A < 0$.

Скориставшись графічним зображенням ізобарного процесу в системі координат p, V (див. мал. 67), ми побачимо, що робота газу дорівнює площі прямокутника висотою p і основою $V_2 - V_1$. Якщо газ ізобарно стискається, в цьому випадку роботу виконують над ним зовнішні сили, збільшуючи його потенціальну енергію. Графічно ця робота виражається тією самою площею.

Під час зміни об'єму часто змінюється і його тиск. Як у цьому випадку знайти роботу? Для обчислення роботи скористаємося графічним методом. Можна показати, що при будь-якому процесі виконана газом робота чисельно дорівнює площі, обмеженій графіком цього процесу в системі координат p, V , віссю абсцис і двома ординатами. Графічний спосіб визначення роботи газу широко застосовують у теплотехніці під час конструювання теплових двигунів і тому доцільно ознайомитися з його застосуванням для ізотермічного процесу. (У випадку ізохорного процесу $V = \text{const}$ і газ роботи не виконує.)

Графік ізотермічного процесу ($T = \text{const}$) в системі координат p, V зображається рівнобічною гіперболою AB (мал. 68, а).

Робота газу, який розширюється ізотермічно, чисельно дорівнює площі фігури, обмеженої графіком залежності p від V , віссю V і ординатами, що відповідають тискам p_1 і p_2 в початковому і кінцевому станах газу. Це твердження можна легко довести, якщо розбити площу криволінійної фігури, обмеженої гіперболою, вертикальними лініями на ряд вузьких ділянок (мал. 68, б). За дуже малої зміни об'єму ΔV можна припустити, що тиск на кожній окремій ділянці сталий, або, інакше кажучи, що він змінюється в ході процесу стрибками під час переходу від однієї ділянки до другої. Тому робота розширення газу на AV зобразиться площею вузького



Мал. 68

прямокутника. Робота розширення газу на $V_2 - V_1$ дорівнюватиме приблизно площі одержаної «ступінчастої» фігури, яку можна обчислити, додаючи площі окремих прямокутних ділянок. Природно, що знайдена в такий спосіб площа буде трохи більшою за площу, обмежену гіперболою, але якщо розбити графік на більшу кількість вузьких ділянок, то спад тиску меншими стрибками наблизитиметься до дійсного безперервного спаду тиску. Отже, в граничному випадку (коли ширина ділянки ΔV прямує до нуля) графік ізотермічного процесу визначатиме роботу розширення газу.

Аналогічно, користуючись таким прийомом, можна наближено обчислити роботу розширення газу для будь-якого процесу.

Задача 1. Газ, який займає об'єм $V = 11$ л під тиском 10^5 Па, нагріти ізобарно від 20 до 100 °С. Визначити роботу розширення газу.

Розв'язання. Робота розширення газу $A = p(V_2 - V_1)$. Оскільки газ нагрівався ізобарно, то $V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1}$ тоді

$$A = pV_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) ; A \approx 300 \text{ Дж.}$$

Задача 2. Молекулярний водень, маса якого $6,5$ г і температура 27 °С, нагрівають за сталого тиску так, що його об'єм збільшився вдвічі. Знайти роботу, виконану газом під час розширення. Молярна маса водню $2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Розв'язання. Робота розширення газу $A = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$. Газ нагрівався ізобарно, і його об'єм збільшився вдвічі, тобто $pV_1 = pV_2$. Об'єм газу знайдемо з рівняння Клапейрона $pV = \nu RT$, звідси $V = \frac{\nu R T}{p}$. Тоді

$$A = \nu R (T_2 - T_1) = 8,1 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

? 1. Як виражається графічно робота, виконувана газом проти зовнішніх сил під час ізотермічного розширення; ізотермічного стискання газу зовнішніми силами? 2. Внаслідок розширення стиснутого повітря у вакуумі його температура знижується. Чому? 3. Чому газ під час стискання нагрівається? 4. Чим відрізняються роботи, виконані під час розширення і стискання газу? 5. В циліндрі під поршнем знаходиться газ. В якому випадку для нагрівання цього газу до певної температури потрібно менше енергії — якщо поршень закріплений чи рухомий?

Вправа 13 Початковий стан газу характеризується параметрами p_1 і V_1 . За якого розширення — ізотермічного чи ізобарного — до об'єму V_2 газ виконає більшу роботу?
2. 1 м^3 повітря за температури 0 °С знаходиться в циліндрі під

тиском $2 \cdot 10^5$ Па. Обчисліть роботу, яка виконується під час його ізобарного нагрівання на 10 С.

3. Пневматичний молот працює за рахунок енергії стиснутого повітря. Чому в процесі роботи молота спостерігається його обмерзання? Поясніть причину охолодження.

4. За допомогою поршня стискають 1 моль ідеального газу і одночасно охолоджують, так що тиск залишається постійним. Чому дорівнює робота, виконана зовнішньою силою під час стискання, якщо початкові значення об'єму і температури відповідно дорівнюють $V_1 = 20 \text{ дм}^3$, $T_1 = 310 \text{ К}$, а кінцевий об'єм газу дорівнює $V_2 = 5 \text{ дм}^3$?

5. Визначте роботу, виконану у разі ізобарного розширення азоту $m = 56 \text{ г}$, якщо його початкова температура була 0 С, а об'єм зріс у три рази. Молярна маса азоту $M = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

§ 37. Застосування першого закону термодинаміки до ідеального газу. Адіабатний процес

Розглянемо застосування першого закону термодинаміки до описаних вище процесів зміни стану ідеального газу.

Ізохорний процес. Нехай ідеальний газ міститься в циліндрі із закріпленим поршнем (мал. 69, а). Надамо газові певну кількість теплоти. Оскільки в цьому випадку його об'єм залишається сталим ($V_2 - V_1 = 0$; мал. 69, б), робота розширення дорівнює нулеві і формула першого закону термодинаміки набуває вигляду:

$$A = A_{12}. \quad (37.1)$$

Якщо газ нагрівається, то $A > 0$ і $A_{12} > 0$ — внутрішня енергія газу зростає. Під час охолодження газу його внутрішня енергія зменшується.

Таким чином, у разі **ізохорної зміни стану газу вся кількість підведена до нього теплоти йде на зміну внутрішньої енергії газу.**

Ізотермічний процес. Помістимо газ у циліндрі з легкорухомим поршнем в термостат (мал. 70, а), в якому підтримується стала температура. Надамо газові можливість розширятися, але щоб його температура не знизилася, він повинен дістати від термостата кількість теплоти. Оскільки внутрішня енергія ідеального газу не залежить від об'єму, то у разі ізотермічної зміни стану його внут-

$$= \int_{V_1}^{V_2} P \, dV$$

$$0 \quad T_1$$

Мал. 69

рішня енергія залишається незмінною ($\Delta U = 0$), і рівняння першого закону термодинаміки записується так:

$$Q = A. \quad (37.2)$$

З цього виразу випливає, що під час ізотермічного процесу вся підведена до газу кількість теплоти витрачається на виконання газом роботи. У процесі ізотермічного розширення ідеальний газ виконує роботу проти зовнішніх сил за рахунок набутої кількості теплоти; під час ізотермічного стиснення зовнішні сили виконують роботу, а газ віддає навколишньому середовищу еквівалентну кількість теплоти.

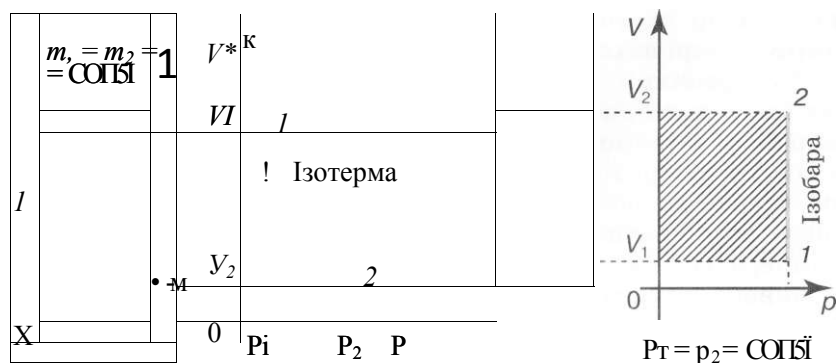
Нагадаємо, що робота газу під час ізотермічного процесу чисельно дорівнює площі (мал. 70, б), обмеженій ізотермою і вертикальними прямими для початкового p_1 і кінцевого p_2 станів газу.

Ізобарний процес. Для цього нагріватимемо газ у циліндрі з поршнем, який вільно переміщається у ньому (мал. 71, а). Надана газу кількість теплоти частково переходить у внутрішню енергію системи, а частково витрачається на виконання роботи — підняття поршня:

$$Q = \Delta U + A. \quad (37.3)$$

У разі ізобарного розширення кількість підведеної до газу теплоти більша за виконану ним роботу на величину, яка дорівнює зростанню його внутрішньої енергії. Робота газу під час ізобарного процесу чисельно дорівнює площі прямокутника (мал. 71, б), обмеженого ізобарою, віссю об'ємів та ізохорами, які відповідають початковому V_1 і кінцевому V_2 станам газу.

Адіабатний процес. Вам, напевне, доводилося накачувати насосом велосипедну шину або волейбольний м'яч і ви спостерігали, що насос при цьому сильно нагрівається. Таке підвищення температури відбувається не внаслідок тертя поршня об



Мал. 93

номанітних електричних полях. Це

○ стінки насоса, яке дуже мале, а завдяки нагріванню повітря від стискання. Явище нагрівання газу при його швидкому стисканні можна спостерігати на досліді з приладом «Повітряне кресало» (мал. 72). На дно товстостінного скляного циліндра з поршнем кладуть невеликий шматок піроксилінової вати або вати, змоченої ефіром, і швидко натискають на поршень. Вата спалахує. Причина її загоряння — різке підвищення температури повітря під час швидкого стискання його поршнем.

// //

// //

// >A

//

II // * II

Мал. 72

Отже, у разі стискання газу його внутрішня енергія зростає за рахунок роботи зовнішньої сили, яка виконує стискання. При розширенні ж газу без підведення до нього енергії ззовні його внутрішня енергія зменшується. Це можна виявити на такому досліді. У велику скляну посудину (мал. 73) наливають трохи води, вводять дим і накачують повітря. При цьому вода з посудини зникає (випаровується), що свідчить про підвищення температури повітря в посудині. Коли тиск у посудині стане достатньо великим, корок викидається, повітря, швидко розширюючись, виходить з неї, внаслідок чого утворюється густий туман, що свідчить про охолодження повітря під час розширення. Розширюючись, газ виконує роботу з переміщення частинок за рахунок зменшення внутрішньої енергії.

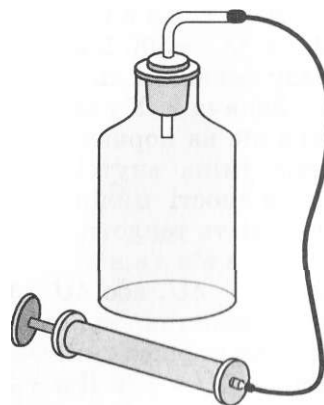
У розглянутих прикладах теплообміном між газом і навколишнім середовищем можна знехтувати, оскільки зміна його стану відбувається дуже швидко.

Отже, під час стискання газу без теплообміну з навколишнім середовищем його внутрішня енергія збільшується, під час розширення — зменшується. Цей висновок випливає з першого закону термодинаміки: $Y = AII + A$.

Оскільки теплообмін відсутній, $Y = 0$ і, отже,

$$AII = -A. \quad (37.4)$$

Це означає, що у разі розширення газу виконується додатна робота за рахунок внутрішньої енергії і це приводить до охолодження газу. Під час стискання газу



Мал. 73

виконується від'ємна робота, внутрішня енергія газу зростає, він нагрівається.

Процес зміни стану газу, який відбувається без теплообміну з навколишніми тілами, називають адіабатним.

Повністю усунути теплообмін газу з навколишніми тілами неможливо, оскільки в природі не існує речовин, зовсім позбавлених теплопровідності. Але можна стиснути чи розширити газ так, щоб теплообмін був незначним і ним можна було знехтувати. Тому за малий інтервал часу можна вважати $Y = 0$ і розглядати ці процеси як адіабатні.

Нагрівання повітря від швидкого стискання використовується в дизельних двигунах для запалювання пальної суміші. В циліндри цих двигунів засмоктується атмосферне повітря (а не пальна суміш, як у двигунах внутрішнього згорання). Від швидкого стискання температура повітря підвищується і до кінця стискання перевищує температуру запалювання пального. В цей момент у циліндр за допомогою спеціальної форсунки вприскують пальне, яке дрібно розпилюється; під час зіткнення з розжареним повітрям воно загоряється.

Коли працюють потужні компресори, які стискають повітря, температура повітря настільки підвищується, що доводиться вдаватися до спеціальної системи охолодження циліндрів.

Охолодження газу під час адіабатного розширення відбувається у величезних масштабах в атмосфері Землі. Нагріте повітря піднімається вгору і розширюється, оскільки атмосферний тиск зменшується з висотою. Це розширення супроводжується значним охолодженням. У результаті пара конденсується і утворюються хмари.

Задача 1. Під час адіабатного розширення газ виконав роботу $A = 500$ Дж. Чому дорівнює зміна його внутрішньої енергії? Як змінилась температура газу?

Розв'язання. В адіабатному процесі $A = -\Delta U$. Отже, $\Delta U = -A = -500$ Дж. Знак мінус означає, що внутрішня енергія газу зменшилась. Отже, температура газу знизилась.

Задача 2. У разі стискання газу в циліндрі зовнішня сила, яка діє на поршень, виконує роботу $A = 300$ Дж. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії газу, якщо завдяки теплопровідності циліндра він віддає в навколишнє середовище кількість теплоти, рівну $Y = 20$ Дж?

Розв'язання. Згідно з першим законом термодинаміки $Y = A + \Delta U$, або $\Delta U = Y - A$. Оскільки газ віддає теплоту, то Y — величина від'ємна: $Y = -20$ Дж. Робота сили, з якою газ діє на поршень під час стискання, від'ємна: $A = -300$ Дж. Отже, $\Delta U = -20$ Дж + 300 Дж = 280 Дж.

Застосування першого закону термодинаміки до процесів зміни стану ідеального газу узагальнено в таблиці 5.

Таблиця 5

Застосування першого закону термодинаміки до процесів зміни стану ідеального газу

Процес зміни стану газу	Одержана кількість теплоти, Q	Виконана робота, A	Зміна внутрішньої енергії, ΔU	Запис першого закону термодинаміки	Формулювання першого закону термодинаміки
Ізохорне нагрівання, $V = \text{const}$	$Q > 0$	$A = 0$	$\Delta U > 0$	$Q = \Delta U$	Уся підведена до газу кількість теплоти перетворюється у його внутрішню енергію
Ізотермічне розширення, $T = \text{const}$	$Q > 0$	$A > 0$	$\Delta U = 0$	$Q = A$	Уся передана газу кількість теплоти витрачається на виконання ним же роботи
Ізобарне розширення, $p = \text{const}$	$Q > 0$	$A > 0$	$\Delta U > 0$	$Q = \Delta U + A$	Підведена до газу кількість теплоти йде на зміну його внутрішньої енергії і виконання роботи
Адiabатне розширення	$Q = 0$	$A > 0$	$\Delta U < 0$	$A = -\Delta U$	Під час розширення газу виконується робота за рахунок його внутрішньої енергії

І 1. Чи виконується газом робота у процесі ізохорної зміни його стану? 2. Газ стискається ізотермічно. Чи змінюється при цьому його внутрішня енергія? Чому? 3. Запишіть рівняння першого закону термодинаміки для ізобарного процесу. 4. За рахунок якої енергії виконується робота під час адіабатного розширення газу?

В а ва 1. Іноді газ під час охолодження віддає меншу кількість теплоти, ніж було затрачено на його нагрівання. Чи не суперечить це законові збереження енергії?
 " 2. Чи можна передати тілу якусь кількість теплоти, не спричиняючи при цьому підвищення його температури?
 3. Як змінюватиметься температура газу, вміщеного в теплоізоляційний циліндр, у разі поступового збільшення об'єму циліндра?
 4. Газові, який знаходиться в циліндрі з рухомих поршнем, під час його нагрівання була передана кількість теплоти ($q = 100$ Дж). При цьому газ, розширюючись, виконав роботу $A = 700$ Дж. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії газу?
 5. Одноатомний газ кількістю $\nu = 2$ моль знаходиться в циліндрі з рухомих поршнем під атмосферним тиском. У процесі нагрівання температура підвищилась від $t_1 = 20$ °С до $t_2 = 70$ °С, а об'єм зріс на $\Delta V = 40$ л. Яку кількість теплоти було надано газу?
 6. Гелій масою $m = 40$ г в ізобарному процесі виконав роботу $A = 8$ кДж. Визначте зміну температури гелію в цьому процесі. Молярна маса гелію дорівнює $M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

§ 38- Необоротність теплових процесів

Перший закон термодинаміки, який є по суті законом збереження і перетворення енергії в застосуванні до теплових процесів, дає змогу описати будь-який процес, в ході якого відбувається перетворення різних видів енергії у внутрішню. Проте цей закон не дає відповіді на запитання, які енергетичні перетворення можливі і в якому напрямі мають розвиватися.

З точки зору першого закону термодинаміки будь-який процес можливий, якщо кількість теплоти залишається незмінною. Пояснимо це на прикладах.

Припустимо, що у калориметр з холодною водою помістили гаряче тіло. Коли б при цьому холодна вода охолонула ще більше і виділила певну кількість теплоти, а гаряче тіло дістало б цю кількість теплоти і ще більше нагрілося, таке явище не суперечило б першому закону термодинаміки: баланс енергії був би забезпечений. Але такого процесу в природі не існує. Процеси теплообміну між тілами, залишеними самими по собі, завжди відбуваються так, що гарячі тіла охолоджуються, передаючи енергію холоднішим, температура яких підвищується. Цей процес відбувається доти, поки температури тіл не зрівняються — в системі тіл встановиться теплова рівновага. Передавати теплоту в зворотному напрямі

мі — від холодних тіл до гарячих — можна лише штучно, виконуючи роботу (наприклад, як в холодильних машинах). Так само газ, який розширився і зайняв весь об'єм певної посудини, ніколи не збереться самовільно в одній з її частин. Щоб стиснути газ до попереднього об'єму, треба виконати над ним роботу. При цьому в оточуючих тілах стануться зміни: тіло, яке стискає газ, виконує роботу, віддаючи певну енергію іншому тілу.

Ще один приклад. Під час падіння каменя з деякої висоти вся кінетична енергія перетворюється у внутрішню енергію самого каменя і оточуючих його тіл, так що закон збереження енергії не порушується. Однак першому закону термодинаміки не суперечить і зворотний процес, при якому до лежачого на землі каменя передалась би від оточуючих тіл теплота, в результаті чого камінь піднявся б на попередню висоту. Але ніхто ніколи не спостерігав, щоб камені самі по собі підстрибували.

Подібних прикладів можна навести багато. Всі вони свідчать про те, що перший закон термодинаміки не накладає жодних обмежень на напрям перетворення енергії з одного виду в інший, вимагаючи лише збереження повного запасу енергії в замкнених системах. Між тим досвід показує, що різні види енергії неоднаково здатні перетворюватися в інші види. Механічну енергію можна повністю перетворити у внутрішню енергію будь-якого тіла незалежно від того, яка була його температура. Дійсно, будь-яке тіло можна нагріти тертям, збільшивши його внутрішню енергію на величину, що дорівнює виконаній роботі. Але для зворотних перетворень внутрішньої енергії в інші види існують певні обмеження, які полягають у тому, що запас внутрішньої енергії за жодних умов не може повністю перетворитися в інші види енергії. З цими особливостями енергетичних перетворень пов'язаний напрям перебігу процесів у природі.

Передача теплоти від гарячого тіла до холодного, перетворення механічної енергії у внутрішню, розширення газу у вакуумі — все це приклади найтипівіших необоротних процесів. Процес **називають оборотним, якщо можливе повернення системи в початковий стан без будь-яких змін у навколишньому середовищі**. Якщо таке повернення здійснити не можна, тобто після закінчення процесу в навколишніх тілах чи в даній системі залишилися якісь зміни, процес є необоротним.

Необоротними є всі розглянуті вище процеси в ідеальному газі: ізотермічний, ізохорний, ізобарний і адіабатний. Наприклад, у разі ізотермічного стискання газу частина теплоти через стінки циліндра передається навколишньому середови-

шу, і вона вже ніколи не повернеться до газу і не перетвориться в механічну енергію поршня.

Усі процеси в природі супроводжуються теплопровідністю та тертям і тому необоротні. Поняття про оборотні процеси так само необхідне в термодинаміці, як у механіці поняття про матеріальну точку, абсолютно тверде тіло, рух без тертя, а в молекулярній фізиці ідеальний газ.

Положення про необоротність природних процесів становить одне із загальних формулювань *другого закону термодинаміки*. Цей закон, як і будь-який фундаментальний закон, є узагальненням великої кількості дослідних фактів. Він не має теоретичного виведення і тому приймається за постулат.

Існує багато різних формулювань другого закону термодинаміки, які, відрізняючись за формою, збігаються за суттю. Фізичний зміст цього закону найчіткіше розкривається в такому формулюванні: **теплота не може переходити сама по собі від тіла менш нагрітого до тіла більш нагрітого**. Слід звернути увагу на те, що йдеться не взагалі про всі процеси з переходом теплоти від холодного тіла до гарячого, а лише про ті, в яких такий перехід є єдиним кінцевим результатом процесу.

Другий закон термодинаміки накладає обмеження на перетворення внутрішньої енергії в механічну. З формулювання цього закону випливає, що не можна побудувати машину, яка б виконувала роботу лише за рахунок одержання теплоти з навколишнього середовища. Така гіпотетична машина дістала назву «вічного» двигуна другого роду, оскільки внаслідок необмеженості запасів внутрішньої енергії в землі, океані, атмосфері така машина була б для всіх практичних цілей еквівалентною «вічному» двигунові. За рахунок одного лише запасу внутрішньої енергії, яка міститься у воді морів і океанів, можна було б приводити в рух машини всіх фабрик і заводів протягом багатьох тисячоліть. Причому за перші 1700 років такого використання внутрішньої енергії температура води в океані знизилася б у середньому лише на одну соту градуса. Однак другий закон термодинаміки не дає такої блискучої можливості. Тому його часто формулюють так: **вічний двигун другого роду неможливий**.

Таким чином, якщо перший закон термодинаміки заперечує можливість існування машини, за допомогою якої можна було б виробляти енергію з нічого, то другий закон заперечує можливість створення машини, здатної виконувати роботу лише за рахунок охолодження одного тіла.

? 1. В одній половині посудини, розділеній перегородкою, міститься ідеальний газ, а в другій — створено вакуум. Що станеться з газом,

якщо перегородку забрати? Чи повернеться газ самовільно через певний час в одну половину посудини? 2. За яких умов коливання маятника можна вважати оборотним процесом?

§ 39. Принцип дії теплової машини

Ми знаємо, що в результаті виконання над газом роботи або передачі йому певної кількості теплоти можна збільшити його внутрішню енергію і, навпаки, за рахунок внутрішньої енергії газу може бути виконана механічна робота. Внутрішня енергія є одним з найдешевших видів енергії. Її можна дістати, спалюючи різні види палива, використовуючи енергію сонячних променів тощо. Разом з тим, на виробництві, транспорті для роботи різних механізмів потрібна механічна енергія. Тому перетворення внутрішньої енергії в механічну є надзвичайно важливим для практичної діяльності людини. Таке перетворення здійснюється за допомогою **теплових машин**.

З курсу фізики 8-го класу вам відомо, що кожна тепла машина має нагрівник, робоче тіло, яке внаслідок нагрівання виконує роботу (приводить в обертання вал турбіни, рухає поршень тощо), і холодильник.

Як робоче тіло використовується газ (пара). Якщо він знаходиться в циліндрі з рухомим поршнем, то під час його розширення виконується робота, і внутрішня енергія газу (в основному — це кінетична енергія його молекул) частково перетворюється в механічну енергію поршня. Розширення газу може відбуватися ізотермічно чи адіабатно. Щоб у процесі ізотермічного розширення температура залишалася сталою, газу слід передавати кількість теплоти, яка дорівнює зміні його внутрішньої енергії протягом процесу і виконаній поршнем роботі. Під час адіабатного розширення виконана рухомим поршнем робота дорівнює зменшенню внутрішньої енергії газу.

Оскільки циліндр має обмежені розміри, за один хід поршня можна перетворити в механічну енергію також обмежену кількість теплоти. Для того щоб газ міг виконувати роботу і далі, його треба повернути у вихідний стан, тобто надати йому певну кількість теплоти для повернення в початковий стан з більшою внутрішньою енергією. Таку **сукупність змін стану газу, в результаті яких він повертається у вихідний стан, називають круговим процесом, або циклом**.

За яких змін стану можна дістати цикл? Очевидно, якщо здійснити спочатку розширення газу в якомусь процесі, а потім його стиснути в цьому ж процесі, то не буде виконано корисної роботи, оскільки додатна робота розширення газу

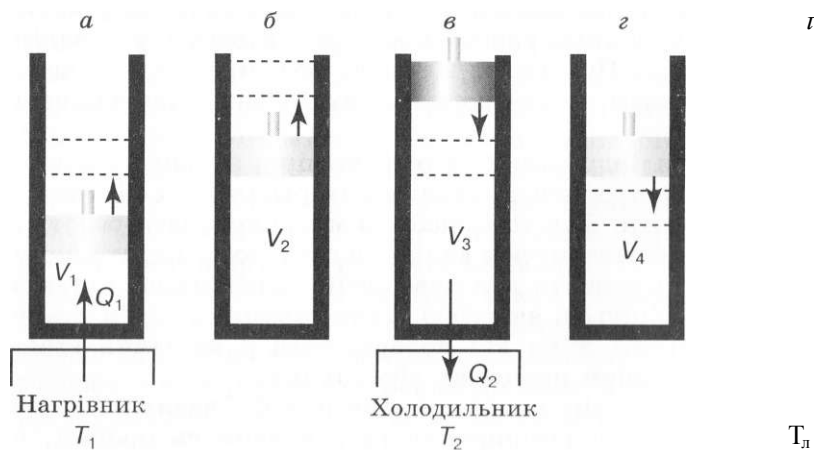


НИКОЛА ЛЕОНАРД САДІ
КАРНО
(1796—1832)

Французький фізик та інженер. Довів, що корисну роботу можна дістати лише у випадку, коли теплота переходить від нагрітого тіла до холоднішого, і що лише різниця температур нагрівника і холодильника зумовлює ККД теплової машини, а природа робочого тіла не має ніякого значення (теорема Карно).

дорівнює від'ємній роботі стискання. Щоб дістати в результаті здійснення циклу корисну роботу, треба використати різні процеси: розширення газу за високих тиску та температури і стискання його за нижчих тиску й температури. Французький фізик Саді Карно у 1824 р. показав, що вигіднішим є цикл, який складається з двох процесів — ізотермічного й адіабатного.

Нехай ідеальний газ об'ємом U_x міститься в закритому циліндрі з поршнем під тиском p_x . Поставимо циліндр на нагрівник, температура якого T_2 підтримується сталою (мал.74, а). Під час ізотермічного (дуже повільного) розширення газу до об'єму V_2 і тиску p_2 він виконує роботу A_1 за рахунок кількості



Мал. 74

теплоти одержаної від нагрівника. На графіку в системі координат p, V процес зображується ізотермою 1—2 (мал. 75).

Припустимо, що ми теплоізолювали циліндр і надали газіві змогу розширитися адіабатно від стану з об'ємом V_2 і тиском p_2 до стану з об'ємом V_3 і тиском p_3 (див. мал. 74, б). Газ виконує додатну роботу розширення L_2 за рахунок внутрішньої енергії. При цьому температура його знижується від T_x до T_2 . Цьому процесу на малюнку 75 відповідає адіабата 2—3.

Далі приведемо циліндр у контакт із холодильником, температура якого T_2 підтримується сталою. Стискатимемо газ ізотермічно від стану з об'ємом V_3 і тиском p_3 до стану з об'ємом V_4 і тиском p_4 (див. мал. 74, в). Стан V_4, p_4 підбираємо так, щоб подальше адіабатне стискання при досягненні температури T_x привело газ до об'єму V_1 інакше цикл не замкнеться. (Зовнішні сили виконують у даному випадку від'ємну роботу на стискання газу ($\sim A_3$), і, щоб температура газу не змінилася, він має віддати холодильнику еквівалентну кількість теплоти: $Q_2 = A_3$.) Цей процес зображено на малюнку 75 ізотермою 3—4.

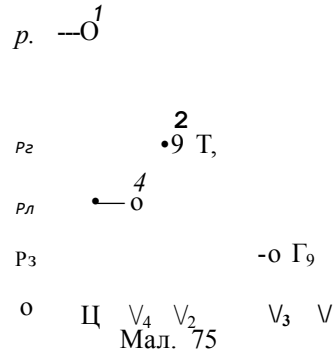
Нарешті, знову теплоізолюємо циліндр (див. мал. 74, г) і адіабатним стисканням повернемо газ у вихідний стан (див. мал. 74, г). На графіку цьому процесу відповідає адіабата 4—1.

Від стискання газу відбуваються збільшення його внутрішньої енергії і підвищення температури до T_x .

У результаті здійснено один цикл в роботі ідеальної теплової машини. Цей цикл, що складається з двох ізотермічних і двох адіабатних процесів, дістав назву *циклу Карно*. Під час розширення робоче тіло виконує роботу, а в результаті стискання роботу над ним виконують зовнішні сили. Після кожного циклу робоче тіло повертається у вихідний стан.

З графіка (мал. 75) видно, що в результаті даного циклу робоче тіло виконує корисну роботу, яка чисельно дорівнює площі, описаній циклом, тобто площі 12341 . Справді, робота розширення газу чисельно дорівнює площі $123V_3V_1$, а робота на стискання газу чисельно дорівнює площі $143V^{\wedge}V_x1$. Різниця цих робіт дорівнює площі, обмеженій циклом.

Закон збереження й перетворення енергії для циклу Карно



Нагрівник	Кількість	полягає в тому, що енергія, одержана робочим тілом від навколишнього середовища, дорівнює енергії, переданій ним навколишньому середовищу. Навколишнім середовищем передано кількість теплоти під час розширення робочого тіла і виконано роботу $A_3 + A_4$ на стискання (мал. 76). Робоче тіло виконало роботу $A_2 + A_2$ ПД час розширення і передало кількість теплоти Q_2 під час стискання.
Робоче	теплоти Q_1	
Холодильник	Кількість	Мал. 76
$T_2 < T_1$	теплоти Q_2	

Отже, $(Q_1 + A_3 + A_4 = Q_2 + A_1 + A_2)$ або, враховуючи, що $A_3 = A_4$,

$$A_1 - A_2 = Q_1 - Q_2 \quad (39.1)$$

різниця робіт $A_1 - A_2$ є корисною роботою, яку виконує робоче тіло в результаті даного циклічного процесу. Вона дорівнює різниці кількостей теплоти, підведеної під час розширення газу і відведеної під час його стискання.

Для характеристики ефективності циклу перетворення внутрішньої енергії в механічну, а значить, і теплової машини, вводиться коефіцієнт корисної дії (ККД) циклу, або машини. Він дорівнює відношенню роботи $A_1 - A_2$, яка використовується в даному циклі, до роботи A_2 , яку можна було б дістати внаслідок повного перетворення в неї всієї кількості теплоти Q_1 , підведеної до газу:

$$\eta = \frac{A_1 - A_2}{Q_1} \quad (39.2)$$

або, враховуючи попередню рівність, маємо:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (39.3)$$

За умови ідеального процесу перетворення внутрішньої енергії в механічну найвищий тепловий ККД був би

$$\eta_{max} \quad (39.4)$$

де T_1 — максимальна температура робочого тіла (газу, пари), T_2 — мінімальна температура, за якої робоче тіло віддає частину внутрішньої енергії холодильнику. Оскільки T_2 — температура холодильника або відпрацьованих продуктів горіння — не може дорівнювати абсолютному нулеві, то максимальний тепловий ККД машини не може дорівнювати одиниці (100 %).

Задача. Визначити ККД циклу Карно, якщо температури нагрівника й холодильника відповідно дорівнюють 200 і 15 °С. Наскільки треба підвищити температуру нагрівника, щоб ККД циклу зріс удвічі?

Розв'язання. Застосувавши формулу (39.4) для ККД циклу Карно, дістанемо:

$$\eta_1 = \frac{473\text{ К} - 288\text{ К}}{473\text{ К}}$$

Щоб мати ККД удвічі більший, тобто η_2 , температуру нагрівника треба підвищити на ΔT , тоді:

$$= \frac{(473 + \Delta T) - 288}{473 + \Delta T}$$

Отже, $\frac{473 + \Delta T - 288}{473 + \Delta T} = 0,78$, звідси $\Delta T = 836\text{ К}$.

З формули (39.4) випливає, що для збільшення ККД теплових машин необхідно прагнути до підвищення температури нагрівника і до зниження температури холодильника. Тому в сучасній техніці використовують пару високих параметрів (температури і тиску) або, що значно вигідніше, застосовують газові двигуни внутрішнього згоряння і газові турбіни, в яких можуть бути досягнуті ще вищі температури.

Однак максимальна температура нагрівника T_x навіть теоретично не може перевищувати температуру плавлення матеріалів, з яких виготовлено двигун. Тому збільшити ККД двигуна за рахунок підвищення T_x можна лише у певних межах. Так само не можна його збільшити за рахунок зниження температури холодильника T_2 , оскільки практично не має сенсу добиватися температури T_2 , нижчої за температуру навколишнього повітря. Отже, щоб збільшити ККД теплових двигунів, шукають способи підвищити жаростійкість і жароміцність матеріалів для виготовлення двигунів.

Однак, крім температури нагрівника й холодильника, істотне значення у підвищенні ККД теплової машини мають й інші фактори, наприклад, зниження втрат енергії на подолання тертя в деталях машини, зменшення теплопередачі навколишньому повітрю тощо.

У таблиці 6 вказано кілька типів теплових машин, їх ККД і наближені значення температур нагрівника і холодильника. Як бачимо, ККД реальних машин значно нижчий, ніж максимально можливі їх теоретичні значення.

Підвищення ККД теплових машин має велике народногосподарське значення, оскільки вони широко використовуються у промисловості, на транспорті, а також для перетворення енергії палива в електричну енергію.

Характеристика деяких теплових машин

Теплова машина	Робоче тіло	Температура, К		Ль %	ККД машини, %
		нагрівника	холодильника		
Поршнева парова машина	Пара	480	300	37	7—15
Парова турбіна	Пара	850	380	55	20—25
Дизель	Продукти згоряння палива	2000—2100	380	82	30—39
Карбюраторний двигун	Продукти згоряння палива	2500	380	82	18—24

Ті самі складові частини необхідні для холодильної машини, в якій цикл проходить у зворотному напрямі. Принцип роботи цієї машини такий: розширення робочого тіла відбувається тоді, коли воно перебуває в контакті з холодоприймачем. Холодне тіло під час циклу охолоджується ще сильніше. Далі, щоб цикл став можливим, робоче тіло стискається і йому передається кількість теплоти, одержана від холодоприймача. Це виконується при контакті робочого тіла з нагрівником, який таким чином нагрівається ще більше.

? 1. Наведіть приклади з повсякденного життя, які ілюструють перетворення механічної енергії у внутрішню. 2. Що таке круговий процес, або цикл? 3. З яких процесів складається цикл Карно? 4. Чи можна здійснити цикл, за якого вся підведена до робочого тіла кількість теплоти перетворювалася б у механічну енергію? 5. Що таке ККД теплової машини? Які способи його підвищення?

В а в а 1. Ідеальний тепловий двигун дістає від нагрівника щосекунди кількість теплоти $3,6 \cdot 10^4$ Дж, і за той самий час віддає холодильнику $= 3,2 \cdot 10^4$ Дж. Який ККД двигуна?

2. Температура нагрівника $t_1 = 520$ С, а холодильника $t_2 = 20$ С. Яку роботу виконала машина, доставши від нагрівника кількість теплоти, яка дорівнює $U = 10^6$ Дж? Вважати машину ідеальною.

3. Теплосилова установка працює за циклом Карно. Визначте її ККД,

і сін

якщо температура нагрівника 600°C , а холодильника 15°C . 4. Чому неможливо побудувати тепловий двигун без холодильника? 5. Вода морів і океанів, повітря атмосфери має велетенську внутрішню енергію. Як її можна було б використати?

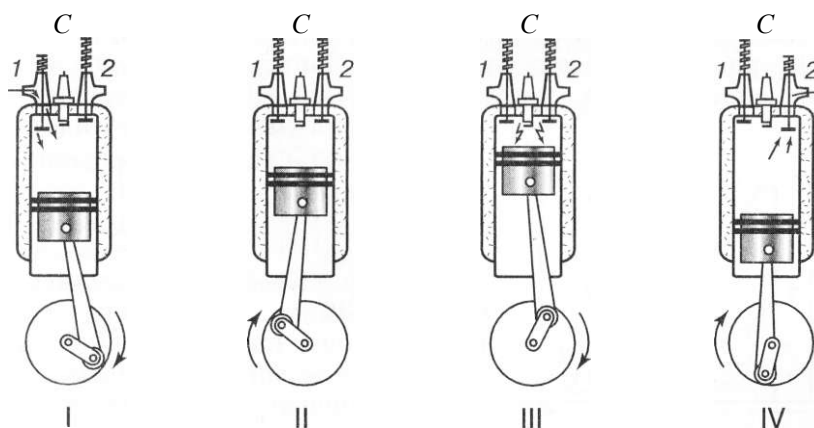
§ 40. Деякі теплові машини

Розглянемо роботу деяких теплових машин, які застосовуються в техніці.

Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ). Конструкція і принцип дії бензинового двигуна внутрішнього згоряння були вже розглянуті у 8-му класі. Повторимо цей матеріал і дещо доповнимо його.

Чотиритактний ДВЗ складається з одного чи кількох циліндрів. Розглянемо дію найпростішого одноциліндрового чотиритактного двигуна внутрішнього згоряння. Всередині кожного циліндра переміщається поршень (мал. 77), з'єднаний з кривошипно-шатунним механізмом, на колінчастий вал якого насаджено маховик. Розподільний пристрій у відповідні моменти відкриває і закриває клапани — впускний 1, через який в циліндр засмоктується пальна суміш, і випускний 2, з'єднаний з атмосферою. Для запалювання пальної суміші на електроди свічки С, вставленої в циліндр, подається висока напруга, і між ними проскакує іскра.

Нагадаємо принцип роботи чотиритактного двигуна. В першому такті в результаті руху поршня вниз відбувається всмоктування через відкритий впускний клапан пальної суміші, випускний клапан закритий. Здійснюючи зворотний рух, поршень у другому такті стискає (обидва клапани закриті) пальну суміш, яка при цьому нагрівається. Коли поршень



Мал. 93 номанітних електричних полях. Це

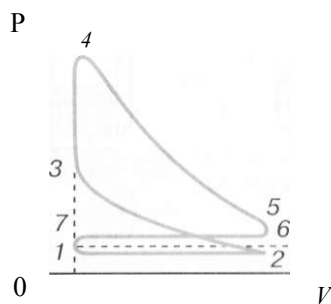
піднімається майже до крайнього верхнього положення, стиснута пальна суміш загоряється від електричної іскри. Розжарені гази — продукти згоряння пальної суміші — тиснуть на поршень і штовхають його вниз. Рух поршня передається шатуну, а через нього колінчастому валу з маховиком, і поршень виконує корисну роботу. Діставши сильний поштовх, маховик продовжує обертання за інерцією і переміщає з'єднаний з ним поршень під час наступних тактів. Таким чином, цей (третій) такт є єдиним робочим тактом із чотирьох. До моменту, коли поршень досягає крайнього нижнього положення, гази сильно охолоджуються під час розширення і тиск в циліндрі падає до $(2-3) \cdot 10^5$ Па. Обидва клапани протягом третього такту залишаються закритими. Нарешті, в четвертому такті поршень повертається в крайнє верхнє положення, виштовхуючи відпрацьовані гази через випускний клапан, який в цей час відкривається (впускний клапан закритий).

Графік (р, Т-діаграма) зміни стану газу в циліндрі двигуна подано на малюнку 78. Протягом першого такту (1—2) відкрито впускний клапан, йде з а с м о к т у в а н н я п а л ь н о ї с у м і ш і. Другий такт (2—3) — обидва клапани закриті, поршень стискає пальну суміш — с т и с к а н н я. В кінці стискання за допомогою електричної іскри запалюється пальна суміш, відбувається вибух — тиск стрибком (3—4) підвищується і починається третій такт (4—5) — р о б о ч и й х і д (клапани, як і раніше, закриті). У кінці його (точка 5) відкривається випускний клапан, тиск різко зменшується, і під тиском, трохи більшим за атмосферний, відпрацьовані гази виштовхуються в навколишнє середовище, відбувається четвертий такт (6—7) — в и х л о п. Цикл завершено, закривається випускний клапан, відкривається впускний, і починається новий цикл. Корисна робота за один цикл приблизно дорівнює площі фігури 2—3—4—5—6—2.

Широке розповсюдження таких двигунів зумовили мала маса, компактність, порівняно високий ККД (температура в циліндрі під час згоряння палива досягає 1500 С; отже, теоретичний ККД дорівнює:

$$\eta \approx \frac{1200 \text{ K}}{1500 \text{ K}} \quad 0,8, \text{ або } 80\%, \text{ а}$$

практично ККД цього двигуна близько 30%). ДВЗ цього типу будуть потужністю від 0,37 до 440 кВт. Але вони не позбавлені й істотних недоліків: працюють на дорогому високоякісному паливі, складні за конструкцією, мають



Мал. 78

дуже велику швидкість обертання вала двигуна, їх вихлопні гази забруднюють атмосферу тощо.

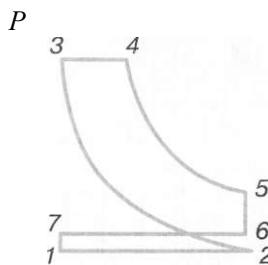
Економічнішим є чотиритактний дизельний двигун внутрішнього згоряння. Він працює на дешевих сортах рідкого палива і позбавлений більшості вказаних вище недоліків. Особливості його роботи такі. Під час ходу поршня вниз через впускний клапан в робочий циліндр засмоктується не пальна суміш, а атмосферне повітря. На p , V -діаграмі (мал. 79) цей такт зображений ізобарою 1—2. При дальшому обертанні маховика поршень під час зворотного руху вгору адіабатно стискає повітря в циліндрі (впускний клапан закритий) до тиску $\approx 1,2 \cdot 10^6$ Па, що веде до підвищення його температури в кінці цього такту (2—3) до 500—700 С. У стиснуте й розжарене повітря впорскується за допомогою паливного насоса і форсунки дизельне паливо; воно загоряється і горить значно довше за бензин. Гази, які утворюються при цьому, тиснуть на поршень і виконують корисну роботу протягом всього руху поршня вниз. Тиск газу під час розширення підтримується приблизно сталим (ізобара 3—4). Після закінчення горіння впорснutoї порції палива відбувається розширення газу (адіабата 4—5), і, нарешті, відкривається впускний клапан. Тиск падає відповідно ізохорі 5—6. За час зворотного руху поршень виштовхує (вихлоп) продукти згоряння в атмосферу (ізобара 6—7), і на цьому цикл завершується. Таким чином, на p , T -діаграмі робочий хід зображений ділянкою 3—4—5, а корисна робота за цикл приблизно дорівнює площі фігури 2—3—4—5—6—2. ККД цього двигуна становить близько 40 %.

Дизельні двигуни встановлюють на тракторах і автомобілях, тепловозах, електростанціях невеликої потужності.

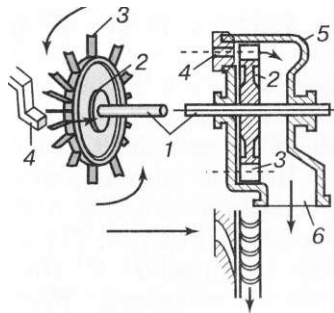
Парові й газові турбіни. Фізичний принцип дії парових турбін було розглянуто у 8-му класі. Нагадаємо його.

Головною робочою частиною турбіни є ротор — закріплений на валу диск з лопатками по його ободу. Пара від парового котла спрямовується через спеціальні канали (сопла) на лопатки ротора. В соплах пара розширюється, тиск її падає, але зростає швидкість витікання, тобто відбувається перетворення внутрішньої енергії пари в кінетичну енергію струмини.

Парові турбіни бувають двох типів: турбіни активної дії, обертання роторів яких відбувається в результаті удару струмини пари



Мал. 79

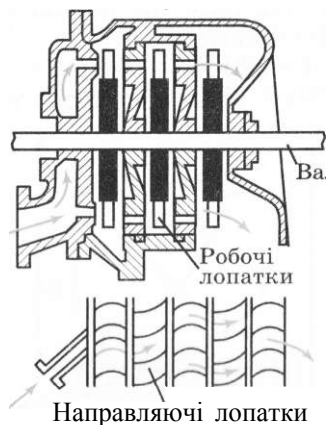


Мал. 80

У такій турбіні пара розширюється тільки в каналі сопла. Міжлопаточні канали сопла мають сталий переріз, і пара, яка проходить ними, не розширюється, а тільки змінює напрям руху, діючи на лопатку з деякою силою. Ця сила змушує ротор і вал обертатися, виконуючи роботу за рахунок кінетичної енергії пари.

Одноступеневі турбіни мають низький ККД, їх будують лише малої потужності для приведення в рух невеликих машин. Сучасні потужні турбіни роблять багатоступеневими (мал. 81), тобто ротори таких турбін мають кілька рядів робочих лопаток, розділених нерухомими перегородками.

До позитивних якостей парової турбіни слід віднести швидкохідність, компактність, значну потужність і велику питому потужність (потужність, яка припадає на одиницю маси двигуна). ККД парових турбін досягає 25 %. Недоліками їх є інерційність (значний час для пуску й зупинки), неможливість регулювання швидкості обертання в широких межах, відсутність зворотного ходу.



Мал. 81

об лопатки, і турбіни реактивної дії, в яких лопатки розміщені так, що пара, вириваючись зі щілин між ними, створює реактивну тягу.

Найпростіша турбіна активної дії зображена на малюнку 80. Вона складається з насадженого на вал 1 одного ротора 2 і тому називається *одноступеневою*. Проти зігнутих сталевих лопаток 3 розміщене одне (або кілька) сопло 4. Корпус 5 турбіни забезпечений випускним патрубком 6.

Перспективний двигун — газова турбіна. Працює вона аналогічно паровій, але робочим тілом в ній служить розжарений газ. Оскільки його температура значно вища за температуру пари, ККД газової турбіни набагато перевищує ККД парової, досягаючи 60—65 %.

Великою перевагою газових турбін перед паровими є відсутність громіздкої котельної установки, що дає змогу застосовувати їх не тільки для вироблення електроенергії на теплових і атомних електростанціях, а й на транспорті. Як двигуни



Мал. 82

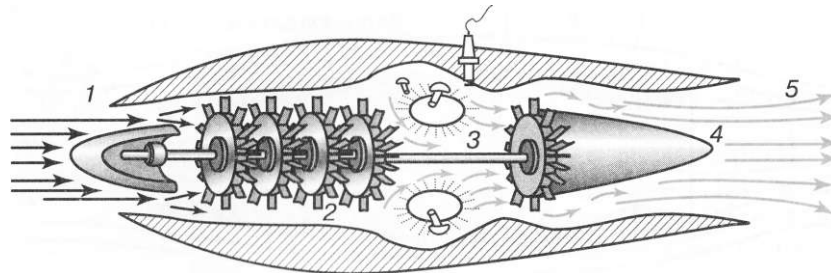
газові турбіни встановлюються на автобусах і в потягах (газотурбовоз), на кораблях. Особливо широко застосовуються газотурбінні двигуни в авіації.

Ракетивні двигуни. Теплові двигуни, які використовують ракетивну тягу витікаючих газів, називають ракетивними. Паливо в них згоряє в спеціальних камерах, і тому їх відносять до ДВЗ.

З принципом ракетивного руху ви ознайомилися в 9-му класі. Коротко розглянемо кілька типів ракетивних двигунів.

Один з найпростіших за конструкцією — прямоточний повітряно-ракетивний двигун (мал. 82). Він є трубою, в яку зустрічний потік нагнітає повітря, а рідке паливо впорскується в неї і підпалюється. Розжарені гази вилітають із труби з великою швидкістю, надаючи їй (за законом збереження імпульсу) ракетивної тяги. Недоліком цього двигуна є те, що для створення тяги він має рухатися відносно повітря, тобто самостійно злетіти він не може, його треба спочатку розігнати за допомогою двигуна іншого типу. Прямоточний повітряно-ракетивний двигун ефективно працює на швидкостях порядку 2000—3000 км/год, а найбільшу силу тяги розвиває за швидкості 6000—7000 км/год.

Якщо в ракетивному двигуні є турбіна, яка працює за рахунок енергії витікаючої струмини газів, і компресор, який всмоктує повітря і нагнітає його в камеру згоряння, то такий двигун називають турбокомпресорним (мал. 83). Під час запуску двигуна стартер починає обертати вал, на якому розміщені турбокомпресор 2 і газова турбіна 4. Через забірник 1 стискуване турбокомпресором повітря потрапляє в камеру згоряння 3, куди вбризкується паливо. Тут воно підпалюється, продукти згоряння, пройшовши через газову турбіну 4, яка обертає компресор, витікають через сопло 5, створюючи ракетивну тягу.



Мал. 83

Залежно від розподілу потужності ці двигуни поділяють на турбореактивні і турбогвинтові. В турбореактивних менша частина енергії пального йде на обертання газової турбіни (яка приводить у дію тільки компресор), а більша частина створює реактивну тягу. У турбогвинтових, навпаки, більша частина енергії палива витрачається на обертання газової турбіни, яка, крім компресора, обертає і повітряний гвинт (пропелер), а менша частина енергії йде на створення реактивної тяги.

? 1. З яких основних частин складається бензиновий ДВЗ? 2. Які процеси відбуваються у чотиритактному ДВЗ протягом кожного такту? 3. Яке значення маховика у роботі двигуна внутрішнього згоряння? 4. У чому переваги дизельного двигуна перед бензиновим? 5. Як відбувається в парових турбінах перетворення внутрішньої енергії пари в механічну енергію? 6. Назвіть переваги газових турбін перед паровими. 7. Які ви знаєте типи реактивних двигунів? 8. Що служить нагрівником і що холодильником у реактивному двигуні?

§ 41. Застосування теплових машин і проблеми охорони навколишнього середовища

Теплові машини широко використовуються в народному господарстві. Залізничними магістралями водять состави потужні тепловози, водними шляхами — теплоходи. Мільйони автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння перевозять вантажі й пасажирів. Поршневі, турбогвинтові та турбореактивні двигуни встановлені на літаках і вертольотах. За допомогою ракетних двигунів здійснюються запуски штучних супутників, космічних кораблів і станцій. Двигуни внутрішнього згоряння є основою механізації виробничих процесів у сільському господарстві. їх використовують на тракторах, комбайнах, самохідних шасі, насосних станціях.

Найбільше значення має використання теплових двигунів

(в основному потужних парових турбін) на теплових електростанціях, де вони приводять в рух ротори генераторів електричного струму. Понад 80 % усієї електроенергії в нашій країні виробляється на теплових електростанціях. Теплові двигуни — парові турбіни — встановлюють також на атомних електростанціях. На цих станціях для одержання пари високої температури використовується енергія атомних ядер.

Для спалювання палива в теплових машинах витрачається велика кількість кисню. На згоряння різноманітного палива витрачається від 10 до 25 % кисню, який виробляють зелені рослини.

Теплові машини не тільки спалюють кисень, а й викидають в атмосферу еквівалентні кількості оксиду карбону (вуглекислого газу). Згоряння палива в топках промислових підприємств і теплових електростанцій майже ніколи не буває повним, тому відбувається забруднення повітря золю, пластівцями сажі. Нині в усьому світі енергетичні установки викидають в атмосферу щороку 200—250 млн тонн золи і близько 600 млн тонн оксиду сульфуру (SO_2). Повітря забруднюють і різні види транспорту, насамперед автомобільний. Жителі великих міст задихаються від вихлопних газів автомобільних двигунів.

У всіх країнах світу з розвинутою промисловістю ведуться роботи щодо зниження і повної ліквідації забруднення повітря. На теплоцентралях і теплових електростанціях встановлюють газоочисне і пилоуловлююче обладнання, а самі станції розміщують за межами міст, між станціями і селищами створюють зелені зони.

Інтенсивні роботи ведуться зі зниження забруднення повітря вихлопними газами автомобільних двигунів: на них встановлюють фільтри; опрацьовують зразки газотурбінних, роторних і навіть парових двигунів. Тепер уже не допускаються до експлуатації автомобілі з підвищеним вмістом угарного газу (CO) у відпрацьованих газах. Найперспективнішими вважаються електромобілі й автомобілі з двигунами на водні, продуктом згоряння яких є звичайна вода. В багатьох країнах створені і випробовуються автомобілі з електричними і водневими двигунами.

Висновки

Внутрішня енергія тіла може змінюватися внаслідок теплообміну з навколишніми тілами або під час виконання над ними механічної роботи.

Зміна внутрішньої енергії внаслідок теплообміну без виконання роботи може бути обчислена за такими формулами:

$ΔH = cm(T_2 - T_1)$ — під час нагрівання або охолодження;

$ΔH = κin$ — у процесі плавлення чи тверднення;

$ΔH = λlg$ — у ході пароутворення або конденсації;

$ΔH = dt$ — під час згоряння палива.

Зміна внутрішньої енергії дорівнює сумі наданої тілу кількості теплоти і роботи, виконаної над ним (перший закон термодинаміки).

У випадку ізобарної зміни стану ідеального газу підведена кількість теплоти частково витрачається на збільшення його внутрішньої енергії, а частково на виконання газом роботи ($Q = ΔU + A$). У разі ізохорного процесу вся підведена кількість теплоти витрачається на зміну внутрішньої енергії газу ($Q = ΔU$), а під час ізотермічного — тільки на виконання газом роботи ($Q = A$). Адіабатний процес відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем, і газ може виконувати роботу над зовнішніми тілами тільки за рахунок своєї внутрішньої енергії.

Процеси, що відбуваються в природі з макроскопічними тілами, необоротні. Типові необоротні процеси такі: теплота самовільно переходить від гарячого тіла до холодного, але не навпаки; механічна енергія самовільно переходить у внутрішню.

У результаті узагальнення дослідних даних, що стосуються необоротних процесів, сформульовано другий принцип термодинаміки: в тепловій машині, яка діє циклічно, неможливий процес, єдиним результатом якого було б перетворення в механічну роботу всієї кількості теплоти, одержаної від джерела енергії — нагрівника.

Із законів термодинаміки випливає, що теплові двигуни можуть виконувати роботу тільки в процесі передавання теплоти від нагрівника до холодильника. Максимально можливе значення коефіцієнта корисної дії теплового двигуна:

де T_1 — температура нагрівника, T_2 — температура холодильника.

Підвищення ККД теплових двигунів, наближення його до максимально можливого — найважливіше технічне завдання.

(2 ЕЛЕКТРОДИНАМІКА)

Ви починаєте вивчення електромагнітних явищ, тобто явищ, зумовлених рухом і взаємодією електрично заряджених частинок. Вчення про ці явища посідає особливе місце у фізичній науці.

Це пов'язано насамперед з широким практичним застосуванням електричної енергії.

Електрична енергія... За її допомогою ми освітлюємо, обігріваємо чи охолоджуємо наші житла, передаємо на величезні відстані музику, людську мову і зображення, добуваємо руду та інші корисні копалини, плавимо і зварюємо метали, приводимо в рух потяги й кораблі, майже всі машини й верстати, лікуємо людей і робимо ще багато інших великих і важливих справ.

Нині немає виробництв, де б не використовувалась електрична енергія. Навіть на штучних супутниках і космічних кораблях є маленькі джерела електричної енергії — сонячні батареї і акумулятори, які живлять прилади й апарати літаючих лабораторій.

Без використання електричної енергії просто неможливий науково-технічний прогрес. Електричними двигунами — від грандіозних потужних моторів, які обертають прокатні стани, до мікродвигунів розмірами з таблетку — насичена промисловість. Електродвигуни споживають більшу частину всієї електроенергії, яка виробляється на Землі.

Електрика є основою автоматизації виробництва. Майже кожен автомат або автоматичний пристрій живиться електричним струмом, містить у собі різні електричні прилади. Вироблення, розподіл і використання електричної енергії стало в наш час основою виробництва всіх матеріальних благ.

Усі фізичні явища пов'язані з тими чи іншими взаємодіями, які виявляються у вигляді різних сил. Велике наукове значення мають взаємодії електрично заряджених частинок — електромагнітні взаємодії. Електрично заряджені частинки — електрон і протон — входять до складу атомів усіх речовин, а тому практично всі фізичні явища пов'язані з дією електромагнітних сил. Електромагнітною взаємодією, наприклад, є механічні сили — пружності і тертя. Виключно електромагнітними взаємодіями зумовлюється об'єднання атомів у молекули і утворення кристалів. Електромагнітні сили мають велике значення під час взаємодії як частинок в атомних ядрах, так і космічних тіл.

Все це вказує на надзвичайну важливість електромагнітних взаємодій для пізнання явищ природи і освоєння сучасної техніки. Знання основ електродинаміки, основних законів електромагнітних взаємодій необхідне кожній людині.

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

§ 42. Електризація тіл. Електричні заряди

У курсі фізики 8-го класу ви вивчали явища електризації тіл. Пригадаємо деякі з дослідів та спробуємо пояснити причини електризації тіл.

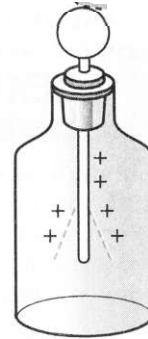
Натерта шерстю паличка з пластмаси, скла, ебоніту чи гуми притягує листочки паперу, пушинки та інші легенькі тіла. Про тіла, які після натирання притягують до себе інші тіла, кажуть, що вони наелектризовані, або що їм надано електричний заряд. В електризації завжди беруть участь два тіла і обоє електризуються. Якщо скляну паличку потерти шматком гуми, притягувати до себе легкі тіла буде не лише паличка, а й гума.

Існують два види електричних зарядів. У цьому легко переконатися на простих дослідах. Наелектризуємо ебонітову паличку, підвішену на нитці. Наблизимо до неї таку саму паличку, потерту тим самим шматочком шерсті,— вона відштовхнеться. Оскільки палички однакові і однаково електризувалися, можна твердити, що на них знаходяться заряди одного виду. Якщо до підвішеної ебонітової палички піднести скляну паличку, потерту шовком, то палички взаємно притягуються. Наближаючи до підвішеної наелектризованої ебонітової палички наелектризовані тіла з інших речовин — пластмаси, гуми, капрону, плексигласу, — ми побачимо, що ебонітова паличка в одних випадках відштовхнеться від піднесених тіл, а в інших — притягнеться до них. Тому можна вважати, що існує тільки два види електричних зарядів. Заряди, одержані на склі, потертому шовком, називають *позитивними*, а заряди, що виникають на ебоніті чи гумі, потертих шерстю, — *негативними*.

Ви знаєте, що тіла, заряджені однойменними зарядами, взаємно відштовхуються, а заряджені зарядами протилежного знака — взаємно притягуються. За притягуванням чи



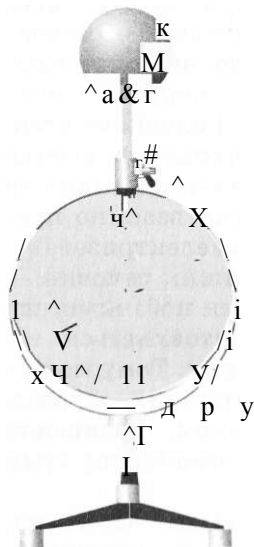
Мал. 84



Мал. 85

відштовхуванням тіл можна судити, що дане тіло має електричний заряд.

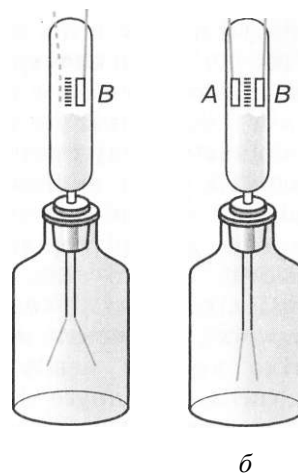
Підвісимо на дротині, закріпленій на плексигласовій підставці, зігнуту пополам смужку паперу. Доторкнемося до дротини наелектризованою паличкою. Частина заряду з палички перейде на дротину і на паперові смужки, і вони розійдуться (мал. 84). Це явище покладено в основу будови знайомих вам з курсу фізики 8-го класу приладів для виявлення електричних зарядів — електроскопа (мал. 85) і електрометра (мал. 86). В електрометрі замість листочків фольги на металевому стержні закріплено стрілку, його корпус обов'язково роблять металевим і заземлюють. Біля стрілки електрометра розміщено шкалу з поділками. Чим більший заряд надамо електрометру, тим більшою буде сила відштовхування між стрілкою і стержнем електрометра і тим на більший кут відхилиться стрілка. Отже, за зміною кута відхилення стрілки електрометра можна дізнатися, збільшився чи зменшився заряд.



Мал. 86

Як пояснюється електризація тіл і що відбувається при цьому з тілами? Пригадаємо ще один дослід з електризації тіл. Візьмемо дві пластинки — одну з ебоніту, г у з оргскла — і легенько потremo їх одна об одну. Внесемо тепер почергово пластинки всередину порожнистого циліндра, надітого на стержень електроскопа (мал. 87, а). Електроскоп покаже, що обидві пластинки наелектризувалися, причому із внесенням кожної пластинки

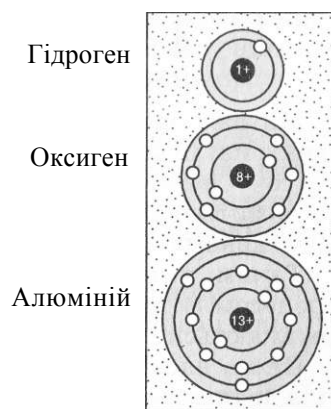
листочки електроскопа відхиляються на однаковий кут. Але якщо всередину циліндра внести обидві пластинки, складені разом, то електроскоп не виявить заряду — листочки не відхиляться (мал. 87, б). Дослід можна повторити з будь-якими парами різних тіл, але результат буде той самий. Який висновок можна зробити з цього досліду? Очевидно, єдиний: заряди на обох пластинках дорівнюють один одному за значенням і протилежні за знаком, а тому в разі складання пластинок заряди взаємно нейтралізують один одного. Тоді можна зробити висновок, що ні позитивні, ні негативні заряди не виникали під час дотику (тертя), вони були на кожній пластинці вже до досліду, а під час дотику відбувся перерозподіл зарядів і на одній з пластинок виявився надлишок негативного заряду, а на другій — нестача.



Мал. 87

Щоб переконатися в правильності цих припущень, пригадаємо з курсів фізики 8-го і хімії 9-го класів, що всі тіла складаються з молекул і атомів. У складі кожного атома є позитивно заряджене ядро і негативно заряджені електрони. Атомні ядра різних хімічних елементів відрізняються одне від одного зарядом і масою (детальніше будову атомів і атомних ядер ви вивчатимете в курсі фізики 11-го класу); кількість електронів у різних атомах різна. Ядра атомів складаються з позитивно заряджених частинок — протонів, заряд яких дорівнює за модулем зарядові електрона, і нейтральних (які не мають заряду) частинок — нейтронів.

На малюнку 88 показано моделі атомів Гідрогену, Оксигену і Алюмінію. Нагадаємо, що атом у нормальному стані не має заряду, він нейтральний, тому що позитивний заряд ядра точно дорівнює загальному негативному зарядові всіх його електронів. Під дією зовнішніх впливів, у тому числі сусідніх атомів, атоми можуть втрачати частину своїх віддалених від ядра елек-



Мал. 88

тронів, тоді як заряд їх ядер при цьому залишається незмінним, і таким чином перетворюватися в позитивно заряджені йони. Атоми можуть також приєднувати до себе додаткові електрони і заряджатися негативно. Такі атоми називають негативними йонами.

У звичайних умовах число електронів у будь-якому тілі дорівнює числу протонів у ньому, тому сума всіх негативних зарядів у тілі дорівнює сумі всіх позитивних зарядів, і тіло в цілому не має заряду, воно електрично нейтральне. Під час дотику двох різнорідних тіл електрони, які входять до складу атомів одного тіла, можуть переходити до атомів іншого внаслідок того, що енергія зв'язку їх з ядром в атомах різних хімічних елементів може бути неоднаковою. В результаті одне тіло втрачає певну кількість електронів і заряджається позитивно, а друге тіло приєднує ці електрони і заряджається негативно. Отже, *електризація тіла полягає у втраті чи придбанні тілом деякої кількості електронів.*

Електризація тіл відбувається ефективніше за умови щільного їх дотику, коли відстані між атомами, які лежать на поверхнях двох тіл, стають того самого порядку, що й відстань між атомами всередині самих тіл.

? 1. Як на досліді можна виявити появу заряду на тілах, що дотикаються одне до одного? 2. Як на досліді переконатися в існуванні зарядів двох видів? 3. Як переконатися в тому, що під час дотику електризуються обидва тіла? 4. Під час натирання стержня із плексигласу шматком хутра стержень стає негативно зарядженим, тому що в ньому виявилися «зайві» електрони. Звідки вони взялися? 5. До кульки електроскопа доторкнулися натертим плексигласом і стрілка відхилилася на певний кут. Як реагуватиме стрілка, якщо після цього доторкнутися до кульки натертим склом?

§ 43. Закон збереження електричного заряду

Ми вже знаємо, що від дотику двох різнорідних тіл вони електризуються, причому одне дістає позитивний заряд, а друге — негативний. Якщо до дотику тіла були незаряджені, то позитивний заряд одного тіла завжди точно дорівнює негативному заряду другого.

Таким чином, електризація під час дотику є по суті процесом *перерозподілу* електричних зарядів між тілами, що дотикаються.

Отже, електричні заряди можуть передаватися від одного тіла до іншого. Тому алгебраїчна сума зарядів, які виникають внаслідок будь-якого електричного процесу на всіх тілах, які беруть участь у процесі, завжди дорівнює нулеві, В цьому

полягає закон збереження електричних зарядів.

Не може ніде і ніколи в природі виникнути чи зникнути електричний заряд одного знака. Виникнення позитивного електричного заряду завжди супроводжується появою такого самого за значенням негативного електричного заряду. Під час дотику різнойменно заряджених тіл надмірна кількість електронів переходить від негативно зарядженого тіла до тіла, в якого частина атомів мала недостатню кількість електронів на своїх оболонках.

Закон збереження електричного заряду справедливий лише для випадку електрично ізольованих систем, тобто для систем, які не обмінюються електричними зарядами з тілами чи частинками, що не входять у цю систему.

? 1. Якщо заряджене позитивно тіло привести до зіткнення з негативно зарядженим, то тіло виявиться незарядженим. Чи можна сказати, що електричні заряди на цьому тілі зникли? 2. Сформулюйте і поясніть закон збереження електричного заряду. 3. Ебонітова паличка під час електризації зарядилася негативно. Чи залишилася незмінною маса палички? 4. Для якого випадку справедливий закон збереження електричного заряду? 5. Як на практиці враховують дію цього закону?

§ 44. Закон Кулона

Взаємодія наелектризованих тіл виявляється у виникненні в деяких випадках досить значних сил притягання і відштовхування. Чи можна знайти значення цих сил?

Досліди показують, що сили взаємодії між зарядженими тілами за інших однакових умов істотно залежать від їх геометричних розмірів і форм. Але якщо розміри заряджених тіл настільки малі, порівняно з відстанню між ними, що тіла можна вважати точками, то сили взаємодії підлягають простому закону.

Два нерухомі точкові електричні заряди взаємодіють із силою, прямо пропорційною добуткові цих зарядів і обернено пропорційною квадрату відстані між ними. Сили взаємодії заряджених тіл за числовим значенням однакові і спрямовані вздовж прямої, яка з'єднує ці тіла.

Цей закон у 1785 р. експериментально відкрив французький фізик П. Кулон, тому закон названо його ім'ям.

Математично закон Кулона записується так:

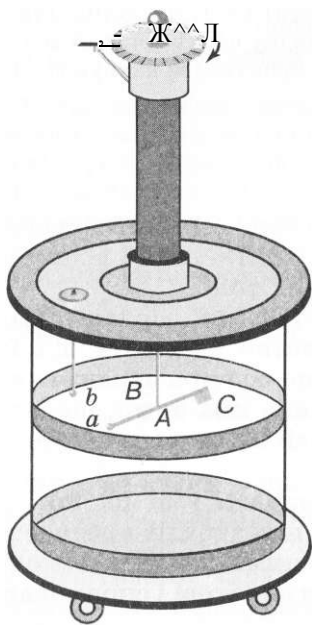
$$k^2 \quad (44.1)$$



ШАРЛЬ ОГЮСТЕН
КУЛОН
(1736—1806)

Французький вчений, відомий своїми працями з електрики і магнетизму та дослідженням сил тертя. Поряд з вивченням взаємодії заряджених тіл дослідив взаємодію полюсів довгих магнітів.

де q_1 і q_2 — взаємодіючі точкові заряди¹, r — відстань між ними, k — коефіцієнт пропорційності, який залежить від вибору системи одиниць. Значення k беруть завжди додатним, тоді різноіменним зарядам відповідає від'ємна сила (притягання), однойменним — додатна сила (відштовхування).



Мал. 89

За законом Кулона (44.1) можна визначити сили взаємодії лише нерухомих точкових заряджених тіл. Будь-яке заряджене тіло можна розглядати як сукупність заряджених матеріальних точок. Тому сила, з якою одне заряджене тіло діє на друге, дорівнює векторній сумі сил, прикладених до всіх точкових зарядів другого тіла з боку кожного точкового заряду першого тіла. За таким принципом можна розв'язати задачу про взаємодію будь-яких заряджених тіл.

Взаємодію точкових електричних зарядів Кулон вивчав за допомогою крутильних терезів (мал. 89). Кру-

¹ Вирази «заряди відштовхуються», «заряди притягуються», «заряди взаємодіють», «один заряд діє на інший» тощо застосовують для скорочення. Діють одне на одного, притягуються, відштовхуються, звичайно, заряджені тіла (або частинки).

тильні терези складаються із скляного стерженька А, підвішеного на тонкій пружній нитці Б. На одному кінці стерженька закріплено маленьку металеву кульку а, а на другому — противагу С. Ще одну металеву кульку Б закріплено нерухомо на кришці терезів. Якщо кульки зарядити, то в результаті їх взаємодії стержень повертатиметься в горизонтальній площині. За кутом закручування нитки можна визначити силу взаємодії зарядів.

Кулон проводив дослідження в повітрі, в якому сила взаємодії зарядів досить добре збігалася з силою взаємодії зарядів у вакуумі. Дальші дослідження показали, що наявність речовини навколо зарядів впливає на силу їх взаємодії. Якщо за інших однакових умов (значення зарядів та їх розміщення) простір заповнити однорідною непровідною речовиною (гасом, водою, маслом, склом тощо), сила взаємодії між зарядами зменшиться. Природу цього явища розглянемо нижче.

Вплив тієї чи іншої речовини на силу електричної взаємодії між зарядами можна оцінити, якщо порівняти силу взаємодії між зарядами у вакуумі F_0 і в речовині (Р). Назвемо відношення сил F діелектричною проникністю середовища (відносно вакууму) і позначимо її через ϵ :

$$\epsilon = \frac{F}{F_0} \quad (44.2)$$

З формули (44.2) випливає, що ϵ — безрозмірна величина. Таким чином, за наявності непровідного середовища, в яке вміщені заряди, закон Кулона набуває вигляду:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (44.3)$$

Для вакууму $\epsilon = 1$, для гасу $\epsilon = 2$, сухого паперу $\epsilon = 2 - 2,5$, води $\epsilon = 80$ тощо.

Щоб обчислити сили взаємодії зарядів за формулами (44.1) і (44.3), треба знати значення коефіцієнта k .

Як уже згадувалося, значення k залежить від вибору одиниць, якими вимірюються величини, що входять до формули (44.1) або (44.3), тобто в даному випадку це заряди, відстань і сила. У СІ сила вимірюється ньютонами, відстань — метрами. Одиницею заряду, як ви знаєте з курсу фізики 8-го класу, є кулон. Нагадаємо, що 1 кулон (1 Кл) — це заряд, який проходить за 1 с через поперечний переріз провідника при силі струму 1 А. Визначити значення k можна так. Вимірявши силу взаємодії двох відомих зарядів, які знаходяться у вакуумі на відомій відстані один від одного, можна за формулою (44.1) обчислити k : $k = \frac{F r^2}{q_1 q_2}$. На основі таких дослідів

встановлено, що в СІ $\kappa = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$. Звичайно коефіцієнт κ записують у вигляді $\kappa = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$.

Величину ϵ_0 називають *електричною сталою*. Тоді закон Кулона в одиницях СІ можна записати так:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (44.4)$$

Задача 1. На двох однакових пилинках є по одному зайвому електрону. Сила електростатичного відштовхування пилинок зрівноважує силу їх гравітаційного притягання. Густина речовини пилинок $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$. Визначити об'єм пилинок, якщо відомо, що об'єм однієї пилінки в 4 рази більший за об'єм другої.

Розв'язання. За умовою задачі $C_1 = C_2 = C$ де $m_1 = \rho V_1$ і $m_2 = \rho V_2$ — відповідно маси пилинок, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ — заряд електрона. Підставивши значення мас пилинок і врахувавши, що $V_1 = 4V_2$, дістанемо $4C\rho^2 V_2 = \kappa e^2$, звідси

$$V_2 = \frac{\kappa e^2}{4C\rho^2} \ll 3,4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3.$$

$$\text{Тоді } V_1 = 4V_2 \approx 13,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3.$$

Задача 2. Кулька масою $m = 15 \text{ г}$, яку підвішено на непровідній нитці, має заряд $q = 10^{-8} \text{ Кл}$. На відстані $E = 32 \text{ см}$ до неї знизу підносять другу маленьку кульку. Яким має бути за значенням і знаком заряд цієї кульки, щоб натяг нитки збільшився у два рази? зменшився у два рази?

Розв'язання. До заряджання другої кульки на підвішену кульку з зарядом q_1 діють сила тяжіння T і сила пружності нитки T . Підвішена кулька нерухома, отже, $T = m\delta$. Після заряджання другої кульки на підвішену кульку діє ще й електрична сила $F = \frac{\kappa q_1 q_2}{r^2}$, збільшення натягу нитки

свідчить про те, що кульки притягуються одна до одної, тобто друга кулька заряджена негативним зарядом. Знайдемо значення цього заряду. Запишемо умову рівноваги підвішеної кульки в цьому випадку в проекції на вертикальну вісь (мал. 90): $2T = m\delta + F$. Але $T = m\delta$ тому $m\delta = F$, або $m\delta = \frac{\kappa q_1 q_2}{r^2}$,

звідси $q_2 = \frac{m\delta r^2}{\kappa q_1}$ $q_2 \ll -1,67 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$.

Зменшення натягу нитки означає, що кульки відштовхуються, тобто друга кулька заряджається також позитивно. Знайдемо значення заряду q_1 в цьому випадку.

Умова рівноваги кульки запишеться:
 $T - mg = P$, причому $P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r^2}$ або

$$mg = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1^2}{r^2}, \text{ звідси}$$

$$q_1 = \sqrt{4\pi\epsilon_0 mg r^2} = 0,83 \cdot 10^{-6} \text{ Кл.}$$

? 1. У скільки разів зміниться сила взаємодії між двома точковими зарядженими тілами, якщо відстань між ними збільшити у два рази; зменшити у два рази; якщо заряд одного з них збільшити в три рази; зменшити в три рази? 2. Як можна експериментально перевірити закон Кулона? 3. Чи зміниться сила взаємодії електричних зарядів, якщо простір між ними заповнити рідким діелектриком? 4. У чому різниця і в чому схожість закону Кулона і закону всесвітнього тяжіння?

mg

$d_2 O$

Мал. 90

Вправа 16 ^{однакові} маленькі кульки, що мають заряди $4 \cdot 10^{-6}$ Кл кожна, знаходяться на відстані 40 см одна від одної у повітрі. З якою силою взаємодіють ці кульки?
 2. З якою силою взаємодіють два точкові заряди $0,66 \cdot 10^{-7}$ Кл і $1,1 \cdot 10^{-9}$ Кл у воді на відстані 3,3 см? На якій відстані їх слід помістити у вакуумі, щоб сила взаємодії залишилась попередньою? Для води $\epsilon = 81$.
 3. Дві однакові кульки масою $m = 0,25$ г кожна підвішені на нитках довжиною $l = 30$ см в одній точці. Коли кулькам надали однакових зарядів, вони розійшлись на відстань $r = 20$ см. Визначте заряд кульок.

§ 45. Електричне поле. Напруженість електричного поля

Під час дослідження взаємодії електричних зарядів постає питання, чому виникають сили, що діють на заряди, і як вони передаються від одного заряду до іншого. У курсі фізики 8-го класу йшлося про те, що відповідно до сучасних уявлень взаємодія наелектризованих тіл здійснюється через електричне поле. Нагадаємо деякі досліди, які сприяють кращому розумінню природи взаємодії наелектризованих тіл. Якщо підносити до підвішеної легенької гільзи чи електроскопа наелектризовану паличку, помітимо, що гільза при-

тягатиметься, а стрілка електроскопа відхилитиметься від нульового положення, коли паличка знаходиться ще на певній відстані від гільзи чи електроскопа. Покладемо на стіл лист органічного скла і проноситимемо над ним трубку з розрідженим газом. Трубка не світитиметься. Тепер наелектризуємо лист скла, натираючи його папером або шерстю, і знову рухатимемо над ним трубку. В затемненому приміщенні спостерігається яскраве свічення трубки.

Ці досліди свідчать про те, що заряджене тіло створює у просторі навколо себе електричне поле. *Основна властивість електричного поля, завдяки якій воно виявляє своє існування,— це здатність діяти на електричні заряди з певною силою.* Якщо в електричне поле, створене одним зарядом, внести інший заряд, то на цей заряд поле діятиме з певною силою. В той самий час поле цього заряду з такою самою значенням силою, але протилежно спрямованою, діятиме на перший заряд. Іншими словами, на кожний із зарядів діє не другий заряд, який знаходиться десь в іншому місці, а електричне поле. Поле, створюване кожним зарядом у певній точці простору, не залежить від того, чи існує в цій точці інший заряд чи ні.

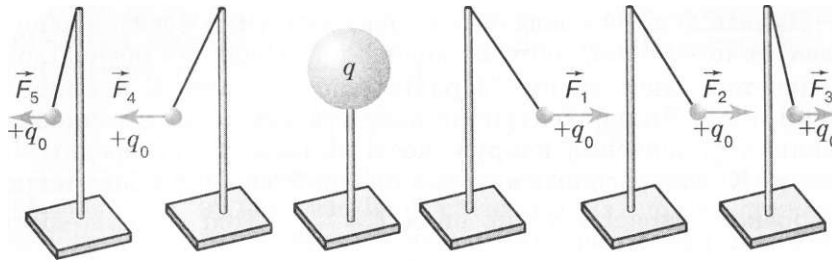
У даному розділі ми розглядаємо нерухомі заряди і відповідно статичні електричні поля. Надалі подібні електричні поля скорочено називатимемо просто електричними.

Електричне поле, як і інші фізичні поля, зокрема відоме вам з курсу фізики 9-го класу гравітаційне поле (поле тяжіння), є одним із видів матерії.

Електричне поле має енергію. Справді, діючи з певною силою на заряджене тіло, поле може виконати роботу з переміщення цього тіла, і воно здійснюється за рахунок енергії поля.

Досліджують електричні поля за допомогою пробного точкового заряду. Пробний заряд має бути достатньо малим, щоб він не спотворював досліджуваного поля (щоб власне електричне поле пробного заряду було мізерно малим порівняно з досліджуваним полем). Як пробний заряд можна, наприклад, взяти заряджену легеньку кульку, підвішену на шовковій нитці.

Розглянемо електричне поле, створене точковим електричним зарядом d (мал. 91). Внесемо в електричне поле цього заряду пробний заряд q . На нього діятиме сила P , різна в різних точках поля, яка, за законом Кулона, буде пропорційною пробному зарядові q . Але якщо ми візьмемо відношення цієї сили до пробного заряду $\frac{P}{q}$, то ця величина вже не залежатиме від вибору пробного заряду і однозначно



Мал. 91

характеризуватиме електричне поле в тій точці, де перебуває пробний заряд. Ця величина дістала назву *напруженості поля* в даній точці. Напруженість звичайно позначають літерою E . Згідно з означенням,

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (45.1)$$

Оскільки сила E — векторна величина, а заряд q_0 — скалярна, то напруженість поля також векторна величина. Слід мати на увазі, що напрям вектора напруженості E залежить не від знака пробного заряду q_0 а лише від знака заряду q , який створює поле.

Отже, **напруженістю електричного поля в даній його точці називають векторну фізичну величину, що чисельно дорівнює відношенню сили, з якою поле діє на точковий заряд, уміщений в цю точку, до цього заряду:**

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (45.2)$$

У СІ одиниця сили — ньютон, а заряду — кулон. Тому, згідно з (45.2), одиницею напруженості електричного поля є 1 Н/Кл.

Отже, за одиницю напруженості в СІ прийнято значення напруженості в точці поля, в якій на **заряд** в 1 Кл електричне поле діє з силою ВІН.

З (45.2) випливає, що на заряд q_0 з боку електричного поля діє сила

$$F = Ed_0. \quad (45.3)$$

При цьому **вектор** F збігається за напрямом з вектором E , якщо заряд $q_0 > 0$, і спрямований у протилежний бік, якщо $q_0 < 0$.

Найважливішим завданням електростатики є дослідження електричних полів, тобто знаходження за заданим розподілом у просторі електричних зарядів напруженості E в кожній точці поля. Якщо електричне поле утворене одним точковим зарядом q , значення напруженості дістаємо безпосередньо із закону Кулона, згідно з яким на пробний заряд q_0 з боку поля, створеного зарядом q , діє сила $F = \frac{q q_0}{4\pi \epsilon_0 R^2}$. Тоді напруженість поля точкового заряду q на відстані R від нього

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 R^2} \quad (45.4)$$

Напруженість електричного поля точкового заряду зменшується пропорційно квадрату відстані від заряду.

Задача 1. Електричне поле створене у вакуумі точковим зарядом $q = 1,6 \cdot 10^{-8}$ Кл. Визначте напруженість поля в точці, віддаленій від заряду на $R = 10$ см. З якою силою діятиме поле в цій точці на заряд $q_0 = 2 \cdot 10^{-9}$ Кл?

Розв'язання. Згідно з (45.4) напруженість поля точкового заряду $E = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 R^2} \approx 1,44 \cdot 10^4$ Н/Кл.

Щоб визначити силу, з якою поле діятиме на заряд q_0 , можна скористатися (45.3):

$$F = q_0 E = 2,88 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

Розглянемо тепер електричне поле двох точкових зарядів. Нехай E_1 — напруженість поля в точці A (мал. 92), створювана зарядом q_1 (коли заряд q_2 відсутній), а E_2 — напруженість поля заряду q_2 (коли немає заряду q_1). Якщо в точку A помістити пробний заряд q_0 , поля обох зарядів діятимуть на нього з силами $F_1 = q_0 E_1$ і $F_2 = q_0 E_2$, результуюча F яких дорівнює їхній геометричній сумі: $F = F_1 + F_2 = q_0 (E_1 + E_2) = q_0 (E_1 + E_2)$. Напруженість результуючого поля

$$E = E_1 + E_2 \quad (45.5)$$

Отже, **напруженість результуючого електричного поля дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створюваних окремими зарядами.**

Це правило векторного додавання напруженостей електричних полів справедливо для будь-якого числа за-

Мал. 93 номанітних електричних полів. Це

Якщо $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ — напруженості полів, створюваних окремими зарядами в якійсь точці, то напруженість E результуючого поля в тій самій точці

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n = \sum_k E_k. \quad (45.6)$$

Таким чином, результуюче поле можна знайти простим накладанням (суперпозицією) електричних полів окремих зарядів. Цей висновок часто називають принципом незалежності дії електричних полів, або принципом суперпозиції полів. Він виражає експериментально встановлений факт, що у звичайних умовах у випадку накладання електричних полів вони не впливають одне на одне і діють на внесений в них заряд незалежно одне від одного.

Задача 2. Електричне поле утворене двома однаковими однойменними зарядами, які знаходяться на певній відстані один від одного. Визначте напруженість поля в точці, яка лежить посередині відстані між зарядами. Чи зміниться напруженість поля в цій точці, якщо заряди будуть різнойменними?

Розв'язання. Якщо заряди однойменні, то на пробний заряд, вміщений у точку, яка лежить посередині між зарядами, діятимуть однакові за значенням, але протилежні за напрямом сили, і результуюча цих сил дорівнюватиме нулю. Отже, напруженість поля в цій точці дорівнює нулю. Якщо ж заряди різнойменні, то на пробний заряд діятимуть сили, спрямовані в один бік, і результуюча цих сил буде вдвічі більша за силу, з якою діяв би один заряд. Таким чином, напруженість у цьому випадку буде вдвічі більша за напруженість поля, створюваного одним зарядом.

? 1. Як можна виявити електричне поле в даній точці простору? 2. Чому дорівнює напруженість поля, створювана в певній точці точковим зарядом? 3. У певній точці поле створюється двома зарядами. Як обчислити напруженість поля в цій точці? 4. У чому полягає принцип суперпозиції електричних полів? Про що він свідчить?

Вправа 17

1. Визначте напруженість електричного поля, створюваного зарядом $5 \cdot 10^{-4}$ Кл у вакуумі на відстані 1 км від нього.
2. Два точкові однойменні заряди $2 \cdot 10^{-6}$ Кл і $1,6 \cdot 10^{-8}$ Кл розміщені в гасі на відстані 20 см один від одного. Визначте напруженість у точці, розташованій посередині між ними.
3. Обчисліть напруженість E точки поля, в якій на заряд $d = 10^{-7}$ Кл діє сила $F = 9 \cdot 10^{-6}$ Н. Чому дорівнює точковий заряд який створює поле, якщо дана точка поля знаходиться від нього на відстані $z = 5$ см. Середовище—повітря ($\epsilon = 1$).

§ 46- Лінії напруженості електричного поля

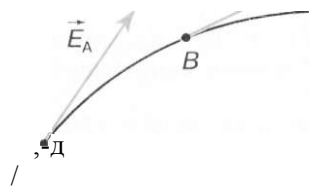
Електричне поле не можна описувати так, як ми звикли описувати звичні нам речовинні тіла. Про поле не можна сказати, що воно має певну будову, що воно складається з якихось частин. І все-таки його символічно «зображають» так, що можна «за зовнішнім виглядом» відрізнити поля, створювані одними зарядами, від полів інших зарядів. Як же це роблять?

У кожній точці електричного поля вектор напруженості \vec{E} має певні значення і напрям. Отже, електричне поле можна графічно зобразити за допомогою векторів напруженостей. Проте такий спосіб незручний. У випадку складних полів вектори напруженостей накладаються один на одного і утворюється заплутана картина. Вона буде наочнішою, якщо зобразити електричне поле за допомогою ліній напруженості. Лінії напруженості проводять в електричному полі так, щоб у кожній її точці вектор напруженості був спрямований по дотичній (мал. 93). За напрям ліній напруженості взято такий, який збігається з напрямом векторів напруженості в кожній точці цих ліній. Оскільки напруженість у кожній точці поля має лише один напрям, то лінії напруженості ніде не перетинаються. Вважають, що лінії напруженості завжди починаються на поверхні позитивно зарядженого тіла і закінчуються на поверхні негативно зарядженого; вони є незамкнутими лініями. Лінії напруженості реально не існують, це лише засіб наочного зображення поля.

Якщо знати напруженість електричного поля, то можна побудувати і лінії напруженості цього поля. Проте у випадку заряджених тіл складної форми такі обчислення також складні. Значно простіше визначити розташування ліній напруженості дослідним шляхом. Для цього у скляну ванну чи кювету наливають рідкий діелектрик (наприклад, касторове масло або вазелін) і насипають в рідину трохи манної крупи, тальку, хініну або дрібно настриженого волосся. Опускаючи у ванну різні за формою електроди і заряджаючи їх, спостерігають

орієнтацію завислих частинок уздовж ліній напруженості. Таку картину легко спроектувати на екран. На малюнку 94 показано приклади ліній напруженості електричного поля позитивно і негативно заряджених кульок.

Скориставшись описаною методикою, можна дослідити розташування ліній напруженості в різноманітних електричних полях. Це



Мал. 93

дуже важливо під час конструювання, наприклад, електровакуумних приладів. Створення простої радіолампи починається з вивчення електричних полів у ній.

Коли вектори напруженості у всіх точках поля мають однакові значення і напрям, лінії напруженості є прямими лініями, паралельними вектору напруженості, і густина ліній напруженості на всіх ділянках цього поля стала. Таке поле називають *однорідним*. На малюнку 95 зображене поле двох різнойменно заряджених паралельних пластин. Між пластинами поле однорідне, а біля країв пластин лінії напруженості розходяться — поле неоднорідне. Зовсім однорідним поле може бути лише у випадку нескінченно довгих пластин. Якщо ж пластини скінченної довжини, то поле виявляється однорідним лише поблизу їхньої середини.

Л-

Мал. 94

Слід зауважити, що в оточуючому пластини просторі напруженість електричного поля дорівнює нулю. Електричне поле позитивно зарядженої пластини компенсує дію негативно зарядженої пластини (мал. 96).

? 1. Як можна графічно зображати електричні поля? 2. Чи можуть лінії напруженості поля перетинати одна одну? Чому? 3. Накресліть схему ліній напруженості поля, створюваного: негативно зарядженою кулькою; двома різнойменними точковими зарядами; двома однойменними точковими зарядами. 4. Яке електричне поле називають однорідним? 5. Чи можна твердити, що точковий заряд рухається вздовж ліній напруженості поля? В якому випадку це твердження справедливе?

§ 47. Дослід Міллікена

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте про подільність електричного заряду. В цьому легко переконалися на досліді. Поставимо на два електрометри однакові металеві кулі.



Мал. 93

номанітних електричних полях. Це

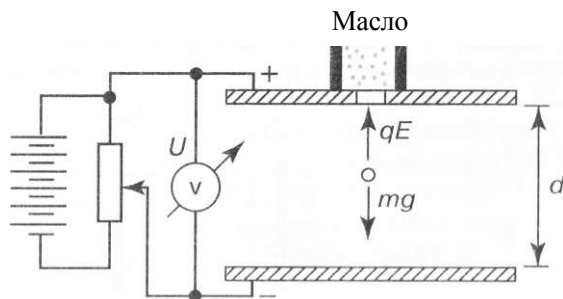
Зарядимо одну з них, а потім з'єднаємо її з другою, незарядженою кулею. Показання електрометрів свідчать про те, що заряд першої кулі став удвічі меншим. Роз'єднаємо кулі і, доторкнувшись рукою до другої кулі, знімемо з неї електричний заряд. Потім знову приєднаємо другу кулю до першої, на якій залишилась половина початкового заряду, він знову розділиться на дві однакові частини, і на першій кулі залишиться вже четверта частина початкового заряду.

В такий же спосіб можна одержати одну восьму, одну шістнадцяту початкового заряду тощо.

Нарешті на першій кулі залишиться настільки малий заряд, що за допомогою звичайного електрометра виявити його не можна. Щоб поділити заряд на дуже маленькі порції, його треба передавати не кулям, а маленьким крихтам металу або краплинкам рідини. На таких маленьких тілах можна одержати порції заряду в мільярди мільярдів разів менші, ніж у досліді з кулями. А чи існує межа подільності електричного заряду, чи його можна ділити нескінченно?

Щодо будови електричних зарядів, як і речовини, можливі два припущення: заряд безперервний (як завгодно подільний) і заряд дискретний (складається з окремих порцій електрики).

За результатами дослідів, проведених у 1909—1914 роках, американський фізик Р. Міллікен довів дискретний характер електричного заряду та існування в природі найменшого (елементарного) електричного заряду. В досліді Міллікена вимірювались заряди дрібних краплинок олії. Ідея дослідів Міллікена така. Уявімо собі мікроскопічну краплинку якоїсь нелеткої рідини (наприклад, ртуті або мінерального масла), вміщену між двома строго горизонтальними пластинами, зарядженими електричними зарядами протилежного знака. Змінюючи за допомогою батареї акумуляторів заряд пластин, можна створювати у просторі між пластинами вертикально спрямоване електричне поле різної напруженості E (мал. 97).



Мал. 93 номанітних електричних полях. Це

Під впливом радіоактивного, рентгенівського чи ультрафіолетового випромінювань повітря між пластинами йонізується, в ньому з'являються негативно і позитивно заряджені йони. Вони осідають на краплинках ртуті чи масла і заряджають їх. Позначимо повний заряд, набутий краплинкою до даного моменту, через Q . Тоді можна, змінюючи значення і напрям напруженості електричного поля між пластинами, підібрати напруженість E_x таку, щоб електрична сила F_e , яка діє на краплинку ($F_e = qE$), зрівноважувала силу тяжіння $m\delta$ краплинки:

$$qE = m\delta, \text{ звідси } \delta = \frac{qE}{m}. \quad (47.1)$$

Повітряний проміжок між зарядженими пластинами знову опромінювався радіоактивним, рентгенівським або ультрафіолетовим випромінюванням доти, поки краплинка не набувала додаткового негативного заряду і її рівновага порушувалася. Змінюючи напруженість електричного поля до деякого значення E_2 , знову відновлювали рівновагу краплинки і визначали її новий заряд $q_2 = -m\delta_2$. Потім знову опромінювали повітряний проміжок, змінювали напруженість електричного поля і діставали наступне значення заряду краплинки $q_3 = -m\delta_3$ тощо. Результати проведених вимірювань можна записати так: $m\delta = q_0E_0 = q_1E_1 = q_2E_2 = q_3E_3 = \dots$ звідси

$$q_0 : q_1 : q_2 : q_3 : \dots = A : 1 : 2 : 3 : \dots \quad (47.2)$$

$\frac{Q}{\sigma} \quad M \quad 3$

Таким чином, діставши ряд послідовних значень заряду краплинки $q_0, q_1, q_2, q_3, \dots$, Міллікен встановив, що і самі значення заряду краплинки, і їх послідовні різниці є цілими кратними деякого елементарного заряду e (заряду електрона), тобто

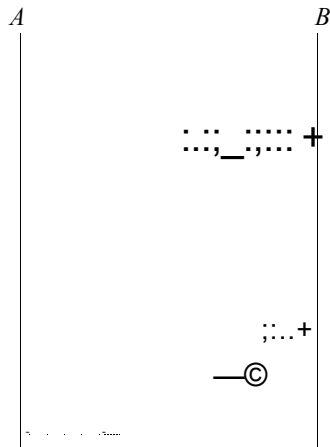
$$q_i = \pm n e,$$

де n — завжди ціле число.

У дослідах Міллікена виявилось можливим також виміряти з великою точністю значення елементарного заряду (електрона). Сучасні вимірювання заряду електрона показали, що $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ Кл.

1. Як можна переконатися на дослідах у подільності електричного заряду?
2. У чому полягає основна ідея дослідів Міллікена?
3. Чи існує в природі частинка, яка має найменший електричний заряд?
4. Чи може якась частинка мати заряд, рівний $2 \cdot 10^{-19}$ Кл? $8 \cdot 10^{-19}$ Кл?

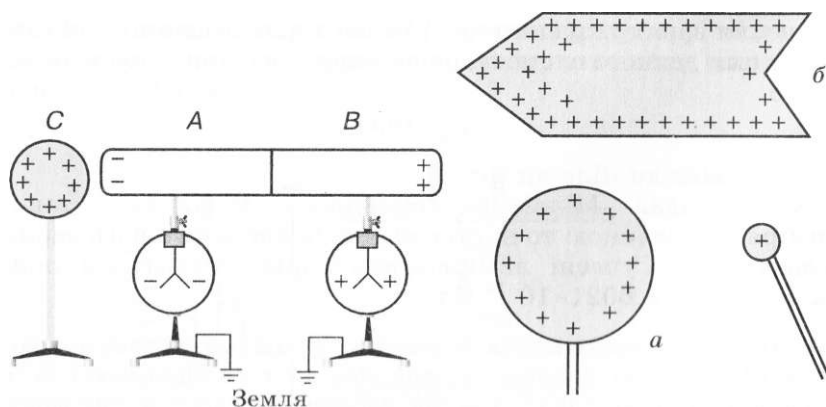
§ 48- Провідники в електричному полі



Мал. 98

У незаряджених провідниках сумарний заряд позитивних йонів дорівнює сумарному зарядові вільних електронів. Якщо провідник внести в електричне поле (мал. 98), вільні електрони в провіднику під дією сил цього поля зміщуватимуться в напрямі, протилежному напруженості поля. Внаслідок цього зміщення на одній частині провідника (на малюнку — ліворуч) виникне надлишок негативного заряду, на другій частині — надлишок позитивного заряду. В цьому полягає явище електростатичної індукції (або електризації через вплив). Переконаємося на досліді у справедливості цих міркувань.

Закріпимо на стержнях двох однакових електрометрів замість кульок два однакові металеві циліндри А і В і приведемо їх основи у дотик (мал. 99). Піднесемо до циліндра А, не дотикаючись до нього, позитивно заряджену кулю. Стрілки обох електрометрів відхиляться на однакові кути, оскільки перехід вільних електронів під дією сил електричного поля з циліндра В на циліндр А зумовлює появу позитивного заряду на циліндрі В, на якому тепер не вистачає електронів. Якщо заряджену кулю прийняти, то стрілки обох електрометрів



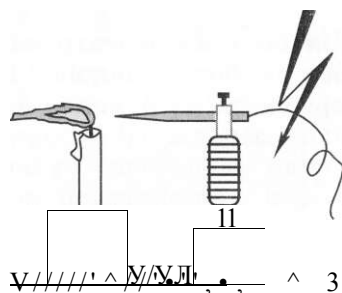
Мал. 93 нонанітних електричних полях. Це

опадуть, оскільки за відсутності електричного поля електрони розподіляються рівномірно по всьому об'єму обох циліндрів А і Б. Роз'єднавши циліндри А і В в полі зарядженої кулі, виявимо на них однакові і протилежні за знаком заряди. Ці заряди зберігатимуться і в тому випадку, коли заряджену кулю прийняти. Якщо в полі зарядженої кулі доторкнутися до одного циліндра, наприклад Б, пальцем (тобто з'єднати його з землею), то вільні електрони із землі перейдуть на циліндр і нейтралізують його позитивний заряд. Після від'єднання від землі обидва циліндри будуть заряджені негативним зарядом.

Повернемося до малюнка 98. Надлишкові заряди створюють всередині провідника додаткове електричне поле, напрям якого протилежний основному полю (лінії напруженості цього поля зображені штриховими лініями). Внаслідок накладання полів напруженість результуючого поля в провіднику зменшується. Це означає, що сила, яка діє на електрони і спричиняє їх переміщення до відповідної частини провідника, зменшується. Впорядковане переміщення електронів повністю припиняється, коли напруженості зовнішнього і внутрішнього полів виявляться однаковими за значенням. Напруженість результуючого поля всередині провідника дорівнюватиме нулю. У випадку незарядженого провідника напруженість електричного поля всередині провідника також дорівнює нулю. Хоча електрони і йони створюють мікроскопічні поля, але внаслідок суперпозиції ці поля взаємно компенсують одне одного, і середнє значення напруженості результуючого поля дорівнюватиме нулю.

Отже, електричного поля немає всередині як зарядженого, так і незарядженого провідника. На цьому ґрунтується електростатичний захист чутливих до електричного поля приладів. Щоб захистити прилади від електричних полів, їх уміщують усередину замкнутих металевих ящиків — екранів. Найчастіше екранують не чутливий до електричного поля прилад, а саме джерело електричного поля, від небажаного впливу якого треба захистити розміщені поблизу нього пристрої.

З'ясуємо, як розміщуються заряди на зовнішній поверхні провідника. Доторкнувшись маленькою кулькою на ізолюючій рукоятці до різних точок наелектризованої кулі, а потім до електрометра і помічаючи щоразу кут відхилення стрілки, можна переконатися, що на поверхні провідної кулі, розміщеної далеко від інших провідників, заряд розподіляється рівномірно (мал. 100, а). Зарядивши провідник неправильної форми (мал. 100, б) і виконавши дослід, аналогічний попередньому, можна показати, що найбільша кількість зарядів знаходиться на опуклостях і особливо на вістрях провідника.



Мал. 101

За наявності гострих виступів на зарядженому провіднику напруженість поля поблизу них може виявитися настільки значною, що в навколишньому повітрі починається йонізація молекул (детальніше про це буде сказано нижче) і з'являються позитивні і негативні йони. Йони з таким самим знаком заряду, щоби у вістря, рухаються від вістря, захоплюючи під час свого руху і нейтральні молекули. Внаслідок цього виникає спрямована течія повітря від вістря, або електричний вітер. Його можна виявити, якщо піднести до вістря запалену свічку (мал. 101). Полум'я свічки відхиляється від вістря і може бути погашене струминою електричного вітру.

Явище стікання зарядів із загострених провідників доводиться враховувати в техніці. Металеві частини всіх приладів і машин, які працюють під високою електричною напругою, роблять добре заокругленими, а кінці металевих стержнів забезпечують гладенькими кульками. Наявність загострень призводить до стікання зарядів і порушення ізоляції.

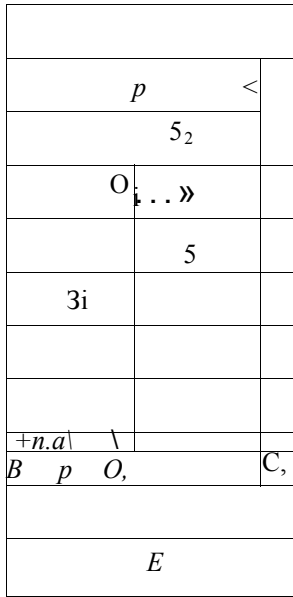
? 1. У чому полягає явище електростатичної індукції? 2. За рахунок якої енергії відбувається розділення електричних зарядів у процесі електростатичної індукції? 3. Як можна захистити прилади, пристрої і людей від шкідливого впливу зовнішніх електричних полів?

§ 49. Робота електричного поля під час переміщення заряду

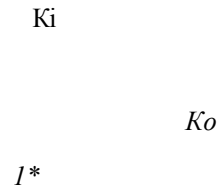
На вміщене в електричне поле заряджене тіло з боку поля діє сила. Внаслідок цього тіло може переміщатися, тобто поле може виконувати роботу з переміщення заряду. Розглянемо, як можна підрахувати виконану полем роботу з переміщення зарядженого тіла в однорідному полі з напруженістю E (мал. 102).

На точковий електричний заряд $+q$, вміщений у точку B однорідного електричного поля ($E = \text{const}$), діє сила $F = qE$.

На переміщення заряду з точки B в точку C по прямолінійному шляху BC поле виконує роботу $A = F \cdot BC \cdot \cos \alpha$, де $E = \frac{A}{q \cdot BC}$, а α — кут між векторами сили F і переміщення BC . Проведемо з точки C перпендикуляр CC_1 на напрям лінії напруженості, яка проходить через точку B , і позначимо $\angle C_1CB = \alpha$. Тоді $A = qE \cdot BC \cdot \cos \alpha$.



Мал. 102



Мал. 103

Нехай тепер заряд $+d$ переміщається рівномірно ламаною лінією BBC , тоді поле виконує роботу $A_1 = \int_{B \rightarrow C} \vec{E} \cdot d\vec{r}$ сов $a_2 +$ Але сов $a_x = \int_{B \rightarrow C} E \cdot dx = E \cdot BC_x$ і, як видно з малюнка 102, $A_x = E \cdot BB_x + E \cdot BC_x = E \cdot BC_x = pa$, тобто $A_2 = A$.

Якщо заряд $+d$ переміщається з точки B в точку C по довільному криволінійному шляху, його можна розбити на дуже маленькі прямолінійні ділянки, сума проєкцій яких на напрям лінії напруженості, що проходить через точку B , дорівнюватиме (i) . Отже, і в цьому випадку робота A_2 яку поле виконує на переміщення заряду d з точки B в точку C , дорівнюватиме:

$$A_2 = A = Eci = dEci.$$

Оскільки траєкторії руху обрані довільно, то робота з переміщення заряду в однорідному електричному полі не залежить від форми траєкторії, якою рухається заряд, а залежить тільки від положення початкової і кінцевої точок шляху в цьому полі.

Припустимо, що це не так і що робота A_{K_1} під час переміщення заряду вздовж контуру K_1 (мал. 103) не дорівнює роботі A_K для контуру K_2 , причому обидва контури з'єднують одні й ті самі точки 1 і 2 . Тоді, переміщаючи заряд по замкнутому контуру, складеному з K_1 і K_2 , ми дістали б вигреш у роботі ($A = A_{K_1} - A_{K_2}$). А це суперечить законові збереження енергії.

Адже після повернення заряду у вихідну точку 1 в розглядуваній системі тіл немає ніяких змін і тому не повинно бути ні виграшу в роботі, ні її втрат.

Це означає, що наше припущення неправильне і що робота на переміщення заряду з однієї точки в іншу в електричному полі не залежить від форми шляху, а залежить лише від положення цих точок.

З викладеного вище випливає, що робота сил електричного поля з переміщення заряду замкнутим контуром дорівнює нулеві.

Подібно до того як будь-яке тіло, яке взаємодіє з Землею за законом всесвітнього тяжіння, на різних відстанях від її центра має різну потенціальну енергію, електричний заряд d на різній відстані від іншого заряду d_0 має потенціальну енергію. Мірою зміни потенціальної енергії електричної взаємодії є робота, яку треба виконати для переміщення заряду d з однієї точки електричного поля, створюваного зарядом d_0 , в іншу точку. Якщо в точці 1 заряд d мав потенціальну енергію W_1 , а в точці 2 його потенціальна енергія W_2 , то робота сил електричного поля, які перемістили цей заряд, дорівнює:

$$A = W_1 - W_2 \quad (49.1)$$

Отже, робота сил електричного поля під час переміщення в ньому заряду йде на зміну потенціальної енергії поля. Підкреслимо ще раз, що ця робота не залежить від форми траєкторії переміщення заряду між цими точками, а залежить лише від положення точок 1 і 2.

? 1. Як обчислюється робота з переміщення зарядженого тіла в однорідному електричному полі? 2. Чи залежить робота під час переміщення зарядженого тіла з однієї точки поля в іншу від форми траєкторії? 3. Чому дорівнює робота на переміщення зарядженого тіла в електричному полі по замкнутому контуру? 4. Які перетворення енергії відбуваються під час переміщення заряду в електричному полі під дією сил цього поля?

§ 50. Потенціал і різниця потенціалів

У кожній точці поля, а значить, і на всьому шляху переміщення заряду d з точки 1 у точку 2 на нього діє сила, пропорційна зарядові. Тому й робота, виконувана силами поля під час переміщення заряду між будь-якими точками 1 і 2, пропорційна цьому заряду. Однак відношення роботи до переміщеного заряду вже не залежить від значення заряду, а є характеристикою положення початкової і кінцевої точок переміщення:

$$A = \frac{P_1 - P_2}{q}$$

Тут P_1 і P_2 — потенціальні енергії заряду q в точках 1 і 2 електричного поля. Потенціальна енергія даного заряду в різних точках поля може бути різною. Вона залежить як від властивостей самого поля, так і від заряду. Відношення A/q залежить від значення заряду і приймається за енергетичну характеристику поля, яку називають *потенціалом поля в даній точці*.

Величина A/q є зміною потенціальної енергії одиничного позитивного заряду. Цю величину звичайно позначають $\Phi_1 - \Phi_2$ і називають *різницею потенціалів* між точками 1 і 2 електричного поля:

$$\frac{A}{q} = \frac{P_1}{q} - \frac{P_2}{q}$$

Тоді робота, виконувана силами електричного поля на переміщення заряду q з точки 1 поля в точку 2, дорівнює добутку заряду на різницю потенціалів між цими точками:

$$A = q(\Phi_1 - \Phi_2). \quad (50.1)$$

Отже, робота щодо переміщення заряду в електричному полі може бути визначена тільки тоді, коли зазначені початкова і кінцева точки шляху, аналогічно визначенню роботи в полі тяжіння. Тому фізичний смисл має тільки різниця потенціалів між двома точками поля, яка дістала особливу назву — *напруга*.* Якщо якимсь способом задати потенціал однієї довільної точки поля, то можна обчислити потенціал усіх оточуючих її точок. Отже, коли йдеться про «потенціал даної точки електричного поля», під цим розуміють різницю потенціалів між даною точкою поля заряду і деякою точкою поля, потенціал якої умовно приймають за нуль. Таким звичайно вважають потенціал тих точок поля заряду, які знаходяться від нього на нескінченно великій відстані. Тому на основі (50.1) для точки 1 поля заряду q можна записати: $A_{1\infty} = q(\Phi_1 - \Phi^\infty)$, але $\Phi^\infty = 0$, тоді $A_{1\infty} = q\Phi_1$

$$\Phi_1 = \frac{A_{1\infty}}{q} \quad (50.2)$$

У цьому випадку потенціал даної точки поля чисельно дорівнює роботі, яку виконують сили поля під час переміщення одиниці позитивного заряду з даної точки поля в нескінченно віддалену, потенціал якої дорівнює нулю.

Часто у процесі розв'язання практичних задач електротехніки зручно вважати нульовим потенціал земної поверхні і відлічувати відносно нього потенціал усіх інших точок.

Формула (50.1) дає змогу визначити одиницю потенціалу. В СІ робота вимірюється в джоулях, а заряд — у кулонах, отже, одиниця потенціалу дорівнює 1 Дж/К. Цю одиницю названо *вольтом* (В). Таким чином, **вольт дорівнює різниці потенціалів між двома точками електричного поля, якщо для переміщення між ними електричного заряду в один кулон треба виконати роботу, що дорівнює одному джоулю.**

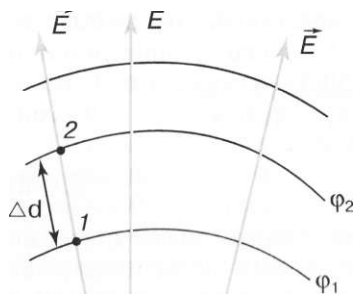
? 1. Що називають різницею потенціалів між двома точками електричного поля; потенціалом точки електричного поля? 2. За яких умов переміщення електричного заряду з однієї точки електричного поля в іншу не вимагає затрат енергії? 3. У яких одиницях вимірюють різницю потенціалів і потенціал? 4. Під час грози різниця потенціалів між хмарою і Землею може досягти 10^9 В. Як це треба розуміти?

§ 51. Зв'язок між напругою і напруженістю однорідного поля

Для характеристики електричного поля ми ввели дві фізичні величини: напруженість і напругу (або різницю потенціалів). Оскільки і напруженість, і напруга є характеристиками поля, що залежать від заряду, який створює поле, і від відстані до цього заряду, неважко припустити, що ці величини взаємозв'язані. Спробуємо встановити цей зв'язок між ними.

Нехай заряд q переміщається вздовж лінії напруженості однорідного електричного поля E з точки 1 в точку 2 (мал. 104), відстань між якими Δd . Електричне поле діє на заряд із силою $F = qE$ і виконує роботу $A = F \Delta d = qE \Delta d$.

Цю роботу можна визначити і через напругу $V = \phi_1 - \phi_2$ між точками 1 і 2: $A = q(\phi_1 - \phi_2) = qV$. Прирівнявши вирази для роботи, визначимо модуль вектора напруженості поля



Мал. 104

$$E = \frac{\phi_1 - \phi_2}{\Delta d} \quad (51.1)$$

Формула (51.1) дає змогу знайти певне значення напруженості лише у випадку однорідного електричного поля. Якщо поле неоднорідне, слід точки 1 і 2 брати близько одну від одної, щоб значення напруженості на відстані між цими точками можна було вважати незмінним.

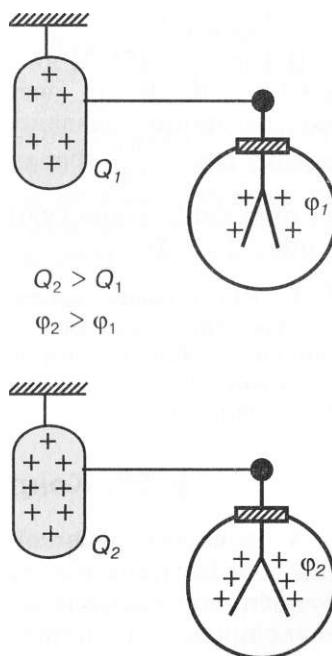
З визначення потенціалу як роботи, виконуваної силами електричного поля, випливає, що поле переміщає позитивний заряд у бік зменшення потенціалу. Негативний заряд завжди переміщається в бік зростання потенціалу. Оскільки поле діє на заряди вздовж ліній напруженості, то зрозуміло, що напруженість поля завжди спрямована до зменшення потенціалу.

? 1. Який зв'язок існує між напругою і напруженістю однорідного електричного поля? 2. В яких точках електричного поля, утвореного між різнойменно зарядженими пластинами, потенціал поля вищий: поблизу позитивно чи негативно зарядженої пластини? 3. Чому дорівнює робота переміщення заряду в електричному полі на замкнутій траєкторії?

§ 52. Електроємність

Ви вже дізналися, що в провіднику, вміщеному в електричне поле, відбувається перерозподіл зарядів доти, поки зовнішнє поле всередині провідника не скомпенсується власним полем розділених зарядів. При цьому результуюче поле всередині провідника відсутнє, напруженість поля спадає до нуля, перерозподіл зарядів припиняється. Відсутність поля всередині провідника означає, що всі його точки набули однакового потенціалу. Очевидно, цей потенціал має залежати від заряду провідника.

Щоб обчислити залежність потенціалу провідника від його заряду, звернемося до досліду. Розмістимо металеву кулю подалі від інших провідників, щоб вона не могла зарядитися через вплив, з'єднаємо її з електрометром довгою ізольованою дротиною і збільшуватимемо її заряд (мал. 105). У скільки разів збільшується заряд кулі, у стільки ж зростає її потенціал, тобто заряд провідника змінюється прямо пропорційно потенціалу провідника ($q = C\phi$). (Коефіцієнт пропорційності C залишається сталим лише в умовах даного досліду.) Якщо провести аналогічний дослід з іншим провідником або змінити зовнішні умови першого досліду, стала C матиме



Мал. 105

вже інше числове значення. Пряма пропорційна залежність між зарядом і потенціалом провідника зберігатиметься не лише для провідника у вигляді кулі, а й віддаленого провідника довільної форми. Тому відношення заряду провідника до його потенціалу не залежить від значення заряду і визначається розмірами і формою провідника й електричними властивостями навколишнього середовища (діелектричною проникністю ϵ). Це відношення називають *електроємністю* провідника.

Отже, **електроємністю провідника називають величину, яка вимірюється відношенням заряду провідника q до його потенціалу φ :**

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (52.1)$$

Досліди показують, що електроємність провідника залежить від його розмірів і форми, не залежить від матеріалу, агрегатного стану, форми і розмірів порожнин всередині провідника. Це пояснюється тим, що надлишок зарядів розподіляється на зовнішній поверхні провідника. Електроємність не залежить також ні від заряду провідника, ні від його потенціалу. Сказане не суперечить формулі (52.1), оскільки вона лише показує, що потенціал віддаленого провідника прямо пропорційний його зарядові і обернено пропорційний електроємності.

З формули (52.1) випливає, що одиницею електроємності в СІ є 1 Кл/В. На честь англійського фізика М. Фарадея цю одиницю названо *фарад* (позначається Φ). Таким чином, $1 \Phi = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$ Фарад — дуже велика електроємність, тому на практиці користуються її частками: $1 \text{ мк}\Phi = 10^{-6} \Phi$ і $1 \text{ п}\Phi = 10^{-9} \Phi$.

? 1. Що показує електроємність провідника? 2. Чи залежить електроємність віддаленого провідника від його маси і форми; від наявності поблизу нього інших провідників? 3. Дві однакові провідні віддалені кулі у вакуумі дістали різні заряди. Що можна сказати про потенціали куль?

§ 53. Конденсатор

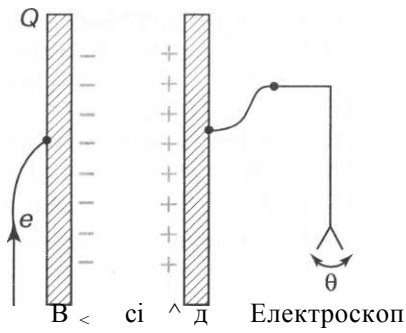
У провідника великої електроємності — великі розміри. Між тим для багатьох електротехнічних і радіотехнічних приладів потрібні пристрої, здатні за малих розмірів і невеликих відносно навколишніх тіл потенціалів нагромаджувати великі заряди, іншими словами, мати велику електроємність. Ці пристрої дістали назву *конденсаторів* (*condensab* — згущую).

Найпростіший конденсатор складається з двох провідників (обкладок), розділених ізолятором (діелектриком). Щоб на ємність конденсатора не впливали навколишні тіла, провідникам надають такої форми, щоб поле, створюване нагромаджуваними зарядами, було зосереджене у вузькому зазорі між обкладками конденсатора. Цій умові задовольняють: 1) дві плоскі пластини; 2) два коаксіальні циліндри; 3) дві концентричні сфери. Тому залежно від форми обкладок конденсатори поділяють на плоскі, циліндричні і сферичні.

Під електроємністю конденсатора розуміють фізичну величину, яка дорівнює відношенню заряду q , нагромадженого в конденсаторі, до різниці потенціалів ($\phi_1 - \phi_2$) між його обкладками:

Оскільки у формулі (53.1) фігурує різниця потенціалів між обкладками, ємність конденсатора не залежить ні від вибору нульового рівня потенціалу, ні від наявності навколишніх тіл (зовнішні електричні поля однаково змінюють потенціал кожної з обкладок, тому $D\phi = \phi_1 - \phi_2$ залишається незмінною).

Плоский конденсатор (мал. 106) складається з двох металевих пластин A і B , розділених діелектриком. Зарядимо пластину A позитивним зарядом. Тоді на внутрішній поверхні пластини B за індукцією виникне заряд, однаковий за значенням і протилежний за знаком зарядові пластини A , а на зовнішній поверхні — позитивний заряд. З'єднаємо пластину B із землею, тоді її позитивний заряд розподілиться по величезному провідникові — земля — пластина B , і пластина B набуде потенціалу землі. Негативний заряд не може перейти на землю, оскільки притягується позитивним зарядом пластини A . Різнойменні заряди обох пластин, притягуючись один до



Мал. 93 нонанітних електричних полях. Це

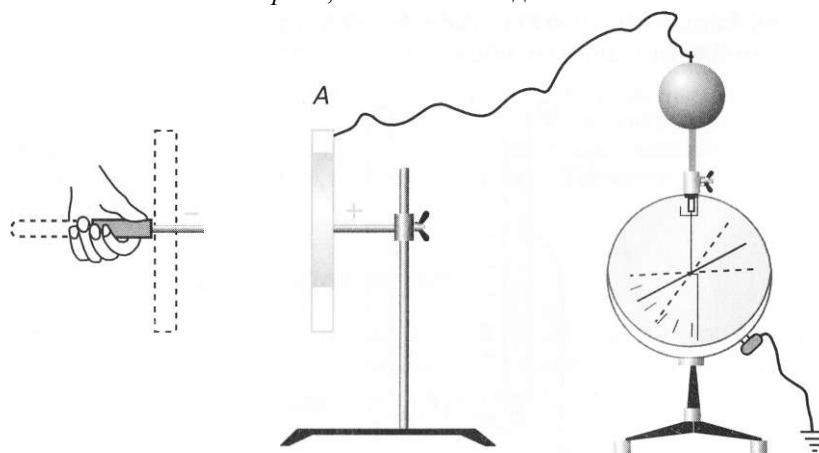
одного, зосереджуються лише на внутрішньому їх боці. Між пластинами виникає однорідне електричне поле, а поза конденсатором електричні поля зарядів обох пластин компенсують одне одного. А це означає, що на відміну від віддаленого провідника, електроємність якого залежить від наявності поблизу його поверхні інших провідних тіл, електроємність конденсатора не залежить від оточуючих провідників.

Очевидно, ємність плоского конденсатора має залежати від площі його пластин і відстані між ними. Для вивчення цієї залежності можна скористатися розсувним конденсатором (мал. 107), пластили в якому можна встановлювати на фіксованій відстані одна від одної. Будемо наближати або віддаляти пластили одну від одної. За зміною показань електрометра судитимемо про зміни електроємності.

Досліди показують, що із віддаленням однієї пластини від другої різниця потенціалів між ними збільшується, а це вказує на зменшення ємності конденсатора. Відповідно із зменшенням відстані між пластинами ємність конденсатора збільшується. Вимірюючи кут відхилення стрілки електрометра і відстань між пластинами конденсатора, можна встановити, що *електроємність конденсатора змінюється обернено пропорційно відстані між пластинами.*

Змінюючи пластили конденсатора так, щоб площа пластин, які знаходяться одна проти одної (робоча площа конденсатора), змінювалась, а відстань між ними не змінювалась, можна встановити, що *електроємність конденсатора прямо пропорційна його робочій площі.*

На дослідах можна також переконатися, що *ємність конденсатора не залежить від матеріалу, товщини його пластин, а залежить від діелектрика, який знаходиться між ними.*



Мал. 107

Наприклад, якщо простір між пластинами конденсатора повністю заповнити гасом, його ємність збільшиться приблизно в 2 рази, слюда збільшує ємність у 6—7 раз, етиловий спирт — приблизно в 26 раз тощо.

Таким чином, **ємність плоского конденсатора прямо пропорційна площі пластин і відносній діелектричній проникності діелектрика й обернено пропорційна відстані між пластинами:**

$$C = \kappa \frac{S}{d} \quad (53.2)$$

де S — площа однієї з двох однакових пластин; d — відстань між пластинами; κ — коефіцієнт пропорційності.

У СІ для плоского конденсатора коефіцієнт κ дорівнює одиниці. Тоді

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (53.3)$$

З формули (53.2) випливає, що, зменшуючи товщину діелектрика між пластинами, можна дістати конденсатор великої ємності. Однак зі зменшенням товщини діелектрика і незмінної різниці потенціалів між пластинами зростає напруженість поля конденсатора і за певної напруженості може відбутися пробій діелектрика — розряд, який руйнує ізоляцію конденсатора. Тому кожен конденсатор, крім ємності, характеризується ще й максимальною робочою напругою.

Задача 1. Визначити ємність плоского конденсатора, між пластинами якого площею $S = 50 \text{ см}^2$ кожна прокладено парафіновий папір товщиною $d = 0,1 \text{ мм}$. Діелектрична проникність паперу $\epsilon = 4,3$.

Розв'язання. Згідно з (53.3) ємність плоского конденсатора $C = \epsilon \frac{S}{d}$. Відстань між пластинами дорівнює товщині прокладеного паперу d . Тоді $C \sim 1,9 \cdot 10^9 \text{ Ф}$.

Задача 2. Плоский конденсатор зарядили до напруги $U = 400 \text{ В}$ і від'єднали від джерела струму. Після цього відстань між пластинами зменшили в 2 рази. Визначити напругу між пластинами.

Розв'язання. Оскільки пластини конденсатора зближують після вимкнення джерела струму, заряд пластин не змінюється, а змінюється тільки ємність конденсатора, отже, і напруга між пластинами. Спочатку ємність становила $C_1 = \epsilon \frac{S}{d_1}$ а після зближення пластин $C_2 = \epsilon \frac{S}{d_2} = \frac{2\epsilon \epsilon_0 S}{d} = 2C_1$.

Заряд конденсатора $q = C \cdot U = C_2 U_2$, звідси

$$U_1 = 2U_2, \text{ або } C_2 = 200 \text{ В.}$$

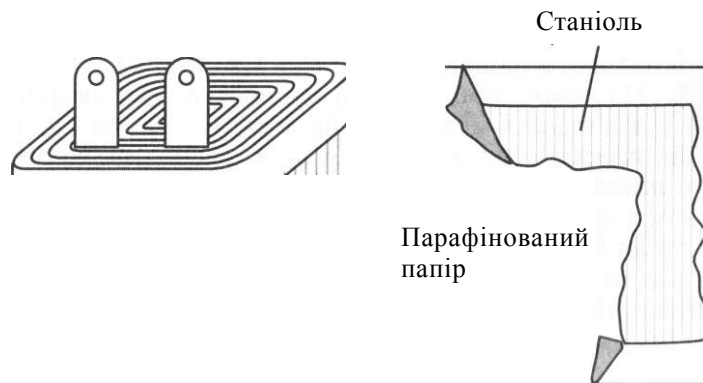
? 1. Повітряний плоский конденсатор заряджено до певної різниці потенціалів. Як змінюється і різниця потенціалів, якщо відстань між пластинами конденсатора збільшити в 2 рази? Якщо між його пластинами помістити скляну пластину ($\epsilon = 7$)? 2. На конденсаторі написано: « $C = 40$ мкФ, $U_{\text{роб}} = 300$ В». Що означає цей напис?

- Вправа 18**
1. Плоский конденсатор складається з двох розділених повітряним проміжком пластин площею $S = 100$ см² кожна. Коли одній з пластин надали заряду $Q = 5 \cdot 10^{-9}$ Кл, між ними виникла напруга $U = 120$ В. На якій відстані одна від одної знаходяться ці пластини?
 2. Плоский конденсатор виготовляють з листів тонкого станіолу, прокладених пластинами слюди. Скільки листів станіолу треба взяти, щоб одержати ємність $C = 10^{-6}$ Ф, якщо площа листа $S = 60$ см², товщина слюдяних прокладок $d = 0,1$ мм, діелектрична проникність слюди $\epsilon = 9$?
 3. Плоский конденсатор заряджено так, що напруга між його пластинами дорівнює $U = 1000$ В. Чому дорівнює напруженість поля в конденсаторі, якщо відстань між пластинами дорівнює $d = 1$ мм?
 4. Яку площу повинні мати пластини плоского конденсатора, щоб його електроємність дорівнювала $C = 1$ мкФ, якщо між пластинами вміщено шар слюди товщиною $d = 1$ мм? Діелектрична проникність слюди $\epsilon = 7$.

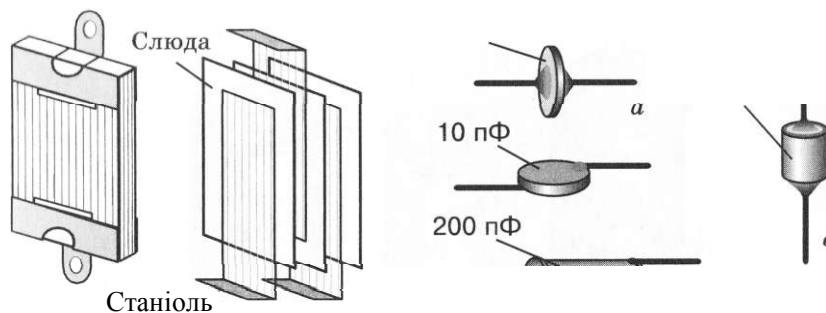
§ 54. Види конденсаторів

Конденсатори широко використовуються в електро- і радіотехніці. Залежно від технічних вимог виготовляють конденсатори різного типу.

Широко застосовуються паперові конденсатори для напруг у кілька сот вольтів і ємністю в кілька мікрофард (мал. 108). У таких конденсаторах обкладками служать дві довгі



Мал. 108



Мал. 109

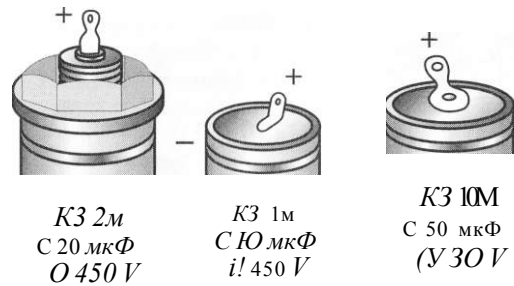
стрічки тонкої металевої фольги, а ізолюючою прокладкою між ними — трохи ширша паперова стрічка, просочена парафіном. Потім стрічки туго згортаються в рулон і вкладаються в спеціальний корпус. Такий конденсатор, розміри якого дорівнюють розмірам сірникової коробки, має електроємність 10 мкФ (металева куля такої ємності мала б радіус 90 км).

У радіотехніці застосовуються слюдяні конденсатори невеликої ємності (від десятків до десятків тисяч пікофарад). У них листи станіолу прокладаються слюдою так, що всі непарні його листи, з'єднані разом, утворюють одну обкладку конденсатора, а парні листи утворюють другу обкладку. Зовнішній вигляд і окремі частини такого конденсатора показано на малюнку 109. Такі конденсатори можуть працювати під напругою від сотень до тисяч вольтів.

У 50-х роках минулого століття слюдяні конденсатори в радіотехніці почали замінювати керамічними (мал. 110). Діелектриком в них служить спеціальна кераміка. Обкладки керамічних конденсаторів виготовляють у вигляді шару срібла, нанесеного на поверхню кераміки і захищеного шаром лаку. Керамічні конденсатори виготовляються на електроємності від одиниць до сотень пікофарад і на напруги від сотень до тисяч вольтів.

Широкого розповсюдження дістали так звані електролітичні конденсатори (мал. 111), в яких діелектриком є дуже тонкий оксидний шар на поверхні алюмінію або танталу, що перебуває в контакті із спеціальним електролітом. Ці конденсатори мають значну ємність (до кількох тисяч мікрофарад) і невеликі розміри.

Часто застосовуються конденсатори змінної ємності з повітряним або твердим діелектриком (мал. 112). Вони складаються з двох систем металевих пластин, ізольованих одна від одної. Одна система пластин нерухома, друга може обертатися навколо осі. Обертаючи рухоми систему, плавно змінюють ємність конденсатора.



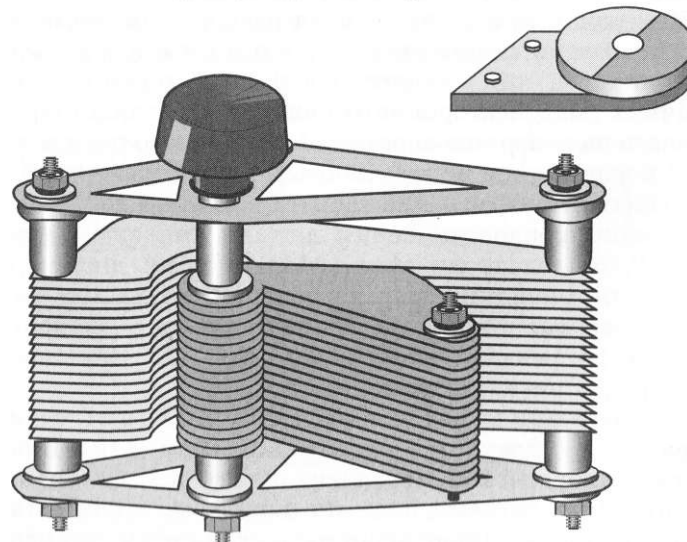
Мал. 111

Щоб одержати потрібну електроємність за заданої робочої напруги, конденсатори з'єднують у батареї. Для більшої електроємності конденсатори з'єднують паралельно (мал. 113). Тоді систему конденсаторів можна розглядати як один конденсатор, електроємність C якого дорівнює сумі електроємностей усіх конденсаторів системи:

$$c = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n, \quad (54.1)$$

У разі послідовного з'єднання (мал. 114) електроємність C усієї батареї визначається з виразу:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (54.2)$$



Мал. 112

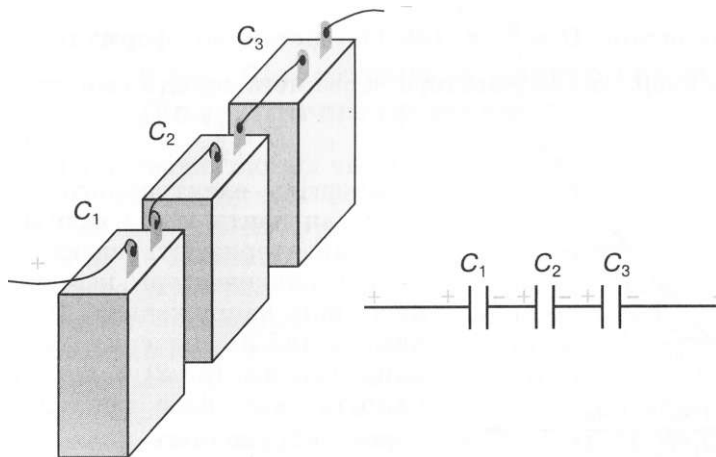
Мал. 113

§ 55, Енергія електричного поля

Енергія електричного поля зарядженого конденсатора дорівнює роботі, яку треба було виконати для його зарядження. Заряджатимемо конденсатор, а для цього перенеситимемо позитивно або негативно заряджені частинки з однієї пластини на другу. Від кожної порції заряду Δq напруга конденсатора зростає на $\Delta U = \frac{\Delta q}{C}$. Нехай в результаті перенесення ми

одержали заряд Q а напруга конденсатора дорівнює $U = \frac{Q}{C}$.

Чергова порція заряду Δq перенеситиметься за напруги U . Робота з переміщення цього заряду дорівнює:



Мал. 114

$$AA_2 = A\partial\Pi_2 = A\partial \wedge = \partial_2 A\Pi.$$

Наступна порція заряду $A\partial$, а $C_2 = \dots + AC$, тоді робота з переміщення заряду

$$AA_2 = \Delta d[1/2 = A\partial \quad \partial_2 A\Pi,$$

де $\partial_2 = \partial + A\partial$.

Робота з переміщення n -ї порції заряду ∂ дорівнює:

$$AA_n = A \wedge \wedge_n A \wedge.$$

Повна робота A , затрачена на переміщення всього заряду ∂ дорівнює сумі робіт:

$$A = AA_2 + AA_2 + \dots + AA_n.$$

Цю суму легко знайти, скориставшись графічною залежністю між зарядом і напругою конденсатора $\partial = CC$.

Графіком цієї залежності є пряма, яка проходить через початок координат (мал. 115). Робота, затрачена на зарядження конденсатора, чисельно дорівнює площі трикутника з основою V і висотою ∂ :

$$A = \frac{1}{2} V \partial.$$

Отже, енергія електричного поля зарядженого конденсатора дорівнює:

$$(55.1)$$

Цю енергію можна виразити через ємність конденсатора C і напругу V . Підставивши в (55.1) $\partial = CV$, дістанемо:

$$(55.2)$$

Підставивши $V = \frac{Q}{C}$ у (55.1), дістанемо формулу, яка виражає енергію конденсатора через його заряд і ємність:

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}; \quad W = \frac{1}{2} QV \quad (55-3)$$

Енергію електричного поля легко виразити через величини, які характеризують електричне поле в конденсаторі, наприклад через його напруженість. Підставимо в (55.2) значення ємності конденсатора (53.2) і виразимо напругу між його обкладками через напруженість поля $E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_i c_i}$ де c_i — відстань між пластинами:

Мал. 115

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 a^2} \quad (55.4)$$

В останню формулу входять тільки характеристики поля. Добуток площі пластин на відстань між ними є об'ємом, зайнятим електричним полем. Таким чином, енергія однорідного поля пропорційна об'єму, що його займає поле. Для випадку однорідного поля енергія одиниці об'єму (або об'ємна густина енергії електричного поля) дорівнює:

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (55.5)$$

? 1. За допомогою якого досліду можна переконатися, що заряджений конденсатор має енергію? 2. Напругу між пластинами конденсатора збільшили в 2 рази, не змінюючи його ємності. Як змінилась енергія конденсатора? 3. Є два однакових плоских конденсатори, але в одному з них між пластинами знаходиться слюдяна пластинка ($\epsilon = 9$), а в другому — повітря. Конденсатори зарядили до однакової напруги U . Енергія якого з них буде більшою і в скільки разів?

Вправа 19 ^ Плоский повітряний конденсатор після заряджання від'єднують від джерела напруги і занурюють у гас. Як зміниться енергія електричного поля конденсатора?

2. Конденсатор з рідким діелектриком після заряджання від'єднано від джерела напруги. Як зміниться енергія електричного поля конденсатора, якщо з нього витече рідкий діелектрик?

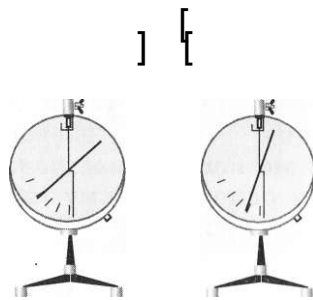
3. Яку небезпеку становлять вимкнені від джерела напруги електричні кола з конденсаторами? Що слід зробити після розмикання таких кіл?

4. Лампа фотоспалаху спрацьовує від конденсатора електроємністю $C = 800$ мкФ, зарядженого до напруги $U = 300$ В. Знайдіть енергію спалаху і середню потужність, якщо тривалість розряджання $t = 2,4 \cdot 10^{-3}$ с.

§ 56. Діелектрики в електричному полі. Діелектрична проникність

Ми з'ясували, що під час внесення провідника в електричне поле спостерігається його електризація. А як поводитиме себе діелектрик в електричному полі? Спробуємо дістати відповідь на це запитання за допомогою дослідів.

Надамо електрометру певного заряду q , помітивши кут відхилення його стрілки, наблизимо до кульки електрометра незаряджений діелектрик. Показання електрометра трохи зменшуються. Якщо віддалити діелектрик, стрілка електрометра повернеться в попереднє положення. Результат дослідів не залежить від того, був електрометр заряджений позитивно чи негативно. Відхилення стрілки буде дещо більшим, якщо



Мал. 116

результаті заряд протилежного знака, який знаходиться на повернутому до електрометра кінці діелектрика, притягує чи відштовхує електрони, які є на стержні електрометра, що й викликає зменшення показань електрометра. У разі віддалення діелектрика попередній розподіл електронів відновлюється.

Таким чином, у діелектриках, як і в провідниках, спостерігається індукція електричних зарядів. Однак, якщо за наявності зарядженого тіла розділити діелектрик на дві частини, ми не дістанемо двох шматків, заряджених різноманітньо. В цьому відмінність індукції в діелектриках від індукції в провідниках. Як же пояснити електризацію діелектриків в електричному полі?

В ідеальних діелектриках немає вільних частинок (електронів). Різноманітні заряди, що входять до складу молекул діелектрика, компенсують один одного, і в цілому молекули електронейтральні. Наведення в діелектрику електричних зарядів може означати лише їх перерозподіл у межах об'єму, що його займає атом чи молекула.

Молекули багатьох діелектриків складаються з йонів (як, наприклад, молекула води, яка містить негативний йон Оксигену і два позитивних йони Гідрогену). Центри позитивних і негативних електричних зарядів таких молекул звичайно зміщені один відносно одного, утворюючи полярну молекулу, або так званий *диполь* (мал. 117). Навколо молекули-диполя утворюється електричне поле, хоча вона має однакові позитивний і негативний заряди.

ЙЙ ШШ, чи • ж - Ш

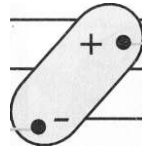
i

Мал. 117

замість кульки закріпити на стержні електрометра невелику металеву пластинку і до неї наблизити пластинку діелектрика (мал. 116).

Результати досліду можна пояснити наведенням (індукцією) в діелектрику електричних зарядів під час його наближення до зарядженого тіла. При цьому на кінці діелектрика, повернутому до електрометра, виникає заряд, протилежний за знаком зарядові електрометра. В

Діелектрики, які складаються з молекул-диполів, називаються *полярними діелектриками*. В нормальному стані диполі-молекули розміщені хаотично (мал. 118) і їх поля взаємно послаблюють одне одного, тому поза діелектриком поле не виявляється.



(+ 3 : (ТЗ: (^ ' (±3 -. c±3 ' .

(E ^ . (±3 : < E3 C±3-

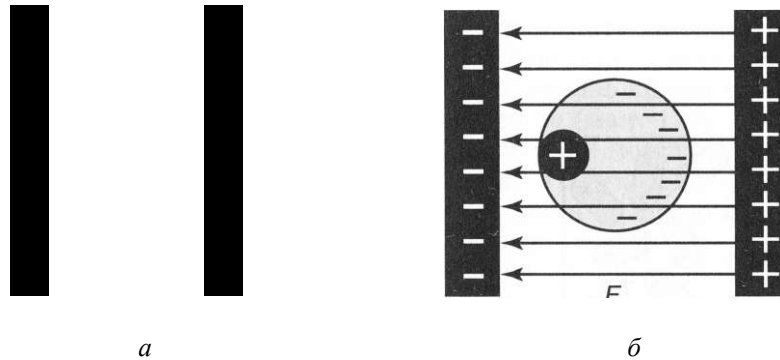
Мал. 118

Мал. 119

Внаслідок накладання електричного поля на кожен молекулу-диполь діє пара сил (мал. 119, а) і молекула розміщується вздовж ліній напруженості поля (мал. 119, б). Це явище називають *поляризацією діелектрика*. Хаотичний тепловий рух молекул порушує впорядковане розташування диполів, тому відносна кількість диполів-молекул, орієнтованих вздовж поля, зростає зі збільшенням напруженості поля і з пониженням температури. В результаті на одній поверхні діелектрика виникає негативний поляризаційний заряд, а на другій — позитивний.

Молекули деяких діелектриків не містять йонів (як, наприклад, молекула водню). Якщо зовнішнього електричного поля немає, центри позитивних і негативних зарядів молекул збігаються. Ці молекули дістали назву неполярних, а діелектрики, які складаються з них, називають *неполярними діелектриками*. Під час внесення такого діелектрика в електричне поле центри зарядів його молекул зміщуються в протилежні боки, молекули перетворюються на диполі (мал. 120) і орієнтуються вздовж ліній напруженості. В результаті на одній поверхні діелектрика виникає негативний поляризаційний заряд, а на другій — позитивний.

У багатьох рідких і газоподібних діелектриках ці два фактори поляризації можуть поєднуватися між собою. Так, у багатьох полярних діелектриках молекули-диполі не тільки орієнтуються під впливом поля, а й деформуються.

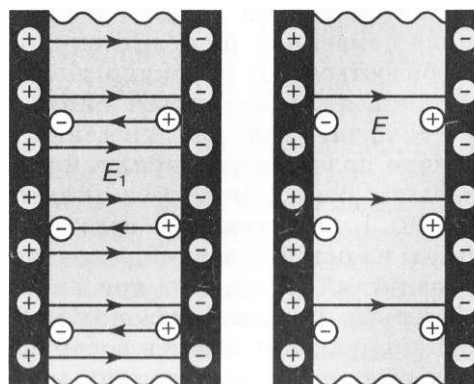


Мал. 120

Отже, діелектрик, вміщений в електричне поле, поляризується. Електричне поле поляризаційних зарядів завжди спрямоване назустріч зовнішньому полю, тому зовнішнє поле всередині діелектрика послаблюється (але не компенсується повністю, як це буває у випадку, коли в нього внесено провідник), а поблизу діелектрика поле спотворюється.

Нехай між двома паралельними пластинами у вакуумі створене електричне поле напруженістю E_0 . Заповнимо простір між пластинами однорідним діелектриком. Під дією поля він поляризується і на межі з пластинами виникають поляризаційні заряди (мал. 121), які створюють електричне поле напруженістю E^{\wedge} . Модуль напруженості результуючого поля становитиме $E = E_0 - E_x$. Таким чином, напруженість результуючого поля в діелектрику менша за напруженість поля, створеного вільними зарядами.

Діелектрики в даному зовнішньому полі поляризуються по-різному, і про ступінь поляризованості даного діелектрика

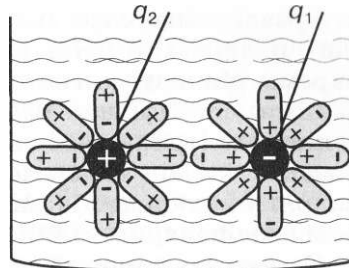


Мал. 121

завжди можна судити за відношенням

(56.1)

А це вже відома нам відносна діелектрична проникність речовини. Вона залежить від природи діелектрика і його стану і показує, у скільки разів напруженість результуючого поля в однорідному ізотропному діелектрику менша за напруженість поля у вакуумі.



Мал. 122

Із (56.1) видно, що ϵ — безрозмірна величина і для діелектриків завжди більша за одиницю.

Тепер можна пояснити, чому сила взаємодії електричних зарядів зменшується в діелектрику (що враховувалось введенням множника ϵ у знаменник формули закону Кулона). Якщо точкові заряди знаходяться в діелектрику, то останній поляризується (мал. 122). Біля поверхні позитивно зарядженого тіла розміщуються негативні заряди молекулярних диполів навколишнього середовища, а біля поверхні негативно зарядженого тіла — позитивні. Це веде до деякого зменшення напруженості поля порівняно з напруженістю поля цього самого заряду у вакуумі та зменшення сили взаємодії між зарядами, які перебувають у діелектрику (порівняно з силою взаємодії між зарядами у вакуумі).

? 1. У чому відмінність електризації через вплив для діелектриків і для провідників? 2. Чому продовгуваті шматочки діелектрика в електричному полі встановлюються вздовж ліній його напруженості? 3. У чому полягає фізичний зміст діелектричної проникності речовини? 4. Як пояснити послаблення взаємодії між зарядженими тілами в діелектрику порівняно із взаємодією між цими самими тілами у вакуумі?

§ 57. Сегнетоелектрики і електрети

Деякі діелектрики за певної температури набувають великих значень діелектричної проникності. Спочатку таку властивість було виявлено у кристалів сегнетової солі, і тому всі діелектрики цього типу дістали назву сегнетоелектриків. Діелектрична проникність сегнетової солі може перевищувати діелектричну проникність вакууму в кілька тисяч разів. Вона помітно змінюється зі зміною напруженості зовнішнього електричного поля.

Аномально велика діелектрична проникність сегнетоелектриків зумовлена виникненням у цих речовин у певному

інтервалі температур сильно вираженої самовільної (спонтанної) поляризації. Навіть за відсутності зовнішнього поля окремі ділянки сегнетоелектрика виявляються поляризованими, але в різних напрямках. Тому в цілому весь кристал сегнетоелектрика поводить себе так, ніби він зовсім не поляризований. Під дією електричного поля відбувається зміна напрямку поляризації (зміна орієнтації) окремих, вже до цього повністю поляризованих ділянок сегнетоелектрика.

Сегнетоелектричні властивості значною мірою залежать від температури. За певної температури, різній для різних речовин, сегнетоелектричні властивості зникають і сегнетоелектрик перетворюється у звичайний діелектрик.

Сегнетоелектрики знаходять велике практичне застосування. Зокрема, вони використовуються для виготовлення конденсаторів великої електроємності, генераторів і приймачів ультразвукових хвиль та інших радіотехнічних пристроїв.

Серед твердих діелектриків існує група речовин, які можуть тривалий час зберігати наелектризований стан (бути поляризованими) і за відсутності зовнішнього електричного поля. Ці речовини дістали назву електретів. Подібні властивості мають ряд органічних (парафін, бджолиний віск, нейлон, ебоніт тощо) і неорганічних (сірка, борне скло тощо) речовин.

Електрети знайшли застосування в техніці як джерела постійного електричного поля, зокрема в електрографії.

§ 58. Електризація на виробництві і в побуті

Електризація тіл — надзвичайно поширене явище, і ми зустрічаємося з ним не тільки у фізичних лабораторіях, а й щоденно в побуті і на виробництві. В сухий зимовий день, коли в повітрі мало водяної пари, ви знімаєте нейлонову сорочку, а вона буквально прилипає до тіла, до рук, навколишніх предметів, оскільки внаслідок зіткнення з тілом електризується.

Ви пройшлися по сухому шерстяному килиму, а потім піднесли руку до металевої дверної ручки або іншого металевого предмета і відчули легкий удар. Це стався електричний розряд між вашим тілом, яке зарядилося під час зіткнення з килимом, і металевим предметом.

Але якщо в побуті електризація тіл чинить в основному дрібні неприємності, то у виробничих умовах численні прояви електризації тіл ускладнюють багато технологічних процесів, є причинами браку, аварій, часто загрожують здоров'ю і життю людей. Так, у текстильній промисловості електризація ниток призводить до їх взаємного відштовхування, розщеп-

лення, притягування (прилипання) до поверхні роликів і веретен. Крім того, заряджена тканина або пряжа притягує до себе легенькі дрібні предмети і тим самим забруднюється. У сухому повітрі дуже сильно електризуються аркуші паперу на поліграфічних підприємствах, аркуші злипаються і рвуться у процесі розділення, притягують до себе дрібні нитки, ворсинки, шматочки паперу, що також веде до браку. До того ж між зарядженою тканиною чи аркушем паперу та іншими предметами може відбутися електричний розряд, що може стати причиною виникнення пожежі.

Багато клопоту завдає електризація тіл в авіації. Під час польоту поблизу грозових і заряджених хмар або внаслідок тертя об повітря відбувається електризація обшивки літака, що спричиняє порушення радіозв'язку і спотворення показань електровимірвальних приладів. Після посадки літака не можна зразу ж приставляти до нього металевий трап, оскільки може статися електричний розряд і виникнути пожежа. Спочатку літак «розряджають»: опускають на землю металевий трос, з'єднаний з обшивкою літака, і розряд відбувається між землею і кінцем троса. Найбільші неприємності в авіації завдає електризація палива. Під час заправки літака чи ракети виникає електризація пального внаслідок його руху у трубопроводах, що може призвести до іскрового розряду і загоряння палива. Так само під час заповнення нафтоналивних суден (танкерів) електризація палива також може спричинити пожежу.

Чи є способи і засоби боротьби з електризацією тіл на виробництві і в побуті? Безумовно, є. Технологи добре їх знають. Це насамперед ретельне заземлення верстатів, машин, застосування струмопровідних пластиків для підлог, зволоження повітря, використання різного роду нейтралізаторів або антистатів (залежно від умов виробництва — індукційних, радіоізотопних, електроаерозольних тощо).

Досить дотепний і простий спосіб боротьби з електризацією тіл від дотику застосовують у текстильній промисловості. Він полягає у підведенні до тіла, яке електризується, зарядів протилежного знака. Якщо нитка заряджається, наприклад, негативним зарядом, нею відразу ж треба доторкнутися до тіла, від дотику з яким на нитці утворюються заряди протилежного знака. Саме з цих міркувань водії волокон на ткацьких верстатах виготовляють звичайно зі скла або сталі.

Досить просто розв'язується завдання нейтралізації електричних зарядів, які виникають внаслідок руху бензовозів. Ви, напевне, не один раз бачили, що за бензовозами завжди тягнеться невеликий шматок металевого ланцюга. Це не халатність водія, а прагнення запобігти небезпечному нагро-

мадження електричних зарядів. Від руху по асфальтованому шосе гумові покришки коліс електризуються і за значного нагромадження зарядів може статися розряд між землею й корпусом бензовоза, спричиняючи вибух бензину. Металевий ланцюг сприяє стіканню зарядів у землю. На легкових автомобілях із цією метою прикріплюють смужку провідної гуми.

У домашніх умовах можна усунути електризацію, підвищивши відносну вологість повітря в квартирі до 60—70 % (за допомогою, наприклад, електричних зволожувачів), натираючи підлогу спеціальною антистатичною мастикою.

Явище електризації тіл під час їх дотику завдає людям багато шкоди. Але часто це явище використовується в техніці. Так, явище притягання легеньких дрібних предметів наелектризованими тілами використовується в будові електричних фільтрів для очищення диму від дрібних частинок попелу, які забруднюють територію навколо теплових електростанцій і великих заводів. Для цього у димоході встановлюють сітку, якій надають певного електричного заряду. Від проходження крізь сітку частинки попелу електризуються і притягуються до великих металевих пластин, оскільки на них подається заряд протилежного знака або їх заземлюють. Осілий на пластини попіл потім зчищають.

Електрофільтри обов'язково встановлюють у цехах, де розмелюють цемент і фосфорити, на хімічних заводах. Одночасно з очищенням повітря такі пристрої не допускають даремних втрат цінних речовин.

Добре зарекомендував себе метод фарбування деталей в електричному полі. Між розпилювачем фарби і деталлю, яку фарбують, створюють електричне поле. Для цього до розпилювача приєднують один полюс високовольтного електричного генератора, а до деталі — другий полюс. Під час розпилювання дрібні краплинки фарби набувають електричного заряду, рухаються під дією електричного поля до деталі і рівномірно покривають її поверхню тонким шаром фарби. За допомогою електричного поля, наприклад, фарбують кузови автомобілів.

На цьому самому принципі ґрунтується виготовлення за допомогою електричного поля килимів, штучного хутра, замші, декоративних матеріалів для оббивки меблів (способом нанесення текстильного настригу або ворсу певної довжини на виріб). Тільки електричні заряди надають не крапелькам фарби, а ворсинкам. Заряд протилежного знака подається на покриття клеєм основу виробу. Під дією електричного поля заряджені ворсинки рухаються до основи і втикаються в шар клею. Готовий матеріал залишається тільки висушити.

Рух заряджених частинок фарби в електричному полі використовують у електрографії, яка дає змогу швидко розмножувати креслення, графіки, друкований текст, фотографу-

вати з екранів телевізійних трубок, реєструвати вихідні дані швидкодіючих обчислювальних машин. Як один з методів електрографії особливо широко застосовується ксерографія.

Її суть полягає у тому, що спочатку поверхню спеціальної селенової пластинки заряджають додатним зарядом. Під час експонування промені світла роблять селен провідним. У точках, на які падає багато світла, поверхневий заряд зникає, а у погано освітлених точках,— залишається. На селеновій пластинці утворюється заряджене, але ще невидиме зображення предмета. Сухе проявлення цього зображення полягає в тому, що пластинку посипають порошком фарби, який налипає лише на заряджені місця і робить приховане зображення видимим. Потім на селенову пластинку обережно кладуть аркуш звичайного білого паперу і поміщають її в електростатичне поле. Під дією поля частина фарби переноситься на папір. Аркуш паперу знімають, а щоб фарба не розмазалася, її закріплюють парами ацетону. Копія готова. З однієї експонованої селенової пластинки можна одержати багато копій.

Висновки

Сила взаємодії двох точкових електричних зарядів прямо пропорційна добутку зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними (закон Кулона):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

В електрично ізольованій системі за будь-яких взаємодій тіл алгебраїчна сума електричних зарядів усіх тіл залишається сталою (закон збереження заряду).

У просторі навколо електричного заряду завжди існує незалежно від того, чи знаходяться в ньому пробні заряди чи ні, нерозривно зв'язане з цим зарядом електричне поле. Виявити існування електричного поля можна лише за силою, з якою воно діє на вміщені в нього електричні заряди.

Силовою характеристикою поля є напруженість поля E — величина, яка вимірюється силою F , що діє на одиничний позитивний заряд, уміщений в дану точку поля: $E =$

Напруженість результуючого поля двох чи кількох точкових зарядів визначається векторною сумою напруженостей, створюваних у тій чи іншій точці кожним зарядом окремо (принцип суперпозиції).

У будь-якому зарядженому провіднику заряди розміщуються на зовнішній поверхні.

Робота з переміщення заряду в однорідному електричному полі не залежить від форми траєкторії, якою рухається

заряд, а залежить лише від положення початкової і кінцевої точок у полі.

Відношення потенціальної енергії внесеного в електричне поле заряду до значення цього заряду приймається за енергетичну характеристику поля (потенціал): $\varphi =$

Напруга між двома точками поля дорівнює відношенню роботи поля на переміщення заряду з початкової точки в кінцеву до значення цього заряду.

Напруженість однорідного електричного поля визначається за формулою $E = \frac{V}{d}$, де V — напруга між двома точками вздовж однієї лінії напруженості на малій відстані d одна від одної.

Електроємністю віддаленого провідника називають величину, що дорівнює відношенню електричного заряду, наданого провідникові, до його потенціалу: $C = \frac{Q}{\varphi}$. Електроємність не

залежить від роду речовини і маси провідника, а залежить від його розмірів і форми.

Електроємність плоского конденсатора прямо пропорційна робочій площі пластин та відносній діелектричній проникності діелектрика ϵ і обернено пропорційна відстані між пластинами d : $C = \frac{\epsilon S}{d}$.

C

Енергія електричного поля зарядженого конденсатора прямо пропорційна добутку його електроємності на квадрат напруги між пластинами: $W = \frac{1}{2} C U^2$. Енергію електричного

поля конденсатора можна обчислити також за формулами:

$$W = \frac{1}{2} Q U = \frac{1}{2} C U^2$$

Густина енергії електричного поля прямо пропорційна квадрату напруженості цього поля: $w = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2$.

Вміщений в електричне поле діелектрик поляризується, і електричне поле поляризаційних зарядів завжди спрямоване назустріч зовнішньому полю, тому зовнішнє поле всередині провідника послаблюється.

ЗАКОНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

§ 59. Умови існування електричного струму

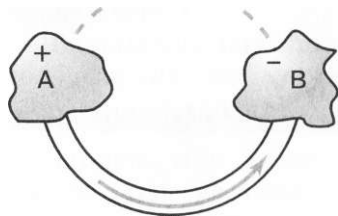
У попередньому розділі розглядалися електричні явища, в яких електричні заряди перебували в спокої. Однак найбільший практичний інтерес становлять явища, пов'язані з упорядкованим рухом електричних зарядів. Упорядкований рух електричних зарядів називається електричним струмом. У цьому розділі йтиметься про постійний електричний струм. *Постійним електричним струмом називають упорядкований рух електричних зарядів з постійною швидкістю.* За напрям струму умовно обрано напрям руху позитивних зарядів. Для тривалого існування у речовині електричного струму необхідні дві умови — наявність вільних заряджених частинок і сил, які діють на ці частинки у певному напрямі. Електричне поле всередині провідника є причиною спрямованого руху заряджених частинок і підтримує його. Якщо всередині провідника існує електричне поле, то між кінцями провідника є різниця потенціалів.

Електричне поле діє на заряджені частинки з силою $E - dE$.

Щоб струм через провідник був тривалим, цей провідник має бути замкнутим. У протилежному випадку заряди нагромаджуватимуться на кінцях провідника, відштовхуватимуть наступні однойменно заряджені частинки і струм припиниться.

Якби рухомі заряджені частинки у провіднику не взаємодіяли з іншими зарядженими частинками, після приведення їх у рух вони продовжували б його як завгодно довго. Такий струм можна спостерігати в деяких металах за дуже низьких температур, близьких до абсолютного нуля. Опір таких металів — їх називають надпровідниками — дорівнює нулю.

Нехай є два різнойменно заряджені тіла A і B . З'єднаємо ці тіла провідником (мал. 123). Тоді позитивний заряд під дією



Мал. 123

електричного поля переміщатиметься в напрямі, вказаному стрілкою, а негативний — у протилежному напрямі, і провідником йтиме струм. Переміщення зарядів відбуватиметься лише доти, поки різниця потенціалів між тілами не дорівнюватиме нулю. Одночасно зникне і електричне поле в провіднику, яке виконувало роботу з переміщення зарядів. Після цього

струм у провіднику припиниться.

Щоб струм не припинявся, треба щоб позитивні заряди, які переміщалися на тіло *B* з тіла *A*, знову повернулися на тіло *A*, наприклад по шляху *BA*, вказаному пунктиром, тобто, щоб заряди рухалися проти діючих електростатичних (кулонівських) сил. Для цього на заряди мають діяти зовнішні (сторонні) сили, спрямовані протилежно до електростатичних сил. Пристрій з двох заряджених тіл (електродів), між якими підтримується постійна напруга, а внаслідок цього у провіднику, що сполучає ці тіла, діє постійне електричне поле, називають *джерелом струму*. Такими джерелами струму є електрогенератори електростанцій, гальванічні елементи, акумулятори тощо.

? 1. За яких умов може тривалий час існувати електричний струм у речовині? 2. Обидва кінці провідника мають однаковий потенціал. Чи проходить струм по цьому провіднику? 3. Між кінцями провідника підтримується постійна різниця потенціалів. Який струм проходить у провіднику? 4. Яке призначення джерел струму?

§ 60. Закон Ома для ділянки кола з послідовним і паралельним з'єднанням провідників

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що сила струму на ділянці кола прямо пропорційна прикладеній напрузі і обернено пропорційна опоріві цієї ділянки: $I = \frac{U}{R}$. Вперше цю за-

лежність сили струму від напруги й опору встановив у 1827 р. німецький вчений Г е о р г О м. На його честь її називають *з а к о н о м О м а* для ділянки кола. На малюнку 124 показано графіки залежності сили струму від напруги для трьох різних металевих провідників. Звичайно такі графіки називають *вольтамперними характеристиками* провідника.

ГЕОРГ СІМОН
ОМ
(1787—1854)



Видатний німецький фізик. Відкрив закон залежності сили струму від напруги для ділянки кола, а також закон, що визначає силу струму в замкнутому колі. Крім того, він знайшов залежність опору від довжини провідника і площі його поперечного перерізу.

Іноді формулу закону Ома записують так:

$$V = IE_V$$

добуток IV називають *спадом напруги* на даній ділянці кола. Якщо вона не містить джерела струму, то поняття напруги і спаду напруги збігаються.

Електрична енергія від джерела струму передається по проводах споживачам: електродвигунам, лампам, нагрівальним приладам, телевізорам, радіоприймачам тощо. За допомогою з'єднувальних провідників і вимикачів в електричне коло часто вмикають також вимірювальні прилади: амперметри, вольтметри, омметри, лічильники електричної енергії тощо. Найпростішими типами з'єднань споживачів є відомі вам з курсу фізики 8-го класу послідовне і паралельне з'єднання.

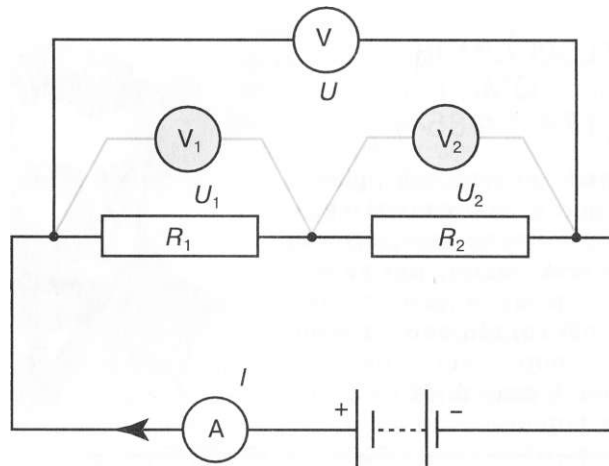
Пригадаємо, як застосовується закон Ома для обчислення опору послідовно і паралельно з'єднаних провідників, сили струму в окремих провідниках і напруги на них.

Послідовне з'єднання провідників. Послідовне з'єднання двох споживачів зображене на малюнку 125. Це можуть бути i електроплитки, лампи, обмотки електродвигуна тощо. Сила струму в обох провідниках однакова. Відповідно до закону Ома запишемо:

$$I_x = IE_1 \text{ і } I_x = IB_2, \text{ звідси } I_x = \frac{E_k}{Y_1 + Y_2} \text{ (} Y_1 < Y_2 < Y_3 \text{) а}$$

Таким чином, у разі послідовного з'єднання провідників напруга на

Мал. 112



Мал. 125

кожному з них пропорційна його опорі. Цей висновок справедливий для довільної кількості з'єднаних послідовно провідників.

Напруга на кінцях ділянки кола, яка складається з двох послідовно з'єднаних провідників з опорами E_1 і B_2 , дорівнює сумі напруг на першому і другому провідниках:

$$V = \quad + c/2 = IK_X + IB_2 = I(E_1 + B_2).$$

Позначимо загальний опір ділянки кола, яка складається з двох послідовно з'єднаних провідників, через B . За законом Ома,

$$V = IB.$$

Прирівнявши праві частини останніх двох рівностей, дістанемо:

$$B = B_1 + B_2.$$

Звідси можна зробити висновок, що у разі послідовного з'єднання провідників загальний опір ділянки кола дорівнює сумі опорів провідників. Цей висновок також справедливий для довільної кількості з'єднаних послідовно провідників.

Для вимірювання сили струму амперметр вмикають у коло послідовно з тим споживачем, силу струму в якому треба виміряти, і через нього проходить весь вимірюваний струм. Але амперметр має певний опір B_a і його вмикання веде до зменшення сили струму в колі. Щоб ці зміни сили струму були незначними, амперметр повинен мати дуже малий опір порівняно з опором споживача.

Задача 1. Три провідники, опори яких $E_x = 10$ Ом, $H_2 = 20$ Ом і $B_3 = 30$ Ом, з'єднані послідовно і ввімкнені у мережу зі сталою напругою $\Pi = 120$ В. Визначити загальний опір і спад напруги на кожному з опорів.

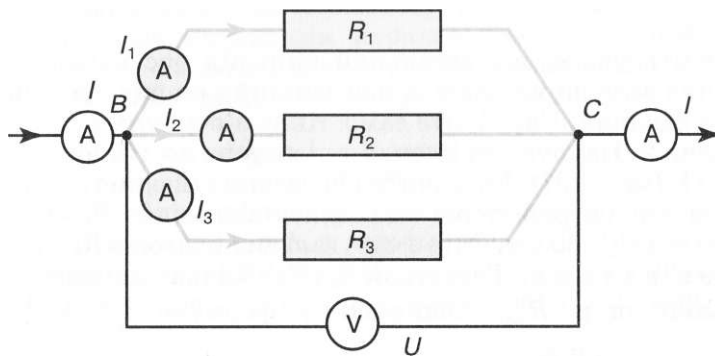
Розв'язання. Загальний опір кола $K = B_2 + B_2 + B_3 = 60$ Ом. Сила струму в колі $I = \frac{\Pi}{K} = 2$ А. Спади напруги на окремих провідниках: $U_1 = IE_1 = 20$ В; $U_2 = IB_2 = 40$ В і $U_3 = IB_3 = 60$ В.

Паралельне з'єднання провідників. У разі послідовного з'єднання споживачів вихід з ладу одного з них веде до розмикання кола. На практиці значно частіше споживачів з'єднують паралельно. Паралельно підключають до мережі електродвигуни верстатів у цехах заводів і фабрик, електродвигуни трамваїв, усі побутові прилади. Ознакою паралельного з'єднання провідників є розгалуження електричного струму. Електричний струм I у з'єднанні групи провідників з опороми B_1, B_2 і B_3 (мал. 126) розгалужується на три частини I_1, I_2 і I_3 . У точці С, де сходяться три провідники (таку точку називають вузлом), електричний заряд нагромаджуватися не може, отже, із закону збереження заряду випливає, що сила струму I дорівнює сумі сил струмів I_1, I_2 і I_3 :

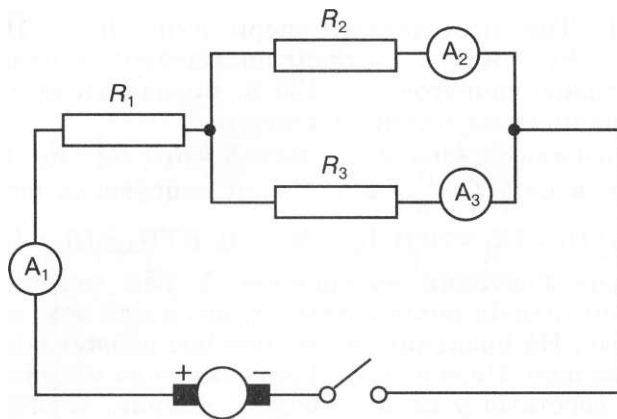
$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Напруга Π на всіх провідниках однакова, тому можна записати: $\Pi = I_1 B_1 = I_2 B_2 = I_3 B_3$, звідси $I_1 = \frac{\Pi}{B_1}, I_2 = \frac{\Pi}{B_2}, I_3 = \frac{\Pi}{B_3}$.

Таким чином, у разі паралельного з'єднання провідників сили струму в окремих провідниках обернено пропорційні їх опорам.



Мал. 112



Мал. 127

Щоб визначити загальний опір ділянки BC , яка містить три паралельно з'єднані провідники з опороми B_1 , B_2 і B_3 , запишемо:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

Позначивши загальний опір розгалуження BC через R , на основі закону Ома можна записати:

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

Прирівнявши праві частини останніх рівностей, дістанемо:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Таким чином, **величина, обернена до загального опору паралельного з'єднання провідників, дорівнює сумі величин, обернених до опорів окремих провідників.** Цей висновок справедливий для довільної кількості паралельно з'єднаних провідників.

Зверніть увагу, що загальний опір під час паралельного з'єднання завжди менший за найменший з опорів провідників цього з'єднання. Спробуйте самостійно з'ясувати чому.

Задача 2. Напруга на клеммах генератора постійного струму U - 240 В (мал. 127). Визначити показання амперметрів A_1 , A_2 і A_3 , якщо опори резисторів становлять відповідно R_1 - 10 Ом, $R_2 = 30$ Ом і $R_3 = 60$ Ом. Опір з'єднувальних проводів $r = 20$ Ом.

Розв'язання. Резистори R_2 і R_3 з'єднані паралельно, їх загальний опір $R_{\text{заг}}$ знайдемо з формули $\frac{1}{R_{\text{заг}}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$ звідси $R_{\text{заг}} = 20$ Ом. Загальний опір всього кола

+ 0-



- 0 -

Мал. 128

Мал. 129

$H = B_r + B_{\text{зат}} + i?_4 = 50 \text{ Ом}$. Сила струму в нерозгалуженій частині кола, яку показує амперметр A_{19} дорівнює: $A = I = 4,8 \text{ А}$.

Сили струму, що їх показують амперметри A_2 і A_3 , обернено пропорційні опорам резисторів B_2 і B_3 , тобто $I_3 = \frac{I B_2}{B_3}$. З другого боку, $I_1 = I_2 + I_3$. З цих двох рівнянь $I_2 = \frac{P}{\dots} = 3,2 \text{ А}$ і $I_3 = 7x \wedge / 2 = 1,6 \text{ А}$.

Для вимірювання напруги на ділянці кола до неї паралельно підключають вольтметр (мал. 128). Напруга на вольтметрі збігається з напругою на ділянці кола. При цьому частина струму відгалужується у вольтметр, внаслідок чого зменшується сила струму в ділянці кола (за незмінної сили струму в нерозгалуженому колі). В результаті цього вимірювана напруга на ділянці кола зменшиться. Щоб зробити ці зміни незначними, опір вольтметра має бути в багато разів більшим за опір ділянки кола, на якій вимірюється напруга.

Задача 3. Зашунтований амперметр вимірює струми силою до $I = 10 \text{ А}$. Яку найбільшу силу струму може виміряти цей амперметр без шунта, якщо опір амперметра $B_a = 0,02 \text{ Ом}$, опір шунта $B_{\text{ш}} = 0,005 \text{ Ом}$?

Розв'язання. Як відомо, шунт вмикається паралельно амперметру. За правилами паралельного з'єднання опорів спади напруги на шунті й амперметрі однакові: $C_{\text{ш}} = C_{\text{а}}$ або $I_{\text{ш}} B_{\text{ш}} = I_{\text{а}} B_{\text{а}}$. Крім того, $I = I_{\text{а}} + I_{\text{ш}}$. З цих рівнянь

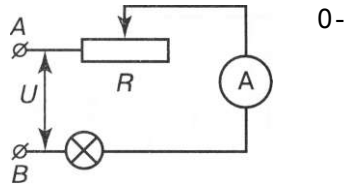
$$4 = I \quad = 2 \text{ А}$$

Задача 4. Визначити опір резистора B (мал. 129), якщо амперметр показує $I = 5 \text{ А}$, а вольтметр $V = 100 \text{ В}$. Внутрішній опір вольтметра $z = 2500 \text{ Ом}$. Якою буде похибка у визначенні B , якщо під час розрахунків знехтувати струмом через вольтметр?

Розв'язання. Сила струму в колі $I = I_r + I_b$, де I_x — сила струму, що проходить через резистор B , а I_b — сила струму через

VI

я



Мал. 130

Мал. 131

Мал. 132

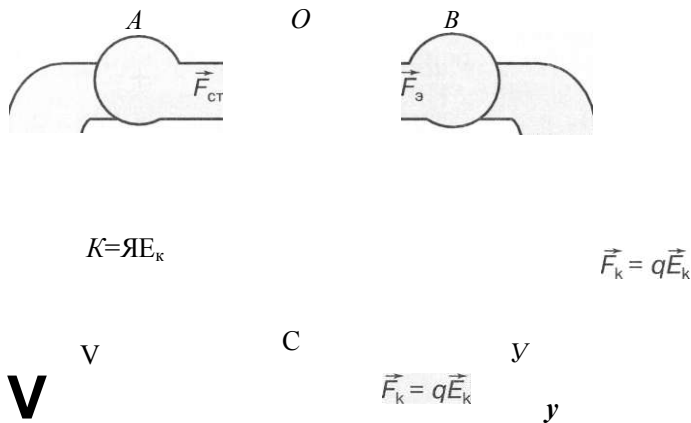
вольтметр. Показання вольтметра $\Pi = \dots = /_{вг}$. Звідси справжнє значення опору $B = \dots = \dots \ll 20 \text{Дб Ом}$. Якщо силою струму $I_{в}$ знехтувати, то $\dots = y = 20 \text{ Ом}$. Абсолютна похибка у визначенні B : $\Delta B = B - B_i$, а відносна $\frac{\Delta B}{B} = \frac{B - B_i}{B} = \dots \S = 0,08$, або 8 %.

? 1. Три провідники з опорами B , $2B$ і $3B$ увімкнули в коло послідовно. Чи однакою є сила струму, що проходить по цих провідниках? 2. Як розподіляється напруга на провідниках у разі їх послідовного з'єднання? 3. Чому дорівнює загальний опір послідовного з'єднання провідників? 4. Як розподіляється сила струму в провідниках, з'єднаних паралельно? 5. Чи однакову напругу показують вольтметри і V_2 (мал. 130)? 6. Чому дорівнює загальний опір n однакових провідників, з'єднаних паралельно?

Вправа 20 1. Під час послідовного вмикання у мережу трьох резисторів з опорами $B_1 = 4 \text{ Ом}$, $B_2 = 6 \text{ Ом}$ і $B_3 = 10 \text{ Ом}$ в ній проходить струм силою $I = 5 \text{ А}$. Визначте напругу в мережі і спад напруги на кожному резисторі.
 2. Який опір повинен мати шунт, щоб за допомогою амперметра з опором $r = 0,006 \text{ Ом}$, розрахованим на максимальну силу струму $I_{ш} = 10 \text{ А}$, вимірювати силу струму 160 А ?
 3. Визначте опір реостата і лампочки (мал. 131), якщо найменше і найбільше значення сили струму в колі $I_1 = 1,5 \text{ А}$ і $I_2 = 2,5 \text{ А}$. Напруга на клеммах AB постійна і дорівнює $U = 12 \text{ В}$.
 4. Шкільний вольтметр, приєднаний паралельно до лампочки від кишенькового ліхтаря (мал. 132), опір якої $B = 12 \text{ Ом}$, показав, що $V = 3,6 \text{ В}$. Опір вольтметра $B_v = 80 \text{ Ом}$. Які показання амперметра?

§ 61. Електрорушійна сила

Переміщення заряджених частинок у провіднику відбувається лише за наявності різниці потенціалів між окремими його ділянками. Очевидно, кулонівські сили не можуть бути причиною виникнення тривалого електричного струму, ос-



Мал. 133

кільки вони швидко приводять вільні заряди до стану статичної рівноваги, за якої напруженість електричного поля в провіднику дорівнює нулю, а потенціали всіх точок провідника однакові. Тому для підтримання в колі електричного струму тривалий час потрібно, щоб на вільні заряди діяли неелектростатичні, так звані сторонні сили.

Пригадаємо, що робота сил електростатичного поля під час переміщення заряду по замкнутому контуру дорівнює нулю. Це означає, що коли в замкнутому колі на заряджені частинки діють тільки електростатичні (кулонівські) сили, то роботу за допомогою струму одержати не можна. Отже, в електричному колі має бути хоча б одна ділянка, в якій на рухомі носії зарядів, крім кулонівських сил, діяли б ще якісь інші сили, здатні виконувати роботу на переміщення цих зарядів.

Нехай є два заряджені провідники *A* і *B* (мал. 133), причому потенціал провідника *A* вищий за потенціал провідника *B*. Якщо з'єднати їх провідником *ACB*, то позитивно заряджені носії зарядів під дією кулонівських сил рухатимуться провідником від *A* до *B*. Однак це переміщення дуже швидко припиниться, оскільки потенціали провідників *A* і *B* зрівняються. Щоб зробити переміщення зарядів тривалим, необхідно позитивні заряди з провідника *B* якимсь чином перенести знову на провідник *A*, наприклад за допомогою провідника *BBA*. Але таке переміщення зарядів не може відбуватися самовільно, оскільки кулонівські сили діють на них у протилежному напрямі.

Отже, на ділянці кола *BA* на заряди мають діяти якісь сторонні сили $F_{ст}$, спрямовані проти кулонівських сил і більші за значенням. Тоді на ділянці *ACB* заряди переміщува-

тимуться під дією кулонівських сил від А до Б, а на ділянці БІМ — під дією сторонніх сил від Б до А і таким чином у колі йтиме електричний струм.

Пристрої, які забезпечують виникнення таких сторонніх сил, називають *джерелами електричної енергії*, або *джерелами струму*. Принцип дії всіх цих пристроїв полягає в тому, що в них за рахунок енергії неелектричного походження (в гальванічних елементах і акумуляторах — енергії хімічних реакцій, в електрогенераторах — механічної енергії) відбувається розділення позитивних і негативних зарядів і переміщення позитивних електричних зарядів до позитивного полюса джерела струму, а негативних — до негативного (тобто в напрямі, протилежному напрямові кулонівських сил), і між полюсами джерела створюється електричне поле з певною різницею потенціалів. Таким чином, в результаті розділення всередині джерела позитивних і негативних зарядів джерело набуває запасу потенціальної енергії, який витрачається на виконання роботи з переміщення зарядів по всьому колу.

Залежно від внутрішньої будови джерел між їхніми полюсами створюються електричні поля різної величини, тобто джерела мають різні запаси потенціальної енергії і можуть виконати різну роботу щодо переміщення даного заряду замкнутим колом. Якщо взяти відношення роботи до заряду, переміщуючи його, то таке відношення є сталою величиною і характеризує джерело. Це відношення звичайно позначають

$$\mathcal{E} = \quad (61.1)$$

і називають *електрорушійною силою джерела* (ЕРС).

Отже, електрорушійною силою називають фізичну величину, яка вимірюється роботою, затрачуваною джерелом струму на переміщення одиничного позитивного заряду у замкнутому колі.

Оскільки в СІ робота вимірюється джоулями, а заряд — кулонами, одиницею ЕРС є $\frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}$, тобто вольт.

Внаслідок розділення позитивних і негативних зарядів у джерелі створюється електричне поле з різницею потенціалів між полюсами $\mathcal{E}_{\text{др}}$. У розімкнутому джерелі розділення зарядів відбувається доти, поки створене електричне поле не зрівноважить дію сторонніх сил. При цьому різниця потенціалів досягає найбільшого можливого значення. Можна довести, що різниця потенціалів $\mathcal{E}_{\text{др}}$ на полюсах розімкнутого джерела дорівнює ЕРС цього джерела.

Отже, електрорушійну силу джерела можна розглядати як найбільшу енергію, яку воно може в результаті хімічних чи будь-яких інших процесів передати кожному з розділених

зарядів. Якщо ці заряди перебувають у спокої (у випадку розімкненого джерела), то вони мають найбільший запас потенціальної енергії, різниця потенціалів на полюсах джерела максимальна і дорівнює його ЕРС. Якщо ж джерело замкнуте на зовнішнє електричне коло, заряди починають рухатися, набуваючи якоїсь кінетичної енергії.

Оскільки електрорушійна сила вимірюється роботою на переміщення одиничного позитивного заряду, вона є скалярною фізичною величиною і може бути як додатною, так і від'ємною.

? 1. Чи може тривалий час існувати електричний струм у колі, якщо на рухомі носії струму діють лише кулонівські сили? 2. У чому полягає фізична суть електрорушійної сили джерела? Що вона характеризує?

§ 62. Закон Ома для повного кола

Повне, або замкнуте електричне коло складається з двох частин: так званої внутрішньої, або джерела ЕРС, і зовнішньої, яка з'єднує полюси джерела поза ним. Джерело ЕРС, як і будь-який провідник, має певний опір, який називають внутрішнім опором і позначають звичайно r на відміну від зовнішнього опору K кола.

Припустимо, що до джерела електричної енергії з електрорушійною силою \mathcal{E} і внутрішнім опором r приєднано резистор з опором E (мал. 134). Нехай за час t через поперечний переріз провідника пройде заряд q . Тоді робота сторонніх сил з переміщення заряду q дорівнює $A = q\mathcal{E}$. За рахунок цієї роботи на зовнішньому і внутрішньому опорах виділяється кількість теплоти $Q = I^2 (E + r) t$. Згідно із законом збереження енергії $A = Q$ або $\mathcal{E} = I(E + r)$, звідси

$$I = \frac{\mathcal{E}}{E + r} \quad (62.1)$$

Таким чином, ЕРС дорівнює сумі падів напруг на зовнішньому і внутрішньому опорах замкнутого кола.

£

Співвідношення (62.1) можна записати у вигляді:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{E + r} \quad (62.2)$$

Це співвідношення виражає закон Ома для повного (замкнутого) кола: сила струму в замкнутому колі прямо пропорційна ЕРС дже-

Мал. 134

рела і обернено пропорційна сумі зовнішнього і внутрішнього опорів.

Задача 1. До батареї, ЕРС якої $\mathcal{E} = 6 \text{ В}$ і внутрішній опір $z = 0,5 \text{ Ом}$, приєднали резистор з опором $B = 11,5 \text{ Ом}$. Визначити напругу на затискачах батареї.

Розв'язання. Напруга на затискачах батареї $U = IB$, але $I = \frac{\mathcal{E}}{E+z}$ тоді $U = \mathcal{E} \cdot \frac{B}{E+z} = 5,75 \text{ В}$.

Отже, сила струму в колі залежить від трьох величин, дві з яких (ЕРС і внутрішній опір) характеризують джерело, а третя — залежить від самого кола. Якщо користуватися певним джерелом електричної енергії, то \mathcal{E} і z можна вважати сталими величинами. Якщо до цього джерела вмикати зовнішнє коло з різними опорами B , то залежно від цього змінюватимуться сила струму I в колі і напруга $U = IB$ на зовнішній частині кола. Зі збільшенням опору зовнішнього кола B сила струму згідно із законом Ома $I = \frac{\mathcal{E}}{E+z}$ зменшується. Напруга ж

на зовнішньому колі $U = \mathcal{E} - Iz$ зростає. Якщо $B \gg z$, то внутрішнім опором джерела можна знехтувати і сила струму в колі $I \approx \frac{\mathcal{E}}{E}$. Але тоді напруга на зовнішньому колі U (або на затискачах джерела) приблизно дорівнюватиме ЕРС: $U = IB \approx \mathcal{E}$. Якщо $B = \infty$, тобто зовнішнє коло розірване, то $I = 0$, спад напруги всередині джерела відсутній, а напруга на затискачах джерела дорівнює його ЕРС.

На цьому ґрунтується наближене вимірювання ЕРС джерела. Вольтметр приєднують до полюсів джерела при розімкнутому зовнішньому колі. При цьому вольтметр показує спад напруги IB на самому собі. А оскільки опір вольтметра звичайно дуже великий, то при цьому $B \gg z$ і $U = IB \approx \mathcal{E}$. Чим більший опір вольтметра порівняно з внутрішнім опором джерела струму, тим точніше значення ЕРС.

Зі зменшенням опору зовнішнього кола B сила струму I збільшується, а спад напруги на зовнішньому колі зменшується. Внаслідок короткого замикання, коли всі прилади вимкнуті і полюси джерела з'єднані провідником, опір якого мізерно малий порівняно з внутрішнім опором самого джерела ($B \ll z$), сила струму в колі досягає максимального значення

$$I_{\text{макс}} = \frac{\mathcal{E}}{z}. \quad (62.3)$$

Таким чином, сила струму під час короткого замикання визначається не тільки ЕРС джерела, а і його внутрішнім опором. Для джерел з порівняно великим внутрішнім опором

(наприклад, гальванічні елементи) сила струму короткого замикання невелика, і тому він не такий вже й небезпечний для них. У випадку джерел, де порівняно малий внутрішній опір (наприклад, у свинцевих акумуляторах $\varepsilon \ll 0,1 - 0,001$ Ом), сила струму короткого замикання може досягати дуже великих значень. Провідники можуть розплавитися, а саме джерело вийти з ладу. Особливо небезпечні короткі замикання в освітлювальних мережах, які живляться від трансформаторних підстанцій, ЕРС яких вимірюється сотнями вольтів. Сила струму короткого замикання в них може досягати кількох тисяч амперів.

? 1. З яких частин складається замкнуте електричне коло? 2. Як, скориставшись законом збереження енергії, вивести закон Ома для повного кола? 3. Чому дорівнює ЕРС джерела? 4. Як можна виміряти ЕРС джерела? Від чого залежить точність цього вимірювання? 5. Що таке струм короткого замикання?

Вправа 21 ^{генератор має} внутрішній опір $\varepsilon = 0,6$ Ом. Під час замикання на зовнішній опір $Y = 6$ Ом напруга на затискачах дорівнює $U = 120$ В. Визначте силу струму в колі і ЕРС генератора.

2. Через акумулятор, ЕРС якого $\varepsilon = 10$ В і внутрішній опір $r = 1$ Ом, проходить струм силою $I = 5$ А. Знайдіть напругу на затискачах акумулятора.

3. На батареї кислотних акумуляторів, внутрішній опір якої $\varepsilon = 0,1$ Ом, є напис: «ЕРС 4 В, максимальна сила розрядного струму 4 А». Визначте силу струму в колі під час замикання акумулятора провідником з опором $Y = 0,1$ Ом. У чому причина розбіжності обчисленої сили струму і вказаної на акумуляторі?

4. Генератор з ЕРС $\varepsilon = 80$ В і внутрішнім опором $r = 0,2$ Ом з'єднано із зварювальним апаратом, який має опір $Y_1 = 0,5$ Ом. Підвідні провідники мають опір $Y_2 = 0,4$ Ом. Обчисліть силу струму в колі, напругу на клеммах зварювального апарата, силу струму короткого замикання.

Висновки

Для існування електричного струму в речовині мають бути вільні заряджені частинки і створена між кінцями провідника різниця потенціалів.

У разі послідовного з'єднання провідників загальний опір ділянки кола дорівнює сумі опорів окремих провідників: $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n$. Напруга на ділянці послідовно з'єднаних провідників дорівнює сумі напруг на окремих провідниках: $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$. Напруга на кожному з провідників пропорційна його опором.

У разі паралельного з'єднання провідників величина, обернена до загального опору розгалуження, дорівнює сумі

величин, обернених до опорів окремих провідників:
 $\frac{1}{E} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3} + \dots + \frac{1}{E_n}$ Напруга на всіх паралельно

з'єднаних провідниках однакова, а сили струму в окремих провідниках обернено пропорційні їх опорам.

У зовнішній частині кола носії струму рухаються під дією електричних, а всередині джерела струму — під дією сторонніх сил проти електричних. Дія сторонніх сил характеризується електрорушійною силою, яка вимірюється роботою цих сил джерела з переміщення одиничного позитивного заряду у всьому замкнутому колі.

Сила струму в колі прямо пропорційна ЕРС джерела і обернено пропорційна повному опору замкнутого кола (закон Ома для повного кола): $I = \frac{E}{E_{\Sigma}}$ Сума спадів напруг на зовнішньому і внутрішньому опорах дорівнює ЕРС джерела.

МАГНІТНЕ ПОЛЕ

§ 63. Взаємодія електричних струмів

Між нерухомими електричними зарядами діють сили, які визначаються законом Кулона. Ця взаємодія здійснюється так: кожен із зарядів створює електричне поле; поле одного заряду діє на інший заряд і навпаки.

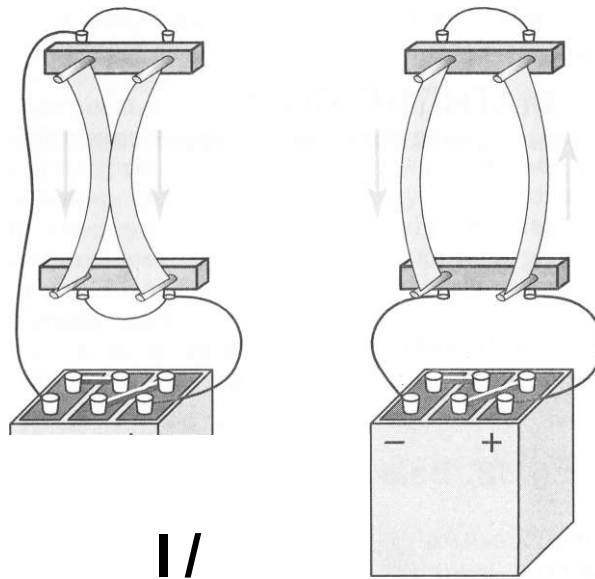
Однак між електричними зарядами можуть існувати сили й іншої природи.

Взаємодії між провідниками зі струмом, тобто взаємодії між рухомими електричними зарядами, називають *магнітними*. Струм в одному з провідників не може безпосередньо діяти на інший струм. Подібно до того, як у просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, існує електричне поле, у просторі, який оточує струми, існує поле, яке називають *магнітним*. Електричний струм в одному з провідників створює навколо себе магнітне поле, яке діє на електричний струм у другому провіднику.

Пригадаємо відомий дослід з виявлення взаємодії двох провідників зі струмами. Закріпимо на штативі два однакові легенькі і гнучкі паралельні провідники. Для цього можна скористатися двома смужками алюмінієвої фольги від конденсатора. Приєднаємо обидва провідники до джерела струму (мал. 135).

Дослід показує, що у *випадку однакового напрямку струмів провідники притягуються, якщо ж струми протилежного напрямку,— провідники відштовхуються.*

Взаємодія провідників зі струмами пояснюється тим, що навколо них існують магнітні поля і на кожен провідник зі струмом діє магнітне поле іншого провідника. Розглянемо це питання детальніше.



Мал. 135

Насамперед спробуємо з'ясувати, чи не є взаємодія провідників зі струмами електричною (кулонівською) взаємодією заряджених тіл. Як відомо, електрична взаємодія виникає за наявності зарядів на провідниках і залежить від значення цих зарядів.

Легко зрозуміти, що провідники зі струмами в цілому електрично нейтральні: сумарний заряд позитивних йонів кристалічної решітки металевго провідника дорівнює за модулем сумарному зарядові електронів провідності і в цілому провідник зі струмом електрично нейтральний. Тому взаємодія між провідниками зі струмами має інший, відмінний від кулонівського, характер.

Ця взаємодія дістала назву *магнітної взаємодії*, оскільки вона схожа на дію струмів на магніти, а також дії магнітів на струми.

Подібно до того, як нерухоме електрично заряджене тіло діє на друге заряджене тіло за допомогою свого електричного поля, так і провідник зі струмом діє на другий провідник зі струмом за допомогою магнітного поля, яке виникає в навколишньому просторі завжди з появою електричного струму.

Магнітне поле — це вид матерії, який здійснює взаємодію електричних струмів.

На відміну від електричного поля, яке створюється нерухомими електрично зарядженими тілами, магнітне поле вини-

кас лише під час руху заряджених тіл. Магнітне поле постійних магнітів, як побачимо далі, також пояснюється рухом заряджених частинок в атомах самого магніту.

Отже, магнітне поле створюється лише рухомими зарядами. В той же час дослідження показали, що магнітне поле діє лише на рухомі заряджені тіла і не чинить жодного впливу на нерухомі заряджені частинки.

Магнітне поле виникає навколо провідника зі струмом завжди, навіть коли відсутні інші провідники і магнітна взаємодія не спостерігається. І в цьому випадку в оточуючому провідник просторі відбуваються певні фізичні зміни. Оскільки магнітне поле виникає у просторі навколо провідника, через який проходить струм, то електричний струм слід розглядати як джерело магнітного поля. Саме так слід розуміти вираз «магнітне поле струму», або «магнітне поле, створене струмом».

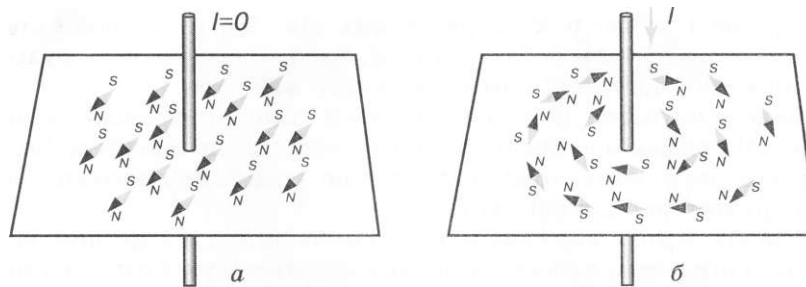
Дослідження магнітних явищ і вивчення магнітного поля має практичне значення.

? 1. Які взаємодії називають магнітними і в чому їхня відміна від електростатичних взаємодій? 2. Повз учня, який сидить у класі, лаборант проносить заряджений провідник. Для кого з них існує магнітне поле? електричне поле? 3. Як взаємодіють між собою два повітряні проводи тролейбусної лінії: притягуються чи відштовхуються?

§ 64» Магнітне поле струму

Існування магнітного поля навколо провідників зі струмом можна виявити різними способами. Один з таких способів, відомий вам з курсу фізики 8-го класу, полягає у використанні магнітних стрілок. У магнітному полі на стрілку діють магнітні сили поля і вона встановлюється так, щоб вісь стрілки збігалася з лінією дії сил.

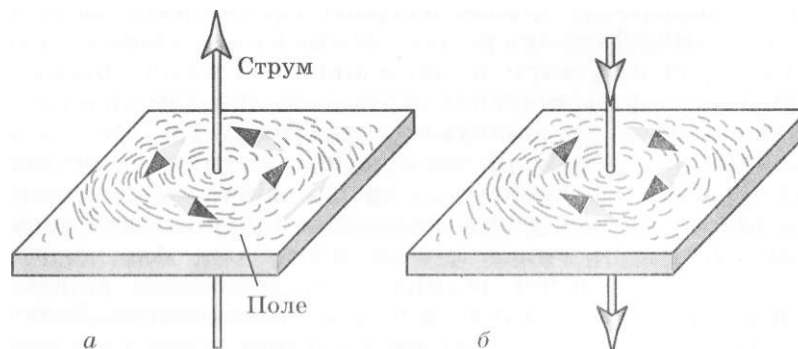
Помістимо в горизонтальній площині навколо вертикального провідника зі струмом ряд магнітних стрілок. До вмикання струму всі стрілки розташовуються паралельно одна одній (мал. 136, а), указуючи одним кінцем на північ, другим — на південь. У разі вмикання струму стрілки повертаються і розташовуються по замкнених колах (мал. 136, б), даючи уявлення про напрям дії сил в різних частинах магнітного поля. Домовилися вважати за напрям дії магнітної сили в будь-якій точці поля такий, на який вказує північний полюс магнітної стрілки, вміщеної в цю точку поля. Але магнітні (•)стрілки мають значні розміри, що ускладнює детальне вивчення характеру магнітних полів за їх допомогою. Значно простіше і зручніше спостерігати картину магнітного поля



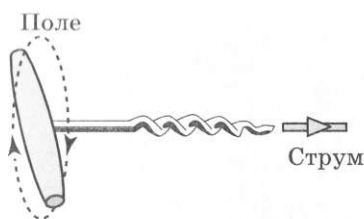
Мал. 136

провідника зі струмом, скориставшись дрібними металевими ошурками. Кожний шматочок металу цих ошурок у магнітному полі намагнічується і стає своєрідною маленькою магнітною стрілкою. Вісь кожної з них у магнітному полі встановлюється вздовж напрямку сил магнітного поля. У 8-му класі за допомогою залізних ошурок ви досліджували характер магнітних полів навколо прямолінійного і колового струмів, а також магнітних полів постійних магнітів. Повторимо і дещо доповнимо одержані раніше відомості.

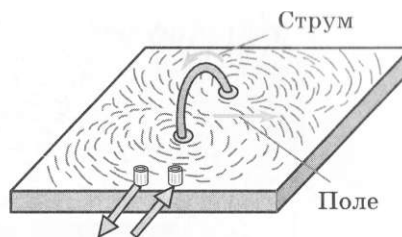
Візьмемо лист картону або скла і пропустимо через отвір у центрі провід перпендикулярно до площини. Насиплемо на лист тонкий шар залізних ошурок, а також розмістимо кілька магнітних стрілок на вістрях. Якщо пропустити через провідник електричний струм і легенько постукати по листу пальцем, то ошурки розмістяться навколо провідника зі струмом концентричними колами (мал. 137, а), вказуючи тим самим напрям дії магнітних сил поля в кожній його точці. Від зміни напрям дії струму в провіднику зовнішня картина поля не зміниться, але магнітні стрілки повернуться на 180 (мал. 137, б). Це свідчить про те, що напрям магнітних сил поля пов'язаний з напрямом струму в провіднику.



Мал. 137



Мал. 138



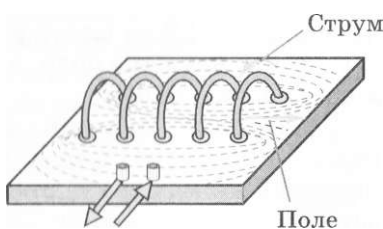
Мал. 139

Лінії, вздовж яких у магнітному полі розташовуються осі маленьких магнітних стрілок, називають силовими лініями магнітного поля. Як і електричне, магнітне поле зручно зображати графічно за допомогою магнітних силових ліній. Силу лінію проводять так, що дотична до неї в будь-якій її точці вказує на напрям сили, яка діє в цій точці на північний полюс магнітної стрілки.

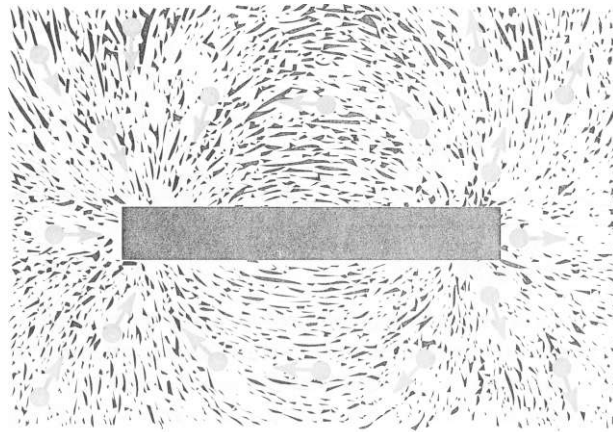
Напрямок магнітних силових ліній легко визначати за відомим вам правилом «свердлика»: напрям магнітної силової лінії збігається з напрямом руху ручки свердлика при вгвинчуванні його вздовж напрямку струму (мал. 138).

За допомогою залізних ошуків можна одержати картини магнітного поля колового струму (мал. 139) і котушки зі струмом (мал. 140). Правило «свердлика» і тут дає змогу встановити напрям силових ліній, знаючи напрям струму у витках. В середині витка напрям всіх силових ліній збігається (з мал. 139 видно, що з одного боку магнітні силові лінії входять у виток, а з другого — виходять). Магнітне поле котушки зі струмом можна розглядати як сумарне поле, утворене внаслідок накладання магнітних полів кількох колових струмів. Якщо порівняти магнітне поле котушки зі струмом з магнітним полем постійного магніту (мал. 141), можна виявити велику їх схожість. Кінець котушки, з якого силові лінії виходять, аналогічний північному полюсу магніту, а кінець котушки, в який входять силові лінії, південному полюсу магніту. Це можна підтвердити на досліді. Якщо до магнітного полюса котушки зі струмом піднести однойменний полюс постійного магніту, вони відштовхуються, а якщо піднести різнойменний, — притягуються.

Важливо звернути увагу на істотну відмінність силових ліній магнітного поля від ліній напруженості електричного. В електричному полі лінії напру-



Мал. 140



Мал. 141

женості завжди розімкнуті: вони починаються і закінчуються на електричних зарядах. Магнітні ж силові лінії завжди замкнуті, тобто не мають ні початку, ні кінця. Це свідчить про те, що в природі не існує «магнітних зарядів».

Розглядаючи розташування магнітних силових ліній в різних місцях поля, бачимо, що за їх густиною можна мати уявлення про силу поля. Наприклад, поблизу кінців котушки зі струмом магнітні силові лінії розташовуються густіше, вказуючи тим самим, що тут поле сильніше.

- 1. Як за допомогою магнітної стрілки визначити полюси колового струму і котушки зі струмом? 2. Чим відрізняються магнітні силові лінії від ліній напруженості електричного поля? 3. Як визначають напрям магнітних силових ліній?

§ 65. Сила Ампера

Ми вже знаємо, що два провідники зі струмами взаємодіють з певною силою (§ 63). Ця взаємодія пояснюється тим, що на кожний провідник зі струмом діє магнітне поле іншого провідника. З 8-го класу вам відомо, що на кожен провідник зі струмом магнітне поле, в якому знаходиться цей провідник, діє з певною силою.

Пригадаємо відомий дослід на виявлення цієї сили (мал. 142). Коли струм у провіднику проходить так, як показано на малюнку, провідник виштовхується з проміжку між полюсами магніту. Якщо змінити напрям струму або поміняти місцями полюси магніту (тобто змінити напрям магнітного поля), провідник втягуватиметься у проміжок між

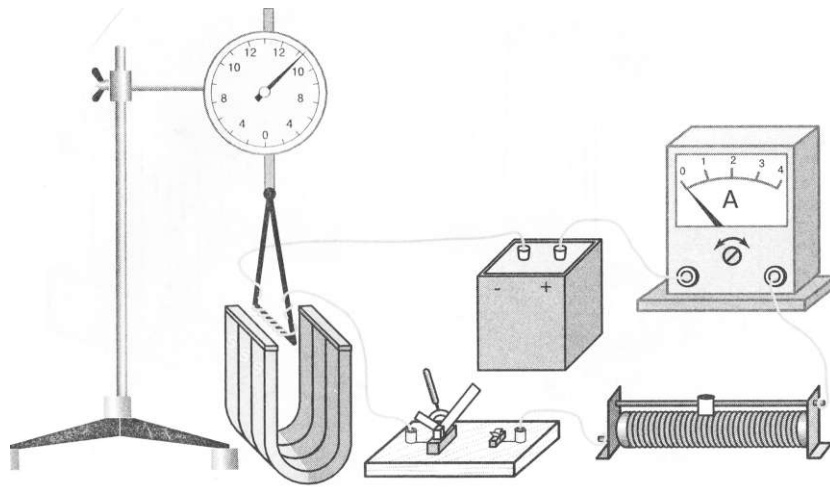
Мал. 142

Мал. 143

полюсами магніту. Отже, напрям струму в провіднику, напрям силових ліній магнітного поля і напрям сили, яка діє на провідник зі струмом, пов'язані між собою. За будь-якого напрямку поля і струму напрям сили залишається перпендикулярним до силових ліній поля і напрямку струму в провіднику. Для визначення напрямку сили, яка діє на прямолінійний провідник зі струмом у магнітному полі, користуються правилом лівої руки (мал. 143). Пригадаємо його: якщо розмістити ліву руку так, щоб силові лінії магнітного поля входили в її долоню, а витягнуті чотири пальці вказували напрям струму, то відігнутий великий палець покаже напрям діючої на провідник сили.

Силу, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, можна виміряти за допомогою установки, зображеної на мал. 144. Щоб підвищити чутливість установки, а також щоб у ході досліду можна було змінювати довжину провідника зі струмом, який знаходиться в магнітному полі, нижню частину рамки доцільно взяти з 150 витками мідного провідника з відгалуженнями від п'ятдесятого і сімдесят п'ятого витків. Приєднаємо рамку через реостат, амперметр і ключ, який дає змогу змінювати напрям струму в рамці, до джерела живлення. Встановивши за допомогою реостата певну силу струму в рамці, виміряємо силу, з якою діє на рамку магнітне поле. Збільшуючи силу струму вдвічі, втричі, помічаємо, що й сила, яка діє на провідник зі струмом, також зростає відповідно у 2 чи 3 рази. Звідси можна зробити висновок, що сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, прямо пропорційна силі струму в ньому:

$$P \sim I.$$



Мал. 144

Вмикаючи різну кількість витків рамки (спочатку 75, а потім 50), тобто зменшуючи довжину провідника, який перебуває в магнітному полі, вдвічі і втричі порівняно з попереднім її значенням, можна переконатися, що діюча на провідник сила прямо пропорційна довжині провідника у разі постійної сили струму в ньому: $P \sim l$.

Знявши один із двох магнітів, тобто зменшивши довжину провідника, який перебуває в магнітному полі, переконаємося, що має значення довжина тієї частини провідника, яка знаходиться безпосередньо в магнітному полі.

Дослідимо тепер залежність сили від орієнтації провідника зі струмом відносно напрямку магнітних силових ліній. Поміщаючи нижній бік рамки перпендикулярно, паралельно і під деяким кутом α до напрямку силових ліній (мал. 145), переконаємося, що сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, виявляється максимальною при $\alpha = 90^\circ$, у разі зменшення кута вона зменшується і дорівнює нулеві при $\alpha = 0$. Точніші дослідження показали, що діюча на провідник зі струмом сила пропорційна синусу кута між напрямком силових ліній магнітного поля і напрямком струму: $P \sim I l \sin \alpha$.

Нарешті, замінивши в установці магніти на сильніші, можна переконатися, що діюча на провідник зі струмом сила зростає, тобто сила залежить від того магнітного поля, в якому перебуває провідник зі струмом.

Таким чином, на основі проведених дослідів можна зробити висновок, що сила P , яка діє в магнітному полі на провідник зі струмом, прямо пропорційна силі струму I , довжині про-

Мал. 145

відника синусу кута α між напрямками струму і силових ліній і залежить від магнітного поля:

$$P = BI \sin \alpha. \quad (65.1)$$

Множник B у цій формулі виражає залежність сили від того магнітного поля, в якому знаходиться провідник зі струмом. Фізичний зміст цього множника розглянемо в наступному параграфі.

Якщо провідник розміщений перпендикулярно до силових ліній поля ($\alpha = 90^\circ$), формула набуває вигляду:

$$P = BI. \quad (65.2)$$

Формулу (65.2) було виведено французьким фізиком А. Ампером і називається вона законом Ампера, а силу P , яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі, називають силою Ампера.

? 1. Від чого залежить сила, яка діє на прямолінійний провідник зі струмом у зовнішньому магнітному полі? 2. Чому магнітне поле не діє на провідник без струму? Адже електрони перебувають у провіднику в тепловому русі.

§ 66. Магнітна індукція

Властивості магнітних полів зручно характеризувати, вивчаючи їх механічні дії на провідники зі струмами. Якщо один і той самий провідник із незмінною силою струму в ньому вміщувати в різні магнітні поля перпендикулярно до силових ліній цих полів, можна переконатися, що сила, яка на нього діє, змінюється за значенням і напрямком. Більше того, якщо поміщати провідник досить малої довжини в різні

точки одного й того самого поля, можна встановити, що поле від точки до точки змінюється. Природно сильнішим вважати магнітне поле в тій його точці, в якій на провідник зі струмом діє більша сила. Тому для силової характеристики точок магнітного поля також вводять фізичну величину. Такою величиною і є множник B у формулі (65.2). Справді, для характеристики точок магнітного поля треба взяти величину, яка б не залежала від сили струму в провіднику і його довжини. Відповідно з раніше описаними дослідями відношення сили P до добутку Il для даної точки магнітного поля є величина стала: $\hat{=} = B$; це відношення не залежить від властивостей провідника, внесеного в поле, і тому може бути характеристикою поля. Величину B називають *магнітною індукцією поля*.

Магнітна індукція в даній точці поля вимірюється силою, яка діє на одиницю довжини провідника, вміщеного в цю точку перпендикулярно до силових ліній, якщо сила струму в провіднику дорівнює одиниці.

Магнітна індукція — *силова характеристика поля*, тому вона є векторною величиною і в будь-якій точці поля спрямована вздовж дотичної до силової лінії поля. Звичайно, коли кажуть про напрям магнітного поля, розуміють саме напрям вектора магнітної індукції.

Як і у випадку електричних полів під час графічного зображення магнітного поля, домовилися силові лінії проводити з такою густиною, щоб кількість ліній, які перетинають одиницю поверхні, перпендикулярну до них, дорівнювала (або була пропорційною) значенню магнітної індукції в даній частині поля. За такої умови на графіку наочно видно, як змінюється у просторі магнітна індукція за значенням і напрямом. Там, де силові лінії розташовані на малюнку густіше, магнітна індукція поля більша. Підкреслимо, що проведені таким способом силові лінії звичайно називають *лініями індукції*.

У загальному випадку магнітна індукція змінюється від точки до точки поля. Але можна створити й таке поле, де магнітна індукція у всіх точках його однакова. Таке поле називають *однорідним*. Неважко здогадатися, що у випадку однорідного поля лінії індукції є паралельними прямими, розташованими на однакових відстанях одна від одної. Прикладом однорідного поля може бути магнітне поле в середній частині прямої котушки зі струмом. Біля кінців котушки лінії індукції викривляються і розходяться, а значить, поле стає неоднорідним.

Виведемо одиницю вимірювання магнітної індукції. З формули (65.2) випливає: $B = \frac{P}{Il}$. Тоді

$$\begin{aligned} \text{одиниця індукції} &= \frac{\text{одиниця сили}}{\text{одиниця сили струму} \cdot \text{одиниця довжини}} \\ &= 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Тл (тесла)}. \end{aligned}$$

Ця одиниця на честь відомого югославського електротехніка Н. Тесла (1857—1943) дістала назву тесла.

Задача 1. Між полюсами електромагніту в горизонтальному магнітному полі знаходиться провідник, розміщений горизонтально. Індукція магнітного поля $B = 0,01$ Тл спрямована горизонтально. Якої сили струм треба мати у провіднику, щоб він висів, не падаючи? Маса 1 м довжини провідника дорівнює $m = 0,01$ кг.

Розв'язання. На провідник зі струмом діють сила Ампера $F_A = BI$ і сила тяжіння $F_g = mg$. Провідник висітиме за умови рівності цих сил, тобто $BI = mg$, звідси

$$I = \frac{mg}{B} = 9,8 \text{ А}.$$

Задача 2. Горизонтальні рейки, розташовані на відстані $l = 1,5$ м одна від одної, перебувають в однорідному магнітному полі, лінії індукції якого вертикальні. На них лежить залізний стержень масою $m = 2$ кг перпендикулярно до рейок. Якої сили струм треба пропустити через стержень, щоб він почав рухатися? Індукція $B = 0,1$ Тл; коефіцієнт тертя $\mu = 0,3$.

Розв'язання. Щоб стержень почав рухатися, сила Ампера, яка діє на нього з боку магнітного поля, має дорівнювати або бути більшою за силу тертя цтад, тобто $BI > \mu mg$, звідси

$$I > \frac{\mu mg}{B} = 39,2 \text{ А}$$

? 1. Яка величина характеризує магнітне поле в кожній його точці? 2. Як напрямлена сила, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі, відносно провідника зі струмом? 3. У разі якого взаємного розташування вектора-магнітної індукції і провідника зі струмом, вміщеного в магнітне поле, сила, що діє на провідник зі струмом, дорівнює нулеві?

Впоава 22. У однорідному магнітному полі, індукція якого $B = 0,1$ Тл, горизонтально розміщено провідник довжиною $l = 0,2$ м і масою $m = 0,002$ кг. Лінії індукції магнітного поля розташовані горизонтально і перпендикулярно до провідника. Якої сили струм має йти через провідник, щоб він висів у магнітному полі?

2. В однорідному магнітному полі на тонких вертикальних дротинках однакової довжини підвішено прямолінійний провідник масою $m = 10$ г і довжиною $l = 30$ см. Індукція поля $B = 0,25$ Тл спрямована вертикально. Провідником тече струм силою $I = 2$ А. На який кут а від вертикалі відхиляться дротинки, які підтримують провідник? Масами дротинок знехтувати.

§ 67. Магнітний потік

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила, тому під час руху провідника виконується певна механічна робота. Саме ця робота магнітних полів з переміщення провідників зі струмами використовується в електродвигунах та в багатьох приладах. Тому важливо з'ясувати, як можна обчислити роботу магнітних сил на переміщення в полі провідника зі струмом.

Припустимо, що провідник зі струмом довжиною l переміщується поступально в однорідному магнітному полі з індукцією B паралельно самому собі на відстань si (мал. 146). Напрямок магнітної індукції B вважатимемо перпендикулярним до l і si . В цьому випадку на провідник діє сила $P = BI$ і тому роботу, виконану силою P , можна обчислити за формулою: $A = Pei = = BIl$. Але добуток Il — площа, описана провідником під час його руху (на малюнку її виділено сірим кольором). Позначивши її через $A8$, дістанемо

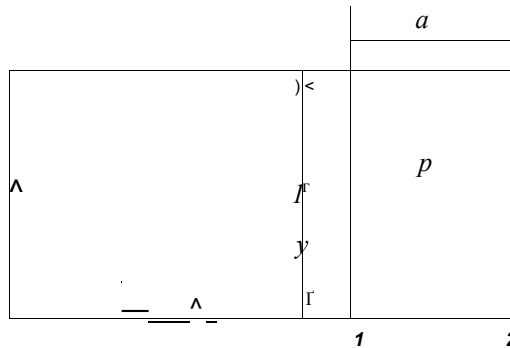
$$A = IB A8. \quad (67.1)$$

Якщо вектор індукції B спрямований до площі $A8$ під кутом α (мал. 147), то його завжди можна розкласти на складову B_n , перпендикулярну до площі $A8$, і складову B_{τ} паралельну площі $A8$. Оскільки сила Ампера завжди перпендикулярна до індукції поля, то складова B_n діє із силою, перпендикулярною до si , і робота цієї сили дорівнюватиме нулеві. Тому

$$A = IB_n A8 = IB A8 \cos \alpha, \quad (67.2)$$

де $B_n = B \cos \alpha$.

Одержані формули можна спростити, ввівши ще одну дуже важливу характеристику магнітного поля — *магнітний потік*, або потік магнітної індукції.



Мал. 146

У випадку однорідного магнітного поля магнітним потоком Φ через площадку розташовану перпендикулярно до ліній індукції, називають величину, яка дорівнює добуткові магнітної індукції B на її площу δ :

$$\Phi = B\delta. \quad (67.3)$$

Якщо магнітна індукція B не перпендикулярна до площадки S , магнітний потік дорівнює:

$$\phi = B_n\delta = BI\delta \cos \alpha. \quad (67.4)$$

Скориставшись формулою (67.3), виведемо одиницю вимірювання магнітного потоку: одиниця магнітного потоку = $= I \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ вебер (Вб)}$.

Повернемося до формули (67.2). Її можна записати:

$$A = IB(\delta_2 - \delta_1) = I(B\delta_2 - B\delta_1).$$

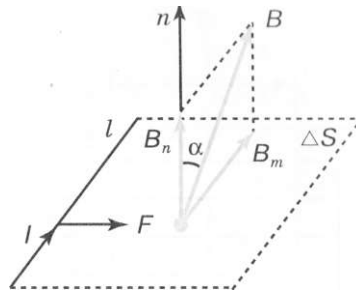
Але $B\delta_1 = \Phi_1$ — магнітний потік через контур у початковому положенні провідника а $B\delta_2 = \Phi_2$ — магнітний потік через контур у кінці переміщення провідника I . Відтак формулу роботи запишемо:

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) - IA\phi. \quad (67.5)$$

Таким чином, робота магнітних сил дорівнює добуткові сили струму на зміну магнітного потоку через контур, обмежений провідником.

Підкреслимо, що формулою (67.5) можна користуватися і для обчислення роботи магнітних сил у випадку повороту рамки зі струмом (контур) у магнітному полі.

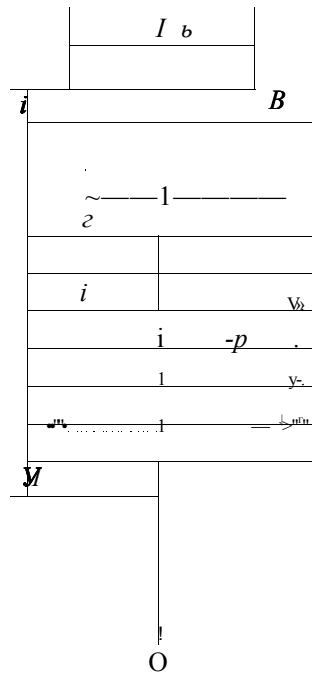
? 1. Як можна обчислити роботу магнітних сил під час переміщення в полі провідника зі струмом? 2. Яку фізичну величину називають магнітним потоком і в яких одиницях вона вимірюється?



Мал. 147

§ 68. Замкнутий контур у магнітному полі. Двигун постійного струму

Досі ми говорили про силу, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом. Але прямолінійний провідник зі струмом завжди є частиною кола зі струмом, адже струм може бути лише замкнутим. А як же магнітне поле діє на замкнутий контур зі струмом?



Мал. 148

Як приклад розглянемо дію однорідного магнітного поля на прямокутний контур зі струмом (прямокутну рамку). На малюнку 148 показана така рамка в положенні, коли її площина паралельна вектору магнітної індукції поля (і індукція, і рамка паралельні площині сторінки). Припустимо, що ширина рамки b , її довжина a і по ній тече струм силою I від джерела (на малюнку не показано).

Щоб з'ясувати, як поводитиме себе така рамка в магнітному полі, треба знайти сили, які діють на кожну з її сторін. Але всі ці сторони є прямолінійними провідниками, а нам відомі сили, які діють на такі провідники в однорідному магнітному полі.

Оскільки магнітна індукція однорідного поля скрізь однакова, то силу, яка діє в однорідному полі на прямолінійний провідник довжиною l із силою струму I , можна обчислити за формулою

$$P = BI \sin \alpha,$$

де α — кут між вектором B і напрямом струму.

З малюнка видно, що на верхню і нижню сторони рамки магнітне поле не діє, тому що вони паралельні вектору магнітної індукції поля. На ліву сторону рамки, перпендикулярної вектору магнітної індукції поля, діє сила P , за модулем рівна Bla . Напрявлена вона, як це випливає з правила лівої руки, перпендикулярно до площини сторінки (від нас за сторінку). На праву сторону рамки діє сила $-P$, направлена до нас. Кожна з цих сил створює обертальний момент відносно осі OO' яка проходить через середини верхньої і нижньої сторін рамки (на малюнку ця вісь показана пунктиром). Момент кожної із сил дорівнює добутку модуля сили Bla на плече $\frac{1}{2}b$, а знаки обох моментів однакові. Загальний обертальний момент M обох сил дорівнює

$$M = BIab. \quad (68.1)$$

Добуток $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$, який входить у ішраз для обертового моменту, є площею рамки отже, формулу (68.1) можна записати у вигляді:

$$M = BIZ. \quad (68.2)$$

Ми з'ясували: коли площа рамки паралельна лініям індукції поля, на неї діє обертовий момент. Внаслідок цього рамка починає повертатися навколо осі OO' . Очевидно, рамка повертатиметься доти, поки її площа не стане перпендикулярно до вектора магнітної індукції поля. Це положення рамки показано на малюнку 149. У ньому сума сил і сума моментів сил, які діють на рамку, дорівнюють нулеві, всі сили лежать в одній площині. Рамка перебуває в рівновазі, тобто таке положення рамки справді відповідає завершенню повороту.

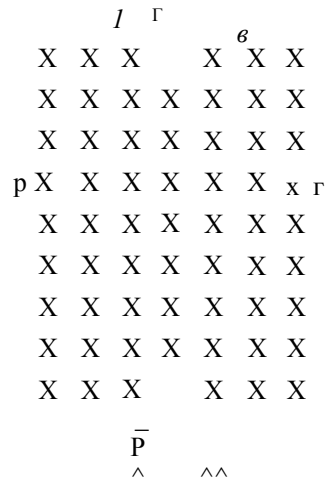
Таким чином, на будь-який замкнутий контур, коли його площа паралельна вектору магнітної індукції поля, діє обертовий момент, рівний BIZ , в результаті чого контур повертається і встановлюється своєю площиною перпендикулярно до вектора індукції.

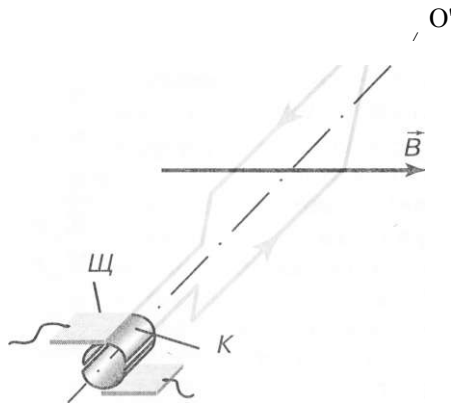
Це стосується не лише рамки прямокутної форми, показаної на малюнку 148, а й кільцевого струму та котушки (соленоїда), який складається з багатьох витків.

Сили, які діють на електричний струм в магнітному полі, зокрема, сили, що діють на замкнутий струм і викликають його поворот, широко використовуються в техніці. Саме завдяки їм працюють електричні двигуни. Її сили використовуються і в багатьох інших пристроях і механізмах.

Основна частина двигуна постійного струму контур (рамка, котушка), розміщений в сильному магнітному полі електромагніта (мал. 150). Такий контур у магнітному полі не обертається, а лише повертається. Досягнувши положення рівноваги, в якому площа контуру стає перпендикулярною вектору індукції магнітного поля, контур має зупинитися. Але якщо через кожну половину оберту контуру в ньому змінювати напрям струму, то контур обертатиметься безперервно.

Зміна напрямку струму в контурі здійснюється автоматично за допомогою пристрою, який називають *колектором* (на мал. 150 позначений літерою K). Він складається з двох половинок мідного циліндра, до яких приєднані кінці кон-





Мал. 150

туру, і обертається разом з ним. Через ці півциліндри за допомогою ковзних контактів — щіток — контур з'єднується з джерелом струму.

В реальних двигунах є не один, а кілька контурів, намотаних на залізне осердя (це так званий *ротор* двигуна). Магнітне поле, в якому обертається ротор, створюється електромагнітами на *статорі*. Схематично це показано на малюнку 151. На роторі намотано 4 контури (1—1, 2—2, 3—3, 4—4). Струм від джерела напруги V через колектор (на малюнку не показаний) подається і в електромагніти статора, і в обмотки ротора.

Двигуни постійного струму використовуються в електричних транспортних засобах, на підймальних кранах, у багатьох побутових електричних пристроях.

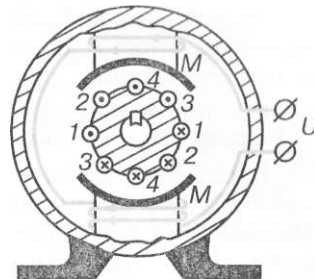
? 1. На якому явищі ґрунтується дія електричного двигуна? 2. Як зміниться рух ротора двигуна, схема якого наведена на малюнку 151 (с. 215), якщо змінити напрям струму в обмотках ротора? в обмотках електромагнітів статора? в обмотках ротора і статора одночасно?

§ 69. Принцип дії електровимірювальних приладів

У всіх електровимірювальних стрілочних приладах дія електричного струму викликає переміщення рухомої частини вимірювального механізму. Звичайно рухома частина і зв'язана з нею стрілка приладу обертаються навколо своєї осі. Момент сил, який спричинює це обертання, називають *обертальним моментом*. Щоб стрілка відхилялась не безмежно, а

кут відхилення відповідав вимірюваній величині, треба протидіяти обертанню стрілки. Момент сил, який чинить таку протидію, називають *протидіючим моментом*.

Практично завжди протидіючий момент створюється силами пружності пружини. Обертальний момент може створюватися по-різному. Залежно від способу виникнення обертального моменту електровимірювальні прилади належать до тієї чи іншої системи. У шкільних фізичних лабораторіях найчастіше застосовуються електровимірювальні прилади трьох систем: магнітоелектричної, електромагнітної і електродинамічної. Розглянемо ці системи.



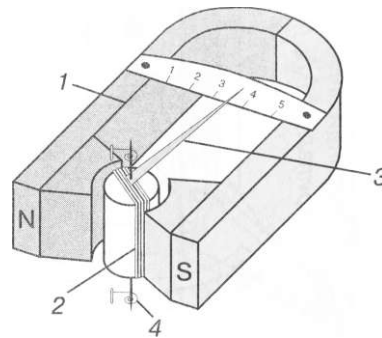
Мал. 151

Магнітоелектричні прилади. Принцип дії магнітоелектричної системи ґрунтується на взаємодії провідника зі струмом і магнітного поля. Поле створюється постійним магнітом 1 (мал. 152), струм проходить через котушку у вигляді рамки 2. Рамка є рухомих елементом приладу і знаходиться на одній осі зі стрілкою 3. Обертальний момент, що діє на рамку, завдяки спеціально сконструйованому магнітові не залежить від кута повороту рамки і дорівнює $M_0 = BINS$, де B — індукція магнітного поля, I — сила струму, N — кількість витків у рамці, S — її площа. Рамка починає повертатися. При цьому спіральна пружина 4 закручується і виникає протидіючий момент, пропорційний кутові повороту α рамки: $M_u = k\alpha$, де k — коефіцієнт пропорційності, який залежить від пружних властивостей пружини. Коли протидіючий момент дорівнюватиме обертальному: $M_{\Pi} = M_0$ або $k\alpha = BINS$, рамка зупиниться. При цьому кут повороту рамки, α значить, і стрілки, дорівнює $\alpha = \frac{BINS}{k}$, тобто прямо пропорційний силі

струму в рамці. Це забезпечує рівномірність шкали приладу.

Магнітоелектричні прилади придатні для вимірювання лише в колах постійного струму, що, безумовно, є їх недоліком. Проте ці прилади споживають мало енергії і мають високу чутливість.

Найчутливішими є прилади магнітоелектричної системи, наприклад дзеркальні гальваномет-



Мал. 152

ри. В них на осі обертання замість стрілки прикріплене маленьке плоске дзеркальце. Вузкий пучок світла від лампочки падає на дзеркало, а відбитий від нього зайчик потрапляє на віддалену шкалу.

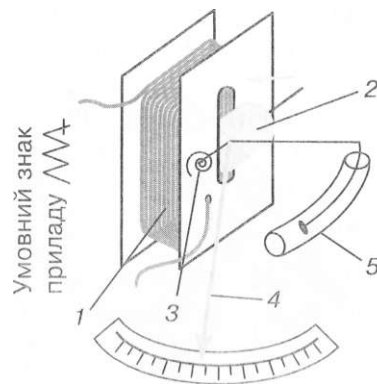
Чутливість дзеркальних гальванометрів може досягати 10^{-12} А/мм.

Електромагнітні прилади. Принцип дії приладів електромагнітної системи ґрунтується на ефекті втягування залізного осердя котушкою, якою проходить струм. Такий прилад (мал. 153) складається з нерухокої котушки зі струмом 1, залізної пластинки 2, що обертається на осі, де закріплено пружинку 3, яка утримує пластинку, і стрілки 4.

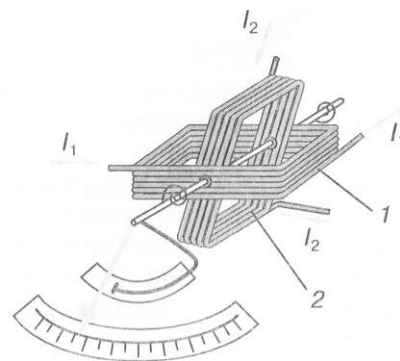
Внаслідок проходження через котушку електричного струму будь-якого напрямку залізна пластинка втягується в котушку, повертається на своїй осі і обертає стрілку. Для зменшення коливань стрілки застосовується «заспокоювач» 5, який складається з циліндра, в якому рухається поршень, з'єднаний із залізною пластинкою.

Електромагнітні прилади менш точні, ніж магнітоелектричні, але простіші за конструкцією і придатні для вимірювання як постійного, так і змінного струму.

Електродинамічні прилади. Принцип дії приладів електродинамічної системи — це взаємодія провідників зі струмом. Такий прилад (мал. 154) складається з двох котушок 1, 2 у вигляді рамок, підвішених на спільній осі, одна — нерухомо, друга — на підшипниках. Обидві рамки зв'язані двома пружинами, якими до рамок підводиться струм. У результаті проходження струму рухома рамка повертається на осі тим більше, чим більша сила струму, і з'єднана з нею стрілка дає показання на нерухомій шкалі.



Мал. 153



Мал. 154

Електродинамічними приладами можна користуватися для вимірювань постійного і змінного струмів (сили струму і напруги). Шкала цих приладів нерівномірна.

Найважливішими характеристиками приладу є його внутрішній опір і граничне значення сили струму, за якої рухома частина вимірювального приладу відхиляється на максимальний кут. Вимоги, яким мають задовольняти внутрішні опори амперметра і вольтметра, протилежні. Амперметр вмикається в коло послідовно, і через нього проходить весь вимірюваний струм. Тому, щоб не чинити додаткового опору в колі, опір амперметра має бути якомога меншим. Вольтметр вмикається паралельно тій ділянці кола, на якій слід виміряти напругу. Отже, його опір має бути значно більшим, щоб не шунтувати досліджувану ділянку кола.

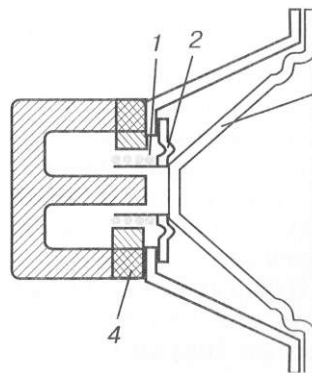
На практиці часто використовують прилади з кількома межами вимірювання сил струмів і напруг. Для цього у процесі вимірювання напруг послідовно з приладом вмикають додаткові опори, а вимірюючи сили струмів, до приладу присьднують паралельно опори-шунти.

? 1. Які ви знаєте системи електровимірювальних приладів? 2. Моменти яких сил зрівноважуються після відхилення стрілки вимірювального приладу на певний кут? 3. Що позитивне та які недоліки приладів магнітоелектричної системи? 4. Яким вимогам мають задовольняти внутрішні опори амперметра і вольтметра? Чому? 5. Приладами якої системи можна вимірювати потужність у колах змінного струму?

§ 70. Гучномовець

Дія магнітного поля на провідник зі струмом використовується в будові гучномовців — приладів для збудження звукових хвиль під дією електричного струму, сила якого змінюється із звуковою частотою. В електродинамічному гучномовці (динаміку) використовують дію магнітного поля постійного магніту на змінний струм у рухомій котушці. Звукова котушка 1 (мал. 155) з мідного дроту, з'єднана з гнучкою мембраною 2 і конічним дифузorzом 3, розміщена у зазорі сильного кільцевого постійного магніту 4.

Під час проходження змінного електричного струму котушка під



Мал. 155

дією змінної сили Ампера коливається з частотою коливань сили струму і змушує коливатися з такою самою частотою мембрану і дифузор. Ці коливання створюють коливання тиску повітря, тобто звукові хвилі.

Першокласні гучномовці відтворюють без значних спотворень звукові коливання в діапазоні 40—15 000 Гц. Але такі пристрої дуже складні. Тому застосовують системи з кількох гучномовців, кожний з яких відтворює звук у певному невеликому інтервалі частот.

Загальним недоліком усіх гучномовців є малий ККД. Вони випромінюють лише 1—3 % усієї підведеної до них енергії.

§ 71. Дія магнітного поля на рухомі заряджені частинки. Сила Лоренца

У § 65 ми знайшли силу, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі. Як з'ясувалося, магнітне поле взаємодіє лише з провідниками, якими проходить струм, і не чинить впливу на провідники без струму. Це свідчить про те, що магнітне поле діє не на матеріал провідника, а на заряджені частинки (електрони чи йони), які в ньому переміщуються. В такому випадку сила Ампера є результуючою всіх сил, які діють на окремі рухомі заряджені частинки. Знайдемо силу, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі.

На провідник довжиною l зі струмом силою I в магнітному полі з індукцією B діє сила $P = BI$ зіп а. Але сила струму $I = en\delta l$. Тоді $P = en\delta l B$ зіп а.

Добуток δl — об'єм провідника, а $N = n\delta l$ — кількість заряджених частинок, які рухаються в цьому провіднику. Тоді силу, яка діє на одну рухоми частинку, можна знайти, поділивши силу P , яка діє на всі частинки, на загальну кількість рухомих заряджених частинок N

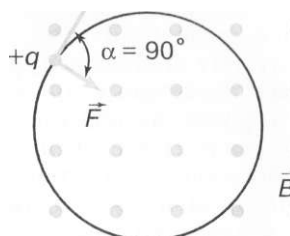
$$F_{\text{л}} = I = envB \text{ зіп а} . \quad (71.1)$$

Отже, сила, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі, пропорційна зарядові частинки, швидкості її переміщення та індукції магнітного поля.

Цю формулу вперше одержав голландський фізик Г. Л о р е н ц, і тому її звичайно називають формулою Лоренца, а силу, яка обчислюється за цією формулою, називають *силою Лоренца*.

З формули (71.1) випливає, що сила Лоренца залежить від кута між напрямом руху зарядженої частинки і напрямом вектора індукції магнітного поля. Магнітне поле не діє на нерухомі заряджені частинки ($F_{\text{л}} = 0$ при $v = 0$) і на частинки,

які рухаються вздовж ліній індукції поля (зіп $a = 0$ при $a = 0$). Навпаки, сила Лоренца максимальна, якщо частинка влітає в магнітне поле перпендикулярно до ліній його індукції. У цьому випадку $P_L = euB$. Якщо поле однорідне ($B = \text{const}$), заряджена частинка описуватиме коло (мал. 156), оскільки рух під дією сталої сили, спрямованої під прямим кутом до швидкості руху, згідно з другим законом динаміки, не може бути іншим.



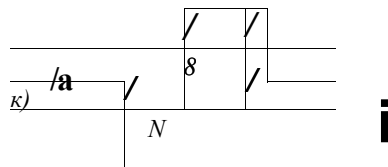
Мал. 156

Задача 1. Траєкторія електронів, які влітають в магнітне поле перпендикулярно до його індукції, є дугою кола радіуса $B = 1$ см. Визначити швидкість електронів, якщо магнітна індукція поля $B = 0,02$ Тл.

Розв'язання. На електрон діє сила Лоренца $P_L = euB$ і змушує його рухатися по колу. Це означає, що сила Лоренца виступає доцентровою силою, тобто $P_L = \frac{mv^2}{r}$. Прирівнявши праві частини виразів для P , дістанемо: $euB = \frac{mv^2}{r}$ звідси $v = \sqrt{\frac{eBr}{m}}$ $3,6 \cdot 10^7$ м/с.

Напрямок сили Лоренца можна визначити, скориставшись правилом лівої руки (треба лише завжди враховувати знак заряду частинки). Правило лівої руки застосовується безпосередньо до рухомих позитивно заряджених частинок. Для негативно заряджених частинок напрям струму вважають протилежним до напрямку руху частинок.

Переконатися в існуванні сили Лоренца можна за допомогою простого досліду. Помістимо в сильне магнітне поле розрядну трубку з діафрагмою і світним екраном (мал. 157). Ми побачимо, що слід електронного пучка на екрані дещо зміститься. Це свідчить про те, що на електрони, які рухаються в магнітному полі, діє сила Лоренца, яка змушує їх змінювати траєкторію свого руху. Легко перевірити, що її напрям збігається з напрямом, визначеним за допомогою правила лівої руки.



Мал. 112

- 1. Як напрямлена сила Лоренца відносно швидкості руху заряджених частинок? відносно вектора магнітної індукції? 2. Чи діє сила Лоренца в магнітному полі на: а) нерухому заряджену частинку; б) рухому незаряджену частинку; в) заряджену частинку, яка рухається перпендикулярно до вектора індукції; вздовж лінії індукції? 3. У трубці, заповненій газом, рухаються електрони. Якою буде траєкторія руху електронів, якщо трубку помістити в однорідне магнітне поле перпендикулярно до його індукції? 4. Чи може сила Лоренца змінити швидкість частинки за модулем? 5. Чи виконує сила Лоренца механічну роботу?

Вправа 23 Пройшовши різницю потенціалів $\Delta \Pi = 3,52 \cdot 10^3$ В, електрон влітає в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 0,01$ Тл перпендикулярно до лінії індукції і рухається по колу радіуса $R = 2$ см. Обчисліть питомий заряд електрона.

2. Електрон, прискорений різницею потенціалів $\Delta \Pi = 1000$ В, влітає в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 1,19 \cdot 10^{-3}$ Тл перпендикулярно до лінії індукції. Визначте радіус кривизни траєкторії електрона і період його обертання по колу.

3. У камері Вільсона, вміщеній в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 1,5$ Тл, альфа-частинка, влетівши перпендикулярно до лінії індукції, залишає слід у вигляді кола радіуса $R = 2,7$ м. Визначте імпульс і кінетичну енергію частинки. Маса альфа-частинки $m = 6,7 \cdot 10^{-27}$ кг, її заряд $q = 3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл.

4. Частинка, яка має заряд $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл, рухається в однорідному магнітному полі зі швидкістю $v = 4 \cdot 10^6$ м/с. Чому дорівнює сила Лоренца, яка діє на частинку, якщо індукція поля $B = 3 \cdot 10^{-5}$ Тл, а кут α між векторами v і B дорівнює $\alpha = 30^\circ$?

§ 72. Магнітні властивості речовини

Вивчаючи взаємодію провідників зі струмами, ми звертали увагу на те, що на магнітну взаємодію впливає середовище, в якому перебувають провідники. Намагнічування речовин можна вивчити експериментально. Для цього виготовимо з досліджуваної речовини кільце і надінемо на нього обмотку (мал. 158), по якій пропускатимемо електричний струм. Такої форми обмотку називають *тороїдом* (котушка, вісь якої зігнута у формі кола). Кільце з досліджуваної речовини звичайно розрізають в одному місці так, щоб дістати невеликий повітряний проміжок (зазор). Коли проміжок малий, лінії магнітної індукції не розсіюватимуться, а потік магнітної індукції через поперечний переріз повітряного проміжку буде практично таким самим, як і потік у кільці. Отже, значення магнітної індукції у повітряному проміжку дорівнюватиме значенню магнітної індукції в кільці, яке можна знайти,

вимірюючи, наприклад, силу, з якою магнітне поле діє на великий прямолінійний провідник, уміщений у повітряний проміжок. Досліди показують, що для більшості речовин магнітна індукція B мало відрізняється від магнітної індукції B_0 , виміряної у випадку, коли всередині тороїда вакуум. Однак є речовини, в яких магнітна індукція B у сотні і тисячі разів може перевищувати магнітну індукцію у вакуумі.

З дослідів можна зробити висновок, що всі речовини в магнітному полі намагнічуються, тобто стають джерелами магнітного поля. Результуюче магнітне поле у середовищі є сумою полів, створюваних струмом і намагніченим середовищем, і тому не дорівнює полю у вакуумі.

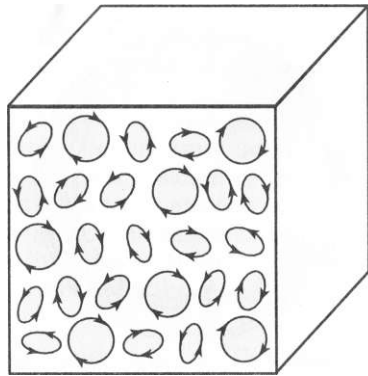
Причину намагнічування речовин зрозуміти неважко. Адже ми знаємо, що всі речовини складаються з атомів, молекул чи йонів. У кожному атомі чи молекулі рухаються замкнутими орбітами електрони і цей рух електронів еквівалентний за своїми магнітними властивостями замкнутому струмові звичайного провідника. Тому будь-який атом чи молекулу з точки зору їх магнітних властивостей можна розглядати як деяку сукупність електронних мікрострумів. Інакше кажучи, атоми й молекули мають магнітні властивості. Якщо речовина не намагнічена, вона не створює магнітного поля. Це означає, що електронні струми розташовані в ній хаотично (мал. 159), а тому їх сумарна магнітна дія дорівнює нулю. Саме тому шматок міді у звичайних умовах не виявляє магнітних властивостей, хоча їх має кожен атом. Якщо ж помістити речовину в зовнішнє магнітне поле, розташування електронних струмів стає частково або повністю упорядкованим. Тому намагнічену речовину можна розглядати як систему мікроскопічних орієнтованих струмів (мал. 160).

Для характеристики впливу середовища на магнітну взаємодію струмів (тобто магнітних властивостей речовин) вводять поняття *відносної магнітної проникності* речовини. Якщо магнітна індукція в середовищі дорівнює B , а у вакуумі цей самий струм створює індукцію B_0 , то відношення $\mu = \frac{B}{B_0}$ = μ ,

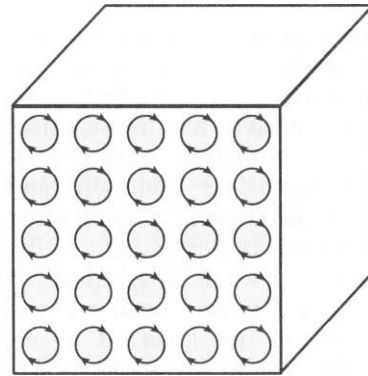
яке показує, у скільки разів магнітна індукція в речовині більша за магнітну індукцію, створювану цим самим струмом у вакуумі, називають відносною магнітною проникністю даної



Мал. 158



Мал. 159



Мал. 160

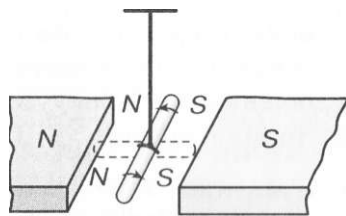
речовини. Природно, що відносна магнітна проникність речовини є величиною безрозмірною.

Залежно від значення відносної магнітної проникності всі речовини можна поділити на дві групи: 1) парамагнетики, для яких $\mu > 1$; 2) діамagnетики, для яких $\mu < 1$. Згідно з різними значеннями відносної магнітної проникності речовини по-різному поведуться в магнітному полі. Оскільки у парамагнетиків $\mu > 1$, то магнітна індукція поля за наявності парамагнетика виявляється більшою за магнітну індукцію поля без парамагнетика.

Підсилення магнітного поля парамагнетиком можна пояснити тим, що збуджуване у парамагнетику поле за напрямом збігається із зовнішнім полем, підсилюючи його. До парамагнетиків належать алюміній, платина, вольфрам, хром, манган, розчини солей Феруму, деякі гази.

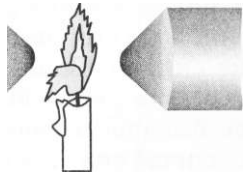
Діамagnетики, вміщені в магнітне поле, навпаки, послаблюють його. Це послаблення можна пояснити виникненням у діамagnетику внутрішнього магнітного поля, спрямованого проти зовнішнього магнітного поля. До діамagnетиків належать майже всі гази, мідь, золото, срібло, алмаз, графіт, бісмут тощо.

Різницю у намагнічуванні парамагнетиків і діамagnетиків легко виявити якісно, спостерігаючи поведінку речовин у сильному магнітному полі. Підвісимо, наприклад, між полюсами сильного електромагніту стержень із бісмуту і зорієтуємо його вздовж поля (на мал. 161 показано пунктиром).

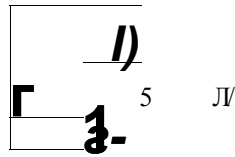


Мал. 161

//////



Мал. 162



Мал. 163

Увімкнемо електромагніт в електромережу. Вісмутівий стержень повертається в магнітному полі і встановлюється перпендикулярно до його ліній індукції. Це можна пояснити тим, що під час намагнічення стержня на його кінцях виникають магнітні полюси, однойменні з ближчими полюсами зовнішнього електромагніту, і стержень виштовхується з магнітного поля. Особливо чітко видно виштовхування діамангнетика з магнітного поля, якщо між полюсами електромагніту запалити свічку (мал. 162). Гази полум'я мають діамангнітні властивості і тому полум'я виштовхується з магнітного поля.

> I



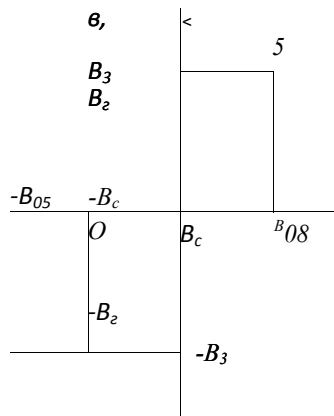
Мал. 164

Виконаємо ще дослід. Підвісимо між полюсами електромагніту скляну ампулу з водним розчином хлориду феруму (II) (парамагнетик). Ампула втягується полем і встановлюється паралельно напрямку поля (мал. 163). Ще чіткіше можна спостерігати втягування полем парамагнетика, якщо помістити між полюсами електромагніту одне з колін /У-подібної трубки, заповненої розчином хлориду феруму (II). Якщо до вмикання поля рівень розчину в цій трубці встановився біля нижнього краю полюсних наконечників, після вмикання поля рівень розчину в цьому коліні підвищується (мал. 164).

- ? 1. Яка фізична величина характеризує магнітні властивості речовини? 2. У чому полягає різниця між пара- і діамангнетиками? 3. Чому полум'я виштовхується з магнітного поля?

§ 73. Феромагнетики

Отже, під час намагнічування парамагнетиків їхнє власне (внутрішнє) магнітне поле підсилює зовнішнє поле, але



Мал. 165

незначною мірою, оскільки магнітна проникність парамагнетиків істотно не відрізняється від одиниці. Однак існує ряд важливих для техніки речовин, здатних намагнічуватися дуже сильно. Вони дістали назву *ферромагнетиків*. Магнітна проникність більшості ферромагнетиків μ за звичайних температур вимірюється сотнями й тисячами одиниць, а деяких спеціально виготовлених ферромагнетиків може досягати 1 мільйона. Це означає, що у ферромагнетиках внутрішнє магнітне поле може в сотні й тисячі разів перевищувати зовнішнє

магнітне поле. Наприклад, якщо в котушку вставити сталеве осердя, за такої самої сили струму в котушці магнітна індукція поля зростає в сотні разів.

До ферромагнетиків, крім заліза, належать нікель, кобальт, гадоліній, деякі сплави і хімічні сполуки.

Ферромагнетики мають ще ряд властивостей, які істотно відрізняють їх від діа- і парамагнетиків. Характерною особливістю ферромагнетиків є складна залежність індукції внутрішнього поля намагніченого ферромагнетика від індукції зовнішнього поля намагнічуючих струмів.

Виготовимо осердя з розмагніченого ферромагнетика у формі тороїда з малим поперечним проміжком (зазором) і обмотаємо його рівномірно провідником (див. мал. 158). Змінюючи силу струму в обмотці, змінюватимемо індукцію намагнічуючого поля B_0 . Індукцію магнітного поля вимірюватимемо в зазорі.

Спочатку індукція магнітного поля у ферромагнетика зростає разом зі збільшенням індукції намагнічуючого поля B_0 . Це зростання зображено кривою *08* (мал. 165). Дальше зростання індукції намагнічуючого поля ($B_0 > B_{08}$) не веде до збільшення індукції поля у ферромагнетика, індукція зберігає постійне значення, яке називається *намагніченістю насичення*.

Зменшуючи силу струму в обмотці, ми зменшуватимемо індукцію намагнічуючого поля B_0 і тим самим індукцію поля у ферромагнетика. При цьому побачимо, що індукція поля в осерді у процесі його розмагнічування залишається весь час більшою, ніж у процесі намагнічування. Коли сила струму в обмотці стане рівною нулеві, зникне і намагнічуюче поле. Однак осердя збереже залишкову намагніченість — *залишкову індукцію* B_r .

B_K B_A *a*

Мал. 166

б

Щоб повністю розмагнітити феромагнітне осердя, треба через обмотку пропустити струм протилежного напрямку і тим самим створити магнітне поле з протилежно напрямленою індукцією ($\sim B_C$). Значення індукції B_C , за якої осердя розмагнічується, називається *коерцетивною силою*.

Якщо далі збільшувати силу струму в обмотці, процес намагнічування повториться до насичення. Потім можна повторити процес розмагнічування, і ми дістанемо замкнуту криву.

Таким чином, видно, що під час намагнічування і розмагнічування феромагнітного осердя індукція B ніби відстає від B_0 . Це явище відставання B від B_0 називається явищем *гістерезису* (це слово і означає «відставання»). Завдяки цьому явищу і утворюється залишкова індукція. Зображена на малюнку 165 замкнута крива називається *петлею гістерезису*. Чим більша коерцетивна сила, тим важче розмагнітити магніт. Для сильного постійного магніту потрібно, щоб залишкова індукція B_r була великою. На малюнку 166 показано загальний вигляд петлі гістерезису двох типів феромагнетиків. У феромагнетиків, у яких петля гістерезису вузька (мал. 166, *a*), коерцетивна сила мала. Вони легко намагнічуються і розмагнічуються. Ці магнітні матеріали називають *магнітом'якими*. Їх застосовують у таких приладах і пристроях, де феромагнетики часто перемагнічуються (електричні генератори, двигуни, трансформатори тощо). Магнітом'якими матеріалами є, наприклад, чисте залізо, в якого коерцетивна сила близько 10^4 Тл, пермалой (сплав із 78 % нікелю і 22 % заліза), з коерцетивною силою близько $5 \cdot 10^6$ Тл тощо.

У феромагнетиків, у яких петля гістерезису широка (мал. 166, *б*), коерцетивна сила велика, і їх використовув-

ють для виготовлення постійних магнітів. Речовини з широкою петлею гістерезису називають *магнітожорсткими*, або висококоерцетивними матеріалами. Так, висококоерцетивний сплав магніко (сплав заліза, нікелю, кобальту, алюмінію і міді) має коерцетивну силу 0,07 Тл і залишкову індукцію 1,3 Тл.

Будь-яка феромагнітна речовина залишається феромагнітною лише до певної температури, яку називають *температурою Кюрі*. За температури, більшої за температуру Кюрі, феромагнітна речовина втрачає феромагнітні властивості (стає парамагнетиком). У різних феромагнетиків температури Кюрі різні. Так, залізо втрачає свої феромагнітні властивості за температури 770 °С, нікель — за 360 °С, кобальт — за 1150 °С. Є феромагнетики і з низькою температурою Кюрі. Так, у сплав, який складається з 70% заліза і 30% нікелю, температура Кюрі всього 70 °С. Такий сплав уже в гарячій воді перестає бути феромагнітною речовиною. Під час охолодження нагрітого феромагнетика нижче температури Кюрі феромагнітні властивості повністю відновлюються.

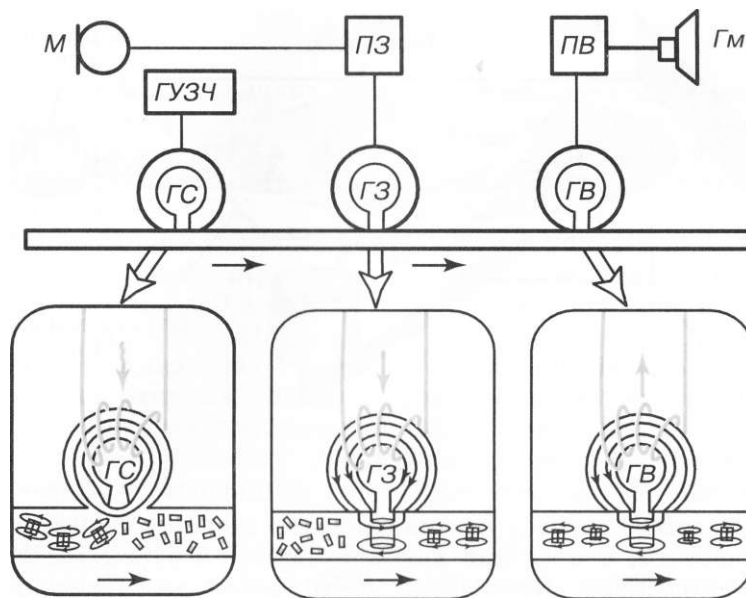
? 1. Які речовини називаються феромагнетиками? Які вони мають властивості? 2. Що означають слова: «намагнічений до насичення»? 3. У чому полягає явище гістерезису? 4. Що таке коерцетивна сила? 5. В яких точках гістерезисної петлі поняття магнітної проникності не має смислу? 6. З яких магнітних матеріалів слід виготовляти осердя трансформаторів — магнітом'яких чи магнітожорстких?

§ 74. Магнітне записування і збереження інформації

Найбільш звичним для кожної людини способом обміну інформацією є мова. Обмінюючись інформацією за допомогою мови, одна людина збуджує звукові коливання у повітрі за допомогою голосових зв'язок, друга сприймає ці коливання за допомогою органів слуху.

Одним з найпоширеніших способів збереження і наступного відтворення звуків мови і музики є магнітний запис.

Магнітне записування ґрунтується на властивості феромагнетиків зберігати залишкове намагнічування після зняття зовнішнього магнітного поля. Запис звуку в магнітофонах здійснюється на тонку пластмасову стрічку, покриту шаром магнітного лаку, що складається з дуже дрібних голчастих частинок заліза чи іншого феромагнетика і зв'язуючих речовин. Коливання повітря у звуковій хвилі перетворюються за допомогою мікрофона M у коливання сили струму в електрич-

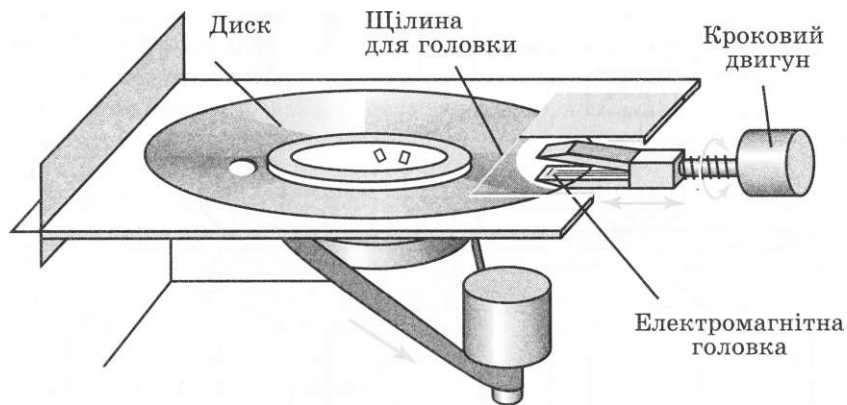


Мал. 167

ному колі (мал. 167). Після підсилення у підсилювачі запису ПЗ змінний струм звукової частоти надходить в обмотку кільцевого магніту магнітної головки запису ГЗ. Під час протягування магнітної стрічки поблизу зазора між полюсами кільцевого електромагніту різні ділянки стрічки намагнічуються відповідно до змін сили струму в обмотці. Смуга на стрічці, намагнічена у процесі записування, називається доріжкою.

При відтворенні звуку відбувається зворотний процес: намагнічена стрічка протягується перед зазором кільцевого магніту магнітної головки відтворення ГВ з тією самою швидкістю, з якою вона протягувалася під час записування. Під час руху намагніченої стрічки відбуваються зміни магнітного поля в кільцевому електромагніті — в обмотці електромагніту збуджується змінний струм. Після підсилення змінної напруги підсилювачем відтворення ПВ напруга звукової частоти подається на котушку гучномовця Гм. Змінний струм у котушці гучномовця спричиняє коливання котушки в магнітному полі постійного магніту. Прикріплений до котушки дифузор відтворює звук.

Для стирання непотрібного запису зі стрічки служить магнітна головка стирання запису ГС. На її обмотку подається змінна напруга від генератора ультразвукової частоти ГУЗЧ. У побутових магнітофонах для записування і відтворення використовуються одна й та сама універсальна головка й один підсилювач.



Мал. 168

На магнітну стрічку можна записати не лише сигнал звукової частоти, а й сигнал для керування електронним променем кінескопа телевізора, тобто записати телевізійне зображення. В основі магнітного відеозапису лежать ті самі принципи, що й в основі звукозапису. На магнітну стрічку відеомагнітофона записуються інформація про зображення в кожній точці екрана телевізора і звуковий супровід. Під час зчитування запису зі стрічки за допомогою магнітних головок на екрані телевізора дістають зображення і за допомогою динаміка відтворюють його звуковий супровід.

Магнітний запис інформації широко використовується в електронно-обчислювальній техніці. Оскільки вся інформація для комп'ютера є набором сигналів типу «так» чи «ні», цю інформацію можна записати на магнітну стрічку або магнітний диск як чергування ділянок з різною полярністю намагнічування.

У персональних комп'ютерах для записування інформації використовується тонкий пластмасовий диск, покритий шаром магнітного матеріалу. Записування і зчитування здійснюється за допомогою електромагнітної головки, яка переміщається над поверхнею диска вздовж його радіуса (мал. 168). Диск обертається зі швидкістю 300 обертів за хвилину, запис здійснюється на концентричних доріжках, поздовжня густина запису інформації досягає 275 біт/мм, поперечна густина — до 60 доріжок на 1 мм вздовж радіуса. Повна ємність запису інформації на одному боці диска діаметром 133 мм досягає 500 Кбайт.

? 1. Яка властивість феромагнетиків використовується для магнітного звукозапису? 2. Як здійснюють магнітний запис звуку й зображення? 3. Як записується інформація в персональних комп'ютерах?

Висновки

Взаємодія електричних струмів здійснюється через магнітне поле. Створюється магнітне поле лише рухомими зарядами і діє лише на рухомі заряди. Провідники зі струмами одного напрямку притягуються, а зі струмами протилежного напрямку — відштовхуються.

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила, прямо пропорційна силі струму I , довжині провідника l , індукції магнітного поля B і синуса кута α між напрямком струму й індукції поля: $F = BIl \sin \alpha$.

Магнітна індукція в даній точці поля вимірюється силою, яка діє на одиницю довжини провідника, вміщеного в поле у цій точці перпендикулярно до ліній індукції поля, коли сила струму в провіднику дорівнює одиниці. Магнітне поле називається однорідним, якщо магнітна індукція у всіх його точках однакова.

Магнітні поля зручно зображати графічно за допомогою ліній індукції, в будь-якій точці яких вектор магнітної індукції спрямований вздовж дотичної. Лінії магнітної індукції завжди замкнуті.

У магнітному полі на рухому заряджену частинку діє сила Лоренца, прямо пропорційна зарядові частинки, швидкості її руху та індукції магнітного поля: $F_L = qvB \sin \alpha$.

Магнітні властивості речовин характеризують магнітною проникністю μ . Для парамагнетиків $\mu > 1$, діамагнетиків $\mu < 1$. У феромагнетиків значення магнітної проникності досягає кількох десятків, сотень і навіть тисяч одиниць.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Провідниками електричного струму можуть бути різні речовини: метали, розчини електролітів і за певних умов газу та вакуум. Широкого застосування останнім часом набули речовини, які називають напівпровідниками.

Як уже йшлося вище, для створення струму в якомусь середовищі потрібна наявність у ньому заряджених частинок, здатних переміщатися під дією електричного поля. Цими частинками можуть бути і електрони, і йони. З'ясувати природу струму — означає встановити, які саме заряджені частинки переносять **заряд** у даному середовищі.

У цьому розділі розглянемо природу і закономірності електричного струму в різних середовищах.

§ 75. Основні положення електронної теорії провідності металів

Як пояснити виникнення струму в металах? Здавалося б, дуже просто. Якщо між кінцями металевого провідника підтримувати різницю потенціалів, у ньому виникає електричне поле. Діючи на наявні в металі вільні електрони, це поле надає їм прискорення в напрямі того кінця провідника, потенціал якого вищий (заряд електронів негативний). Виникає спрямований рух зарядів, який і є електричним струмом. Але як рухаються електрони під час створення між кінцями провідника різниці потенціалів? Здавалося б, прискорено, адже на них весь час діє сила $E = \rho E$, де E — напруженість електричного поля в провіднику.

Та якби це справді було так, то сила струму в будь-якому перерізі провідника з часом зростала б, що суперечить

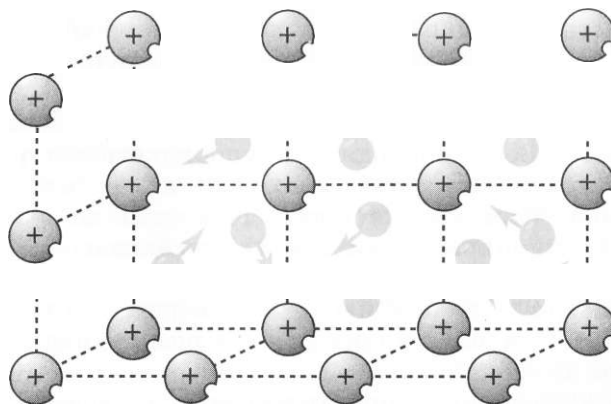
законові Ома — за сталої напруги через провідник проходить постійний струм: $I = \frac{U}{R}$ чому ж справа? Згадаємо внутрішню будову металів.

Валентні електрони в атомах металів зв'язані з атомами дуже слабо. Тому під час утворення кристалічної решітки вони легко відриваються від атомів і хаотично рухаються у проміжках між йонами, а самі йони здійснюють коливання у вузлах кристалічної решітки. Природно припустити, що електрони, які відірвалися від атомів, і є вільними носіями заряду в металах, тому їх звичайно називають *електронами провідності*.

Концентрація електронів провідності у металі n (кількість їх в одиниці об'єму) дуже велика: дорівнює числу атомів в одиниці об'єму металу, тобто порядку 10^{29} в 1 м^3 . Цим пояснюється висока електропровідність металів.

Електрони провідності в металах перебувають у безперервному русі. їх хаотичний рух (мал. 169) нагадує рух молекул ідеального газу. Це дало підстави вважати, що електрони провідності в металах утворюють своєрідний, досить густий електронний газ. Однак швидкість неупорядкованого руху електронів провідності у металах значно перевищує швидкості молекул у газі (вона становить приблизно 10^5 м/с).

Якщо в металі створити електричне поле, воно діятиме на електрони з певною силою і надаватиме їм прискорення в одному напрямі — протилежному до напрямку вектора напруженості поля. В електричному полі електрони, рухаючись хаотично, одночасно зміщуються в одному напрямі, тобто



Мал. 169

впорядковано. Впорядковане переміщення електронів провідності і є електричним струмом у металах.

Розглядаючи струм у металах, ми вважали, що електрони провідності вільно рухаються. Однак не слід забувати і про йонну кристалічну решітку. Електрони, які рухаються в металі, не схожі на вільні електрони, які летять, наприклад у кінескопі вашого телевізора. Електрон у металі перебуває під складною дією кристалічної решітки, яка впливає на його рух. Іноді цей вплив заважає рухові і електрону важко розігнатися. В інших решітках електрон стає навіть рухливішим, ніж в електронному пучку.

Створена в кінці XIX — на початку XX ст. класична електронна теорія електропровідності металів припускала, що в процесі руху під дією електричного поля електрони провідності співударяються з йонами кристалічної решітки (за звичайних умов електрон зазнає близько мільярда зіткнень за 1 с). Серед цих зіткнень бувають і такі, коли електрони всю набуту внаслідок розгону в електричному полі енергію передають решітці. Саме такі зіткнення (їх називають ефективними) відповідальні за електричний опір металу. Решту зіткнень щодо розуміння механізму проходження струму можна не брати до уваги (в результаті змінюється лише напрям швидкості електронів, але не її значення).

Середня швидкість упорядкованого руху електронів дуже мала. Між тим, добре відомо, що як тільки «клацнемо» вимикачем, лампа, яка знаходиться на відстані кількох десятків метрів від нього, засвітиться «вмить». Під час замикання електричного кола всі прилади, на якій би відстані вони не перебували один від одного, починають діяти практично одночасно. Звідси випливає, що швидкість поширення струму і швидкість упорядкованого переміщення носіїв струму — не одне й те саме. Коли йдеться про величезну швидкість поширення струму в провідниках, мають на увазі, що з такою швидкістю поширюється дія електричного поля на заряди у провіднику. Воно приводить в упорядкований рух майже миттєво електрони, які знаходяться в різних точках провідника, навіть дуже віддалених одна від одної. Електричне поле поширюється зі швидкістю близько 300 000 км/с, тобто зі швидкістю світла. В той же час електрони в провіднику, в будь-якій його точці, переміщуються під дією поля з дуже малою швидкістю, яка вимірюється частинами міліметра за секунду.

Часто кажуть про напрям електричного струму. По суті це означає, що ми цікавимося, в якому напрямі рухаються заряджені частинки в провіднику. Умовно вважають, що напрям

електричного струму збігається з напрямом, в якому рухаються позитивно заряджені частинки під дією електричного поля.

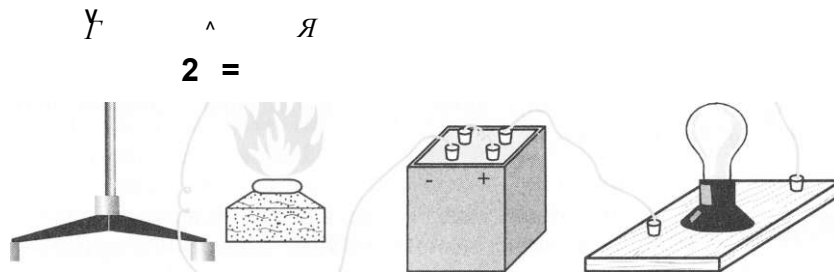
; 1. Чим пояснити велику концентрацію електронів провідності в металах? 2. Як рухаються електрони провідності в металевому провіднику, коли в ньому: а) немає електричного поля; б) створене електричне поле? 3. Чому, незважаючи на малу швидкість впорядкованого руху електронів у металевому провіднику, прилади починають діяти одночасно.

Вправа 24 ®^{значає} середню швидкість V впорядкованого руху електронів у металевому провіднику перерізом $S = 0,5 \text{ см}^2$, по якому проходить струм силою $I = 12 \text{ А}$, якщо в кожному кубічному сантиметрі провідника міститься $n = 5 \cdot 10^{21}$ електронів провідності. Заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.
2. На яку відстань перемістяться електрони у металевому провіднику перерізом $S = 0,5 \text{ см}^2$ протягом $t = 10 \text{ с}$, якщо сила струму $I = 3 \text{ А}$? На яку відстань поширився б струм за цей час? Концентрація електронів провідності в металі $n = 4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

§ 76. Залежність опору металевих провідників від температури

У попередньому параграфі йшлося про те, що під час руху в провіднику електрони провідності зазнають зіткнень з йонами кристалічної решітки і втрачають при цьому частину енергії, набутої в електричному полі. Ці зіткнення і зумовлюють опір провідника. З підвищенням температури провідника зростає середня швидкість теплового руху електронів і збільшується амплітуда коливань йонів у вузлах решітки. Це веде до збільшення кількості зіткнень електронів з йонами. Тому логічно припустити, що опір металів має залежати від температури. Щоб перекоб'ятися в цьому, виконаємо такі досліди.

Приєднаємо до батареї акумуляторів сталюю спіраль E (мал. 170). Послідовно з нею увімкнемо лампу, за розжарюванням волоска якої можна судити про зміну сили струму в колі. Нагріваючи спіраль за допомогою пальника, спостерігають зменшення яскравості лампи, що свідчить про помітне зменшення сили струму в колі. Отже, під час нагрівання сталюого провідника його опір зростає. Замінюючи сталюю спіраль іншими металевими провідниками, можна перекоб'ятися в тому, що з підвищенням температури опір металів зростає пропорційно їх температурі.



Мал. 170

Для характеристики залежності опору провідника від температури вводять *температурний коефіцієнт опору* α — величину, яка показує, наскільки змінюється кожна одиниця питомого опору речовини внаслідок зміни температури на один кельвін. Позначимо питомий опір даної речовини за температури $T_0 = 273$ К через ρ_0 , за довільної температури T — через ρ . Зміна питомого опору під час нагрівання від T_0 до T дорівнює $\rho - \rho_0$. Зміна кожної одиниці питомого опору під час такого нагрівання $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$ — Тоді температурний коефіцієнт опору буде:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}, \quad (76.1)$$

де $\Delta T = T - T_0$. Питомий опір, таким чином, за сталого температурного коефіцієнта лінійно залежить від температури:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T). \quad (76.2)$$

ρA

Графічно ця залежність зображається прямою лінією (мал. 171).

З курсу фізики 8-го класу ви знаєте, що $E = \rho i$. Підставивши в цей вираз значення ρ з (76.2), дістанемо:

$$E = E_0 (1 + \alpha \Delta T). \quad (76.3)$$

0

Мал. 169

Задача. Опір вольфрамового волоска електричної лампи за

$i = 20$ С дорівнює $Hi = 35,8$ Ом. Визначити температуру волоска розжарювання лампи, якщо після вмикання її в коло з напругою $V = 120$ В через лампу проходить струм силою $I = 0,33$ А. Температурний коефіцієнт опору вольфраму $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3}$ КГ⁻¹.

Розв'язання. Згідно з законом Ома опір увімкненої лампи $R = \frac{V}{I}$. З другого боку, $R = R_0(1 + \alpha \Delta T) = \frac{R_0}{1 + \alpha \Delta T} (1 + \alpha \Delta T)$.

Розв'язавши ці рівняння відносно ΔT , дістанемо:

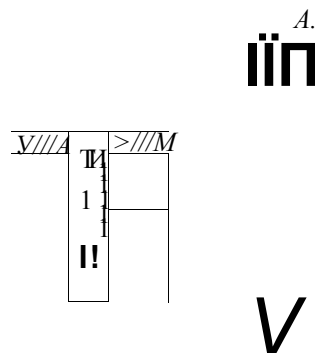
$$\Delta T = \frac{R - R_0}{R_0 \alpha} \text{ або } \Delta T = \frac{V}{I} - R_0 \cdot 2500 \text{ К.}$$

Температурні коефіцієнти опору чистих металів порівняно мало відрізняються між собою і приблизно дорівнюють $0,004$ К⁻¹. Як правило, з підвищенням температури температурні коефіцієнти опору металів зростають. Це означає, що за підвищених температур (близько точки плавлення) вже не спостерігається лінійної залежності опору від температури.

Температурні коефіцієнти опору сплавів, як правило, значно менші, ніж чистих металів, і істотно залежать від їх складу. Є сплави, наприклад константан і манганін, в яких температурний коефіцієнт опору настільки малий, що їх опір практично не залежить від температури. У манганіну α приблизно в 400 раз менший, ніж у міді. Провідники з цих сплавів застосовуються для виготовлення точних вимірювальних приладів, а також еталонів опору.

Залежність опору металевих провідників від температури використовується в різних вимірювальних і автоматичних пристроях. Наприклад, за зміною опору металеві дротини можна судити про зміни температури навколишнього середовища. Такий прилад дістав назву *термометра опору*. Основною його частиною є платинова дротина, намотана на керамічний каркас (мал. 172). Дротину вміщують у середовище, температуру якого треба визначити. Вимірявши опір дротини і знаючи її опір за 0 °С, тобто R_0 , визначають з формули (76.3) температуру середовища.

Такі термометри дають змогу вимірювати дуже низькі й дуже високі температури, коли звичайні рідинні термометри непридатні.



Мал. 172

За допомогою цих термометрів вимірюють температуру з точністю до тисячних частин градуса.

? 1. Який фізичний зміст температурного коефіцієнта опору?
2. Коли електричною лампою йде струм більшої сили: одразу після вмикання її в мережу чи через кілька хвилин? 3. Чому еталони опору виготовляють з константану чи манганіну?

Вправа 25 Опір мідної обмотки електромагніту дорівнює $R_1 = 200$ Ом за температури $t_1 = 20$ С. Яка сила струму проходить через обмотку за температури $t_2 = 135$ С, якщо електромагніт приєднано до джерела ЕРС постійного струму з $\mathcal{E} = 220$ В і внутрішнім опором $r = 10$ Ом? Температурний коефіцієнт опору міді $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

2. У скільки разів зміниться сила струму, що живить платинову піч, під час її нагрівання від 20 до 1200 С, якщо температурний коефіцієнт опору платини $\alpha = 3,65 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, а напруга на затискачах печі залишається незмінною?

3. На цоколі лампи з вольфрамовим волоском розжарювання написано: «220 В, 150 Вт». Визначте опір волоска розжарювання за $t = 20$ °С. Температурний коефіцієнт опору вольфраму $\alpha = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

4. Електрична плитка потужністю $P = 600$ Вт розрахована на напругу $V = 220$ В. Під час роботи плитки температура ніхромової нитки (температурний коефіцієнт опору $\alpha = 0,0001 \text{ К}^{-1}$) дорівнює $t = 500$ °С. Чому дорівнює опір плитки в неробочому стані?

§ 77. Надпровідність

Із зниженням температури опір металевих провідників зменшується. Що станеться з опором, коли температура наближатиметься до абсолютного нуля?

У 1911 р. голландський фізик Г. Камерлінг-Оннес встановив, що під час охолодження ртуті в рідкому гелії її опір спочатку змінювався поступово, а з досягненням температури $4,1$ К різко спадав до нуля. Явище зменшення опору до нуля при температурі, відмінній від абсолютного нуля, називають *надпровідністю*. Згодом надпровідність було виявлено у свинцю, цинку, олова, алюмінію та інших металів, а також у деяких сплавів.

Речовини у надпровідному стані мають надзвичайно цікаві властивості. Якщо в кільцевому провіднику, який перебуває в надпровідному стані, створити струм, а потім вимкнути джерело, сила цього струму не змінюється як завгодно довго. В одному з дослідів, проведених у 1954—1956 рр., струм у надпровідному свинцевому кільці циркулював понад 2,5 роки

і при цьому не було відмічено зменшення сили струму. У ненадпровідному провіднику в цьому випадку струм швидко припиняється.

Другою цікавою і важливою властивістю надпровідників є неможливість створення всередині речовини в надпровідному стані магнітного поля. Зовнішнє магнітне поле не проникає всередину надпровідників.

Третя важлива особливість надпровідності полягає в тому, що магнітне поле руйнує стан надпровідності. Чим більше надпровідник охолоджений нижче температури переходу в надпровідний стан, тим сильніше і «критичне» магнітне поле, за якого зникає надпровідність. Магнітним полем, яке руйнує надпровідність, може бути і поле самого струму в надпровіднику.

Надпровідники знаходять широке практичне застосування. Одним з найважливіших застосувань є створення потужних електромагнітів з надпровідними обмотками. Перевагами таких електромагнітів є: малі розміри і маса, мізерне споживання електричної енергії, можливість тривалого існування стабільного електромагнітного поля без втрат енергії. Однак дістати дуже сильне магнітне поле за допомогою надпровідного магніту не можна, оскільки таке поле руйнує надпровідний стан. Для кожного провідника в надпровідному стані існує критичне значення сили струму, перевищити яке, не порушуючи надпровідного стану, не можна.

Надпровідні магніти застосовують у потужних прискорювачах елементарних частинок, у реакторах керованого термоядерного синтезу, в магнітогідродинамічних генераторах (МГД-генераторах), що перетворюють механічну енергію струменя розжареного йонізованого газу, який рухається в магнітному полі, в електричну енергію; в електронних мікроскопах, квантових підсилювачах та інших електронних приладах.

Велику роботу ведуть учені й інженери у всьому світі з використання надпровідників в електроенергетиці, особливо для створення ліній електропередач по проводах без втрат. Створено і діють електричні генератори і трансформатори з надпровідними обмотками. Ведуться випробування надпровідного кабелю на силу струму 7500 А.

Широко застосовуються надпровідники в електронно-обчислювальній техніці, зокрема для створення елементів пам'яті обчислювальних машин.

Однак прогрес у техніці застосування надпровідників до недавніх пір стримувався високою вартістю систем глибокого охолодження провідників до наднизьких температур 15—20 К

за допомогою рідкого гелію. У 1986 р. було відкрито високо-температурну надпровідність керамік — складних оксидних сполук Лантану, Барію, Сульфуру та інших елементів. Надпровідність таких керамік зберігається до температур близько 100 К, які можна дістати, скориставшись значно дешевшим рідким азотом.

Пояснити надпровідність можна лише на основі квантової теорії, запропонованої у 1957 р. Д ж. Б а р д і н о м, А. К у п е р о м, Д ж. Ш р і ф ф е р о м і М. М. Б о г о л ю б о в и м. Згідно з цією теорією в металі в надпровідному стані між електронами провідності відбувається обмін порціями (квантами) енергії, внаслідок чого між електронами виникають сили притягання, які можуть перевищувати кулонівські сили відштовхування. При цьому утворюються пари електронів, які рухаються в кристалічній решітці без опору.

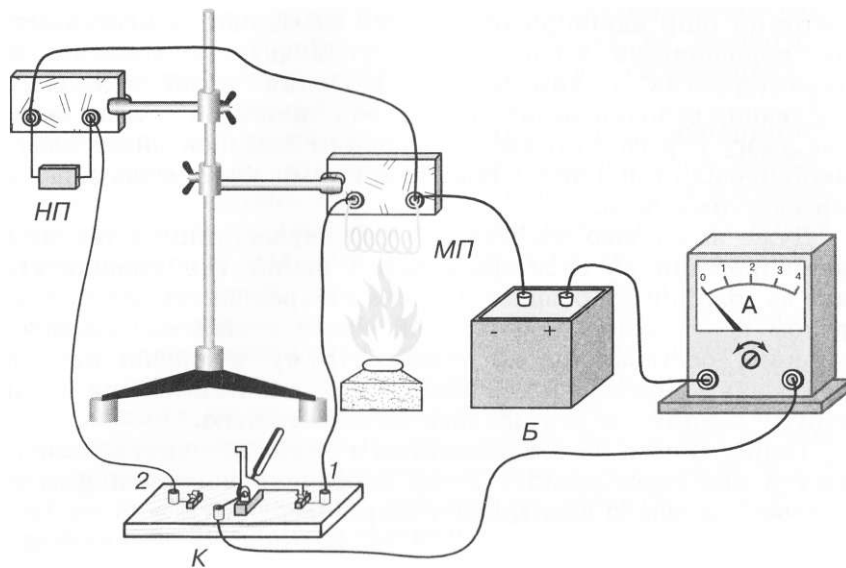
§ 78- Електричний струм у напівпровідниках

У другій половині ХХ ст. у різних галузях народного господарства широкого розповсюдження набули напівпровідникові прилади. Їх велика популярність пояснюється високою економічністю апаратури на напівпровідниках, довговічністю і міцністю за малих габаритів. Які ж речовини є напівпровідниками і які їх електричні властивості?

Звичайно напівпровідниками вважають речовини, питомий опір яких має проміжне значення між питомим опором металів і діелектриків. Проте є серед них речовини з проміжним значенням питомого опору, але вони не належать до напівпровідників. Деякі напівпровідники мають таку саму високу провідність електрики, як і метали. Напівпровідники відрізняються від інших речовин багатьма властивостями, і значення їх питомого опору не є основним серед них. Розглянемо деякі з цих властивостей.

Характерна особливість напівпровідників — це дуже сильна залежність їх питомого опору від стану речовини: температури, освітлення, наявності домішок тощо. В цьому легко переконатися на дослідах.

Складемо електричне коло з послідовно увімкнутих джерела струму і амперметра. Приєднаємо до цього кола шматок металевго провідника у вигляді спіральки *МП* і напівпровідник *НП* (наприклад, германієву пластинку) так, щоб їх можна було за допомогою вимикача *К* почергово вмикати в коло (мал. 173). Увімкнемо спочатку в коло металевий провідник (вимикач в положенні *I*) і відмітимо



Мал. 173

показання амперметра. Потім піднесемо пальник до провідника і нагріємо його. Амперметр покаже зменшення сили струму. Це зрозуміло, оскільки опір металевих провідників зростає з підвищенням температури. Увімкнемо тепер у коло напівпровідник (вимикач у положенні 2), відмітимо показання амперметра і нагріємо напівпровідник. Амперметр покаже зростання сили струму в колі, що свідчить про зменшення опору напівпровідника з підвищенням температури.

Дослідження показали, що опір у більшості напівпровідників значно чутливіший до змін температури, ніж у металів. Якщо опір металів з підвищенням температури зростає приблизно лінійно, опір напівпровідника, навпаки,— різко зменшується.

Другою важливою особливістю напівпровідників є залежність їх опору від освітлення. Складемо електричне коло з послідовно увімкнутих джерела струму, амперметра і напівпровідника. Закриємо напівпровідник світлонепроникним екраном і замкнемо коло. Амперметр покаже наявність у колі незначного струму. Приймемо тепер екран і освітимо напівпровідник. Амперметр покаже різке зростання сили струму, а це означає, що опір напівпровідника внаслідок освітлення зменшився.

Напівпровідники надзвичайно чутливі до вмісту домішок. Мізерна добавка домішок може в сотні й тисячі разів змінити

питомий опір напівпровідника. Ця надзвичайна властивість напівпровідників, з одного боку, ускладнює дослідження їх характеристик і вимагає опрацювання нової технології добування речовин винятково високої чистоти; з другого боку, дає змогу строго дозованим введенням домішок виготовляти напівпровідники з практично будь-якими заздалегідь заданими властивостями.

Дуже важливою особливістю напівпровідників є те, що в напівпровідниках спостерігається і новий тип провідності, яка за зовнішніми ознаками схожа на провідність, зумовлену рухом позитивних зарядів. Цей ефект у свій час здавався дивним, оскільки проходження струму в провіднику не пов'язане з переміщенням йонів, і природа позитивних носіїв струму певний час залишалася не висвітленою.

Таким чином, ви ознайомилися з рядом важливих властивостей напівпровідників. Тепер спробуємо пояснити ці властивості на основі електронної теорії твердих тіл.

§ 79. Властивості напівпровідників

Залежно від електричних властивостей речовини поділяють на провідники, діелектрики і напівпровідники. Які ж особливості будови твердих тіл зумовлюють величезну кількісну і якісну різницю електричних властивостей цих речовин?

З молекулярної фізики ми дізналися, що взаємодія між атомами твердого тіла може мати різний характер. В одних тілах ця взаємодія здійснюється за допомогою валентних електронів, в інших — взаємодіють йони. Внаслідок міжатомної взаємодії зв'язок валентних електронів зі своїми атомами послаблюється і в деяких твердих тіл він стає настільки малим, що валентні електрони дістають можливість вільно переміщатися у кристалі. Такі речовини містять велику кількість не зв'язаних з певним атомом електронів і тому мають дуже малий питомий опір. Залежність питомого опору таких речовин від температури визначається швидкістю упорядкованого руху електронів, оскільки їх концентрація із зміною температури не змінюється. Інакше кажучи, такі тіла мають властивості, характерні для металів.

В інших твердих тілах взаємодії самої по собі ще не досить для відщеплення електронів від атомів і перетворення їх на електрони провідності. Для цього навіть слабо зв'язаним електронам треба надати певної додаткової енергії (*енергії йонізації*), іноді за рахунок енергії теплових коливань атомів,

З підвищенням температури речовини зростають енергія та кількість доливаних і кількість електронів, які дістають дос-

татню для відщеплення від атомів енергію. В таких речовинах концентрація електронів провідності навіть за кімнатної температури може мати помітне значення, яке сильно зростає з підвищенням температури.

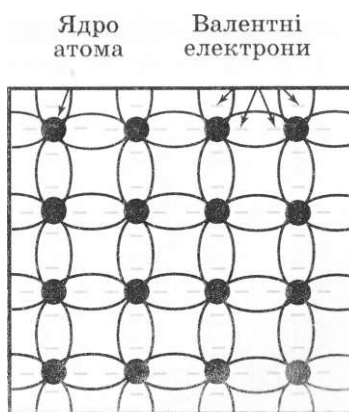
Отже, основною відмінністю металів від напівпровідників є те, що в металах практично всі валентні електрони перебувають у вільному стані, а в напівпровідниках — у зв'язаному. Причому енергія зв'язку їх з атомами невелика, так що за рахунок теплових коливань йонів решітки частина електронів із зв'язаного стану може переходити у вільний.

У деяких речовин енергія зв'язку валентних електронів з атомами може значно перевищувати енергію коливального руху атомів решітки, і тому за звичайних умов у таких речовинах вільних електронів практично немає. Такі речовини називають *діелектриками (ізоляторами)*. Таким чином, між напівпровідниками і діелектриками не можна провести чіткої межі — за досить високих температур діелектрики можуть поводити себе як напівпровідники.

1. Чим відрізняються напівпровідники від діелектриків і металів?
2. Чому опір напівпровідникових матеріалів залежить від температури?

§ 80- Власна провідність напівпровідників

З'ясуємо детальніше процес утворення електронів провідності у напівпровідниках. Для конкретності міркувань розглянемо Германій — типовий напівпровідник. Його порядковий номер $Z = 32$, а це означає, що до складу атома входить 32 електрони. Однак із них лише чотири слабко зв'язані з ядром атома. Саме вони беруть участь у хімічних реакціях і зумовлюють чотири валентності Германію. В решітці германію атоми розміщуються так, що кожен атом оточений чотирма найближчими сусідами. Спрощену плоску схему розташування його атомів показано на малюнку 174. Зв'язок двох сусідніх атомів зумовлений парою валентних електронів, які утворюють парно-електронний, або валентний зв'язок. Чотири валентні електрони кожного атома вступають у ковален-



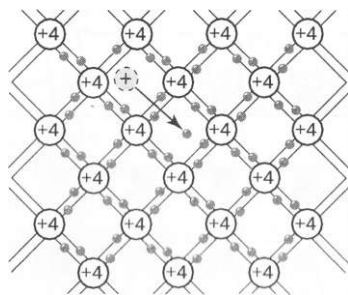
Мал. 174

тні зв'язки з електронами сусідніх атомів, так що вільних електронів у чистому германії немає.

Таким чином, чистий германій за дуже низьких температур має бути надійним ізолятором. Під час підвищення температури кристала внаслідок теплових коливань решітки відбувається розривання деяких валентних зв'язків. У результаті цього частина електронів, які раніше брали участь в утворенні валентних зв'язків, відщеплюються і стають електронами провідності. За наявності електричного поля вони переміщуються проти поля і утворюють електричний струм. Цей механізм провідності по суті не відрізняється від провідності металів.

Однак істотною відмінністю від металів, яка визначає виняткові можливості технічного використання напівпровідників, є можливість ще й іншого механізму електропровідності. Він зумовлений тим, що будь-яке розривання валентного зв'язку спричиняє появу вакантного місця, де відсутній зв'язок. Такі місця з відсутніми електронами зв'язку дістали назву «дірок» (мал. 175).

Нестача в даному місці одного елементарного електричного заряду еквівалентна наявності однакового за значенням надлишкового позитивного заряду, тому дірка веде себе як позитивно заряджена частинка. Дійсно, за наявності дірки один з електронів зв'язку може перейти на її місце, внаслідок чого на цьому місці відновлюється нормальний зв'язок, але з'явиться дірка в іншому місці і в цю нову зможе перейти якийсь з інших електронів зв'язку, а це рівносильно переміщенню дірки. Щось схоже спостерігається, наприклад, коли в ряду крісел у театрі є вільне крайнє праве місце і глядачі послідовно пересідають на вільне місце. Все відбувається так, ніби вільне місце рухається справа наліво в бік, протилежний переміщенню глядачів.



Мал. 175

У зовнішньому електричному полі електрони провідності рухаються проти напруженості поля, а дірки — в напрямі напруженості. В результаті електричний струм забезпечується рухом як електронів провідності, так і дірок. Прийнято розрізняти ці струми, називаючи їх відповідно *електронним* і *зірковим*, а електропровідність, зумовлену переміщенням дірок, називають *дірковою провідністю*. В процесі діркової провідності беруть участь не позитивно заряджені йони

атомів, а звичайні електрони зв'язку (непровідності), які переміщуються від дірки до дірки проти поля.

Розглянуте вище стосується хімічно чистих напівпровідників, які містять завжди однакові кількості електронів провідності і дірок.

- ? 1. Які рухомі носії зарядів є в чистому напівпровідникові?
 2. Поясніть механізм проходження струму через напівпровідник без домішок.

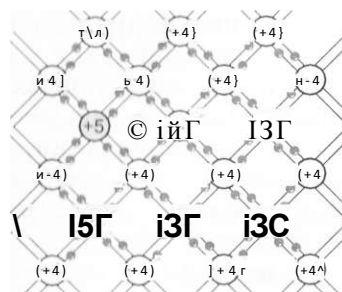
§ 81. Домішкова електропровідність напівпровідників

Вище вже йшлося про те, що мізерні кількості домішок різко змінюють електричні властивості напівпровідників. При цьому під домішкою звичайно розуміють як атоми чи йони інших елементів, так і різного роду дефекти і спотворення в кристалічній решітці: вузли, тріщини тощо. Далі розглянемо в основному спотворення решітки, зумовлені наявністю реальних домішок — атомів інших елементів.

Повернемося до конкретного прикладу. Припустимо, що в напівпровіднику германію є атоми інших хімічних елементів, які заміщають окремі його атоми. Нехай домішками є атоми Фосфору — елемента п'ятої групи Періодичної системи хімічних елементів. Він має п'ять валентних електронів. Але для забезпечення парно-електронних зв'язків чотиривалентного Германію потрібно всього чотири електрони. Тому п'ятий електрон атома Фосфору виявляється зв'язаним особливо слабо і може бути легко відірваним від домішкового атома за рахунок енергії теплових коливань. При цьому виникає електрон провідності, а атом Фосфору перетворюється на позитивно заряджений йон. Утворення ж дірки не відбувається. Подібний процес схематично показаний на малюнку 176.

Отже, домішки можуть збільшувати концентрацію електронів провідності і створювати в напівпровіднику електронну домішкову провідність д-типу (від *педаню* — негативний). Такі домішки називають *донорними*.

Зовсім інший результат дістанемо, якщо в кристалічній решітці германію його атоми заміню-



Мал. 169

a

б

Мал. 177

ються атомами з меншою валентністю, наприклад тривалентними атомами Індію (мал. 177, *a*). У такого домішкового атома не вистачає одного електрона для утворення нормального ковалентного зв'язку, характерного для решітки германію. Однак домішковий атом Індію може створити всі зв'язки, якщо він позичить електрон у ближнього атома Германію. Тоді на місці електрона, який залишив атом Германію, утворюється дірка (мал. 177, *б*). Енергія, необхідна для переходу електрона від сусіднього атома Германію до атома Індію, невелика, тому за кімнатної температури всі домішкові атоми Індію захоплюють від сусідніх атомів Германію електрони, яких не вистачає для нормального зв'язку, а в решітці германію з'являється така сама кількість дірок.

Домішки, які захоплюють електрони від сусідніх атомів і викликають появу дірок, називають *акцепторними*.

Процес послідовного заповнення дірок електронами еквівалентний, як ми вже переконалися, переміщенню дірки у напівпровіднику і виникненню в ньому носіїв струму.

Оскільки перехід електрона із сусіднього атома відбувається практично без втрат енергії, то дірка, що утворилася, вільно переміщається у кристалі в результаті перестрибувань електронів від сусідніх атомів на дірку. Якщо зовнішнє електричне поле відсутнє,— дірки рухаються хаотично. Коли ж на напівпровідник накласти електричне поле, стрибкоподібний рух електронів від атома до атома стає напрямленим, отже, набуває спрямування і рух дірок у протилежний бік.

Описаний тип провідності називається провідністю р-типу (від *розіііV* — позитивний), а напівпровідники з такою провідністю — дірковими, або напівпровідниками р-типу.

Природно, що, коли у напівпровідник одночасно вводять донорні і акцепторні домішки, які створюють обидва типи провідності, характер домішкової провідності залежатиме від того, яка з домішок створює більшу концентрацію носіїв струму. Якщо концентрація електронів провідності в напівпровіднику значно перевищує концентрацію дірок, напівпровідник має електронну провідність (n-типу). Якщо переважає концентрація дірок, то електропровідність буде дірковою (p-тип).

Таким чином, вводячи в напівпровідники різні домішки, можна в широких межах не лише змінювати значення електропровідності, а й створювати їх з переважною електронною чи дірковою провідністю.

? 1. Як одержати напівпровідник з переважною електронною провідністю (n-типу)? 2. Як одержати напівпровідник з дірковою провідністю (p-типу)? 3. Чому незначна кількість домішки п'ятивалентного або тривалентного хімічного елемента до речовини кремнію різко збільшує її провідність?

§ 82. Термо- і фоторезистор

Залежність питомого опору напівпровідників від температури широко використовується для вимірювання температур, автоматичного регулювання сили струму в різних керуючих реле тощо. Прилади, дія яких ґрунтується на використанні значної залежності опору напівпровідників від температури, дістали назву *терморезисторів* (або *термісторів*).

Для виготовлення терморезисторів використовуються напівпровідникові матеріали з великим температурним коефіцієнтом опору. Терморезистори широко використовуються в різних установках автоматики й телемеханіки, радіотехніці, термометрії тощо. Принцип дії цих установок такий. Терморезистор, опір якого значно перевищує опір інших елементів, вмикають в електричне коло пристрою. Коли в колі проходить електричний струм, його сила визначається опором терморезистора (або його температурою). З підвищенням температури терморезистора сила струму в колі зростає і, навпаки, зі зниженням температури сила струму зменшується. Таким чином, зміни температури терморезистора впливають на зміни сили струму в колі. Ця важлива обставина дає змогу застосовувати терморезистори в різних схемах і створювати багато автоматичних пристроїв, просто й надійно здійснювати дистанційне вимірювання і ре-

+ -

Я

К ~

Нагрівний елемент

Мал. 178

гулювання температури, пожежну сигналізацію, контроль за температурним режимом працюючих машин і механізмів тощо. Для прикладу розглянемо принцип будови установки для регулювання температури в певних межах (наприклад, в термостатах, інкубаторах тощо). Схему такої установки показано на малюнку 178. Повітря в приміщенні нагрівають за допомогою електричного нагрівника, увімкнутого в мережу через контакти електромагнітного реле *К* і *Я*. Під час нагрівання повітря нагрівається і терморезистор, що веде до зменшення його опору і зростання сили струму, який проходить в обмотці реле *Р*. У разі досягнення певної сили струму реле спрацьовує — рухомий контакт відходить від нерухомого, коло нагрівника розривається і повітря в приміщенні починає охолоджуватися. Із зниженням температури до певного значення опір терморезистора знову зростає і електромагнітне реле «відпустить» рухомий контакт — коло нагрівника замкнеться. Добираючи відповідний терморезистор, нагрівник і електромагнітне реле, можна створити терморегулятор для потрібних режимів експлуатації.

Залежність опору напівпровідників від освітлення (§ 78) використовується у *фоторезисторах* (фотоопорах). Найпростіший фоторезистор — це діелектрична пластинка (мал. 179), на яку нанесено тонкий шар напівпровідника. На кінцях цього шару закріплені металеві електроди, а всю систему вміщують у пластмасовий корпус з віконцем для світлових променів.

Фоторезистори використовуються в різних пристроях автоматики й телемеханіки, у пристроях для відтворення оптичного запису звуку тощо. Вони дають змогу керувати на відстані виробничими процесами, автоматично відрізнати порушення нормального ходу процесу і зупинити його в таких випадках.

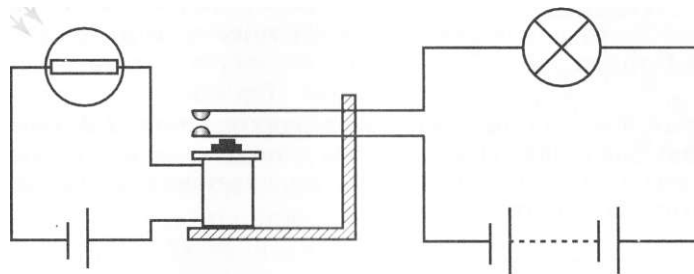
На малюнку 180 наведено схему фотореле з фоторезистором, за допомогою якого можна здійснювати автоматичне вмикання і вимкання маяків, освітлення вулиць міст тощо.

Вдень сонячне світло освітлює фоторезистор, і від того його опір незначний. За цих умов у колі

Світло



Мал. 179

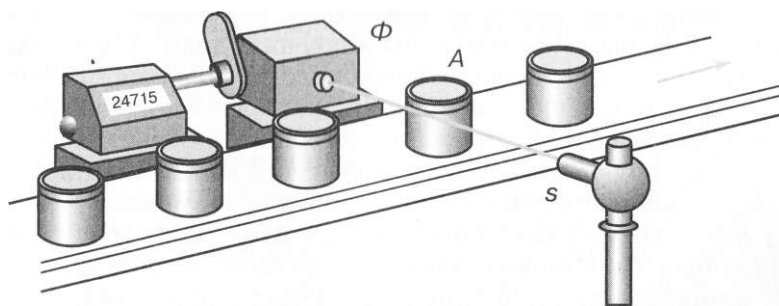


Мал. 180

проходить струм значної сили, і якір реле притягується до осердя котушки. Коло освітлювальної лампи розімкнуте. Від настання сутінок опір фоторезистора різко зростає, сила струму в його колі зменшується майже до нуля, якір відходить від осердя і замикає коло освітлювальної лампи.

Аналогічні реле на фоторезисторах застосовуються в автоматичних лініях для підрахунку і сортування виробів масової продукції на виробництві за їх розмірами і кольором. На малюнку 181 показано схему установки для сортування деталей за розмірами. З одного боку лінії конвеєра розміщене джерело світла Φ , а з другого — фотореле Φ , яке під час його затемнення вмикає електромеханічний скидач. Відстань від полотна лінії до світлового променя відповідає заданій висоті деталі. Якщо конвеєром рухається деталь, висота якої більша за відстань від полотна лінії до світлового променя, то, проходячи повз фоторезистор, вона перекриває світловий промінь. Реле спрацьовує, і електромеханічний скидач переміщає браковану деталь на сусіднє полотно.

Фоторезистори мають такі переваги: практично необмежений строк служби, малі розміри, простота виготовлення,



Мал. 181

висока чутливість і надійність у роботі тощо. Це зумовило їх широке застосування в різноманітних автоматичних пристроях і приладах.

? 1. Який принцип дії терморезисторних пристроїв? 2. Накресліть схему використання терморезистора в установках для регулювання температури. 3. Накресліть схему використання фоторезистора в автоматичних пристроях.

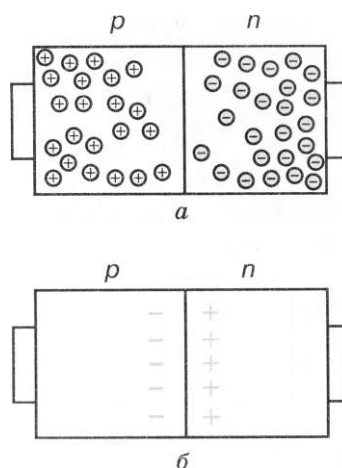
§ 83. Електронно-дірковий перехід. Напівпровідниковий діод

Найширше застосування напівпровідники знаходять у приладах для випрямлення змінного струму і підсилення електричних сигналів. В основі дії цих напівпровідникових приладів лежать процеси, які відбуваються в місцях контакту різних напівпровідників між собою і напівпровідників з металами.

Розглянемо коротко фізичні процеси в таких контактах. Пригадаємо, що за характером своєї провідності напівпровідники можуть бути електронними (д-тигі) і дірковими (р-тип). У напівпровідниках n-типу основними носіями заряду є електрони, а в напівпровідниках p-типу — дірки. Приведемо до зіткнення (контакту) два напівпровідники з різними типами провідності (мал. 182). Внаслідок теплового руху електрони з n-області дифундуватимуть у p-область (і там рекомбінуватимуть з дірками), а дірки з p-області — в n-область (і рекомбінуватимуть з електронами). Це приводить до збіднення електронами / γ -напівпровідника поблизу межі поділу і до утворення надлишкового позитивного заряду в / γ -напівпровіднику. Дифузія дірок з p-напівпровідника спричиняє утворення в p-області поблизу межі поділу надлишкового негативного заряду. Таким чином, виникає подвійний електричний шар з контактною різницею потенціалів, яка перешкоджає переходу електронів у p-область і дірок в n-область. З часом взаємне проникнення дірок і електронів зменшується і врешті-решт встановлюється така різниця потенціалів на межі поділу p—n-областей, за якої настає рівновага.

Оскільки внаслідок дифузії електронів у p-область і дірок у n-область у подвійному шарі відбувається рекомбінація носіїв струму, в рівноважному стані в шарі поблизу межі поділу з боку n-напівпровідника концентрація електронів менша, ніж у решті цього напівпровідника, а в прилеглому до межі шарі з боку напівпровідника p-типу концентрація дірок менша, ніж в іншій його частині. Контактна різниця потенціалів між напівпровідникам з різним механізмом провідності стано-

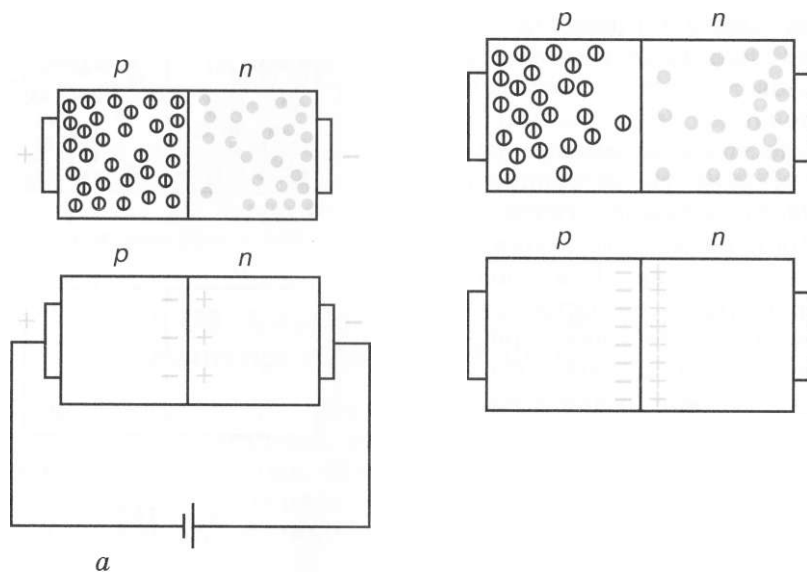
виль кілька десятих вольт. Електрони і дірки мають енергію теплового руху, достатню для подолання цієї різниці потенціалів лише за температур близько кількох тисяч градусів, а за звичайних температур електрони і дірки не можуть проникнути в подвійний шар. Тому подвійний шар на межі напівпровідників з різним механізмом провідності виявляється збідненим на носії струму і має підвищений опір. Таким чином, поблизу межі поділу напівпровідників / Γ -типу і p -типу виникає шар підвищеного опору, який називається *електронно-дірковим*, або *$p-n$ -переходом*.



Мал. 182

Особливістю $p-n$ -переходу є те, що його опір залежить від значення і напрямку напруженості зовнішнього електричного поля, прикладеного до цього переходу. Припустимо, що n -напівпровідник приєднано до негативного полюса джерела напруги, а напівпровідник p -типу — до позитивного полюса (мал. 183, а). Під дією електричного поля електрони в n -напівпровіднику і дірки в p -напівпровіднику переміщуються назустріч одні одному до межі поділу напівпровідників (межі $p-n$ -переходу). Внаслідок цього концентрація носіїв струму в області підвищеного опору збільшується, що веде до зменшення опору $p-n$ -переходу. Зі збільшенням напруги опір $p-n$ -переходу зменшується. Цей напрям зовнішнього електричного поля прийнято називати *пропускним*.

Якщо ж змінити полярність прикладеної до напівпровідників напруги, то електрони в n -напівпровіднику і дірки в p -напівпровіднику рухатимуться від межі поділу в протилежні боки (мал. 183, б). Внаслідок цього розмір подвійного шару, збідненого на носії струму електрони й дірки, збільшуватиметься і його опір зростає. Опір буде тим більший, чим більша напруга прикладена до $p-n$ -переходу. За досить великої напруги цього напрямку подвійний шар є практично ізолятором, в якому відсутні рухомі носії струму. Цей напрям зовнішнього електричного поля називають *запінним*: у цьому напрямі електричний струм практично не проходить через контакт напівпровідників.



Мал. 183

Отже, ми з'ясували, що контакт напівпровідників p - і n -типу має односторонню провідність — він добре пропускає струм в одному напрямі (пропускному) і практично не пропускає струму в протилежному (запінному) напрямі. Дія контакту аналогічна випрямляючій дії двохелектродної лампи — діода. Тому напівпровідниковий пристрій, який містить один p - n -перехід, називають *напівпровідниковим діодом*. Криву, яка графічно показує залежність сили струму від прикладеної до p - n -переходу напруги, називають *вольтамперною характеристикою*.

Вольтамперна характеристика напівпровідникового діода має вигляд, показаний на малюнку 184. Додатним значенням напруги відповідає випадок, коли до позитивного полюса джерела струму приєднаний напівпровідник p -типу, а до негативного — n -типу. Від'ємним значенням напруги відповідає зворотна полярність. Вольтамперна характеристика дає лише якісне уявлення про процеси, які відбуваються в напівпровідниковому діоді. Насправді різниця значень прямого і зворотного струмів значно більша.

-i!

^

+7

Мал. 184

Напівпровідникові діоди мають ряд переваг порівняно з вакуумними діодами. В них відсутній підігрівний катод, розміри їх значно менші, ніж вакуумних діодів, вони мають більшу механічну міцність, порівняно легко можна створити діоди для випрямлення сильних струмів тощо.

Застосування напівпровідникових діодів для випрямлення змінних струмів і в радіотехніці для випрямлення і перетворення електричних коливань високої частоти розглянемо пізніше.

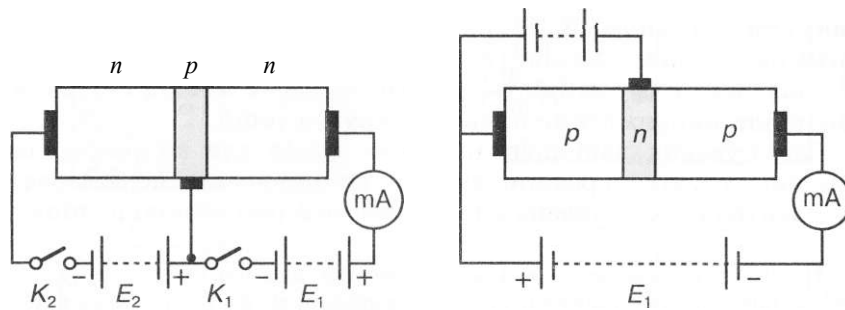
? 1. Поясніть процеси, які відбуваються під час контакту двох напівпровідників з різними типами провідності. 2. Чому вільні носії зарядів не можуть утриматися в області p — n -переходу? 3. Накресліть схему переміщення електронів провідності і дірок після вмикання джерела струму в пропускному напрямі. 4. Чому сила прямого струму в p — n -переході значно перевищує силу зворотного струму за однакових значень напруги? 5. У двох однакових закритих коробках знаходяться: в одній — напівпровідниковий діод, а в іншій — невеликий реостат. Кінці приладів з кожної коробки виведені назовні і приєднані до клем. Як визначити, в якій з коробок знаходиться діод?

§ 84. Транзистор

Особливо широко почали застосовувати напівпровідники в техніці після створення у 1948 р. напівпровідникових підсилювачів електричних коливань — *транзисторів*. Ці напівпровідникові прилади діють подібно до вакуумних електронних ламп із сітками. Розглянемо будову і принцип дії одного з напівпровідникових приладів, які діють аналогічно до трьохелектродної електронної лампи (тріода) і дістали назву напівпровідникового тріода.

Транзистор є кристалом германію, в якому внесенням домішок створені три ділянки з чергуванням типів провідності: діркова — електронна — діркова (можливе й інше чергування: електронна — діркова — електронна), між якими знаходяться два p — n -переходи.

Ці три ділянки називають відповідно емітером, базою (або основою) і колектором транзистора. Увімкнемо між колектором і базою джерело напруги E_1 в запірному напрямі p — n -переходу, а між емітером і базою — джерело напруги E_2 в пропускному напрямі (мал. 185). Замкнувши спочатку лише вимикач K_1 , побачимо, що в колі колектора через p — n -перехід проходить дуже слабкий струм. Якщо тепер замкнути вимикач K_2 , то міліамперметр покаже значне зростання сили струму в колі колектора, яка зростатиме зі збільшенням напруги джерела E_2 і зменшуватиметься під час її зменшення.



Мал. 185

З'ясуємо причину зміни сили струму в колі колектора зі зміною напруги на емітері. Основну частину електричного струму в емітері створює переміщення дірок у напрямі до бази транзистора, і внаслідок цього відбувається проникнення дірок у базу, тобто в ділянку з електронною провідністю. Оскільки база робиться звичайно дуже вузькою (від кількох міліметрів до десятків мікрон), то дірки не встигають рекомбінувати з електронами і досягають другого р—г-переходу. Тут на дірки починає діяти електричне поле, створюване джерелом напруги E_x , і вони, проникаючи в колектор, створюють в його колі додатковий струм. Таким чином, будь-яка зміна сили струму в колі емітера приводить до значних змін сили струму в колі колектора. Це пов'язано зі змінами напруг за законом Ома, тому, змінюючи напругу в колі емітера, можна одержати значно більші зміни напруги в колі колектора, тобто підсилити напругу. Отже, транзистор дає змогу підсилити потужність.

Транзистори мають ряд істотних переваг над електронними лампами. Вони не мають розжарюваного катода і тому споживають меншу потужність, не потребують вакууму, їх надійність і термін слугування більші, ніж в електронних лампах, вони мають значно менші розміри. Транзистори успішно застосовують замість електронних ламп у багатьох радіотехнічних схемах і в електронно-обчислювальних машинах. Недоліком напівпровідникових приладів є сильна залежність їхніх електричних характеристик від температури.

Крім розглянутого транзистора, існують й інші їх типи, так само, як й інші схеми вмикання. Так, крім наведеної схеми вмикання (див. мал. 185), яка дістала назву схеми із спільною базою, транзистори можуть вмикатися за схемою із спільним

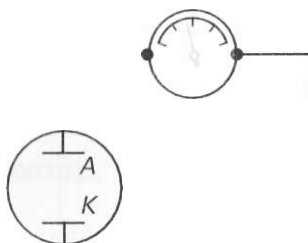
емітером (мал. 186). Процеси, які відбуваються в транзисторі в цьому випадку, аналогічні розглянутим вище.

? 1. Як побудовано транзистор? 2. Як вмикається транзистор в електричне коло? 3. На чому ґрунтується здатність транзистора підсилювати електричні сигнали?

§ 85. Електричний струм у вакуумі. Електронна емісія

У трубках телевізорів, радіолампах, установках для плавлення металу електронним променем, багатьох інших установках електрони рухаються у вакуумі. Яким чином одержують потоки електронів у вакуумі? Як керують цими потоками?

Ми знаємо, що в металах є електрони провідності. Середня швидкість руху цих електронів залежить від температури металу: вона тим більша, чим вища температура. Помістимо у вакуумі на певній відстані один від одного два металеві електроди — A і K (мал. 187) і створимо між ними певну різницю потенціалів. Струму в колі не буде, що свідчить про відсутність у просторі між електродами вільних носіїв електричного заряду. Отже, хоча в металах і є вільні електрони, вони утримуються всередині металу і за звичайних температур практично не можуть виходити з нього. Щоб електрони змогли вийти за межі металу (подібно до вилітання молекул за межі рідини під час випаровування), вони мають подолати сили електростатичного притягання з боку надлишку позитивного заряду, який виникає в металі внаслідок вилітання електронів, а також сил відштовхування з боку електронів, які вилетіли раніше і утворили поблизу поверхні металу електронну «хмарку». Інакше кажучи, для вилітання електрона з металу у вакуум він має виконати певну роботу A проти цих сил, яка, природно, різна для різних металів. Цю роботу називають *роботою виходу* електронів з металу. Робота виходу виконується електронами за рахунок їхньої кінетичної енергії. Тому зрозуміло, що повільні електрони вирватися з металу не можуть, а вириваються лише ті, кінетична енергія яких E_k перевищує роботу виходу, тобто $E_k > A$. Вихід вільних електронів з металу називають *емісією електронів*.



Щоб існувала емісія електронів, необхідно надати електронам провідності металу кінетичної енергії, достатньої для виконання роботи виходу. Залежно від того, яким способом надається електронам необхідна кінетична енергія, розрізняють різні типи електронної емісії. Якщо енергія надається електронам провідності за рахунок бомбардування металу ззовні якимись іншими частинками (електронами, йонами), має місце *вторинна електронна емісія*. Емісія електронів може відбуватися під впливом опромінення металу світлом. У цьому випадку спостерігається *фотоемісія*, або *фотоелектричний ефект*. Можливе також виривання електронів з металу під дією сильного електричного поля — *автоелектронна емісія*. Нарешті, електрони можуть набувати кінетичної енергії за рахунок нагрівання тіла. У цьому випадку кажуть про *термоелектронну емісію*.

Розглянемо детальніше явище термоелектронної емісії та його застосування.

За звичайних температур мізерна кількість електронів може мати кінетичну енергію, порівнянну з роботою виходу електронів з металу. З підвищенням температури кількість таких електронів зростає і під час нагрівання металу до температур порядку 1000 — 1500 С вже значна кількість електронів матиме кінетичну енергію, яка перевищить роботу виходу з металу. Саме ці електрони можуть вилетіти з металу, але вони не віддаляються від його поверхні, оскільки метал при цьому заряджається позитивно і притягує електрони. Тому нагрітий метал виявляється оточеним «хмаркою» електронів. Частина електронів з цієї «хмарки» повертається назад у метал, і в той же час з металу вилітають нові електрони. При цьому між електронним «газом» у металі і електронною «хмаркою» встановлюється динамічна рівновага, коли кількість електронів, які вилетіли з металу за певний час, зрівняється з кількістю електронів, які за той самий час повертаються з «хмарки» в метал.

? 1. Що таке емісія електронів? За якої умови виникає емісія електронів? 2. Як залежить термоелектронна емісія від температури?

§ 86. Двохелектродна лампа

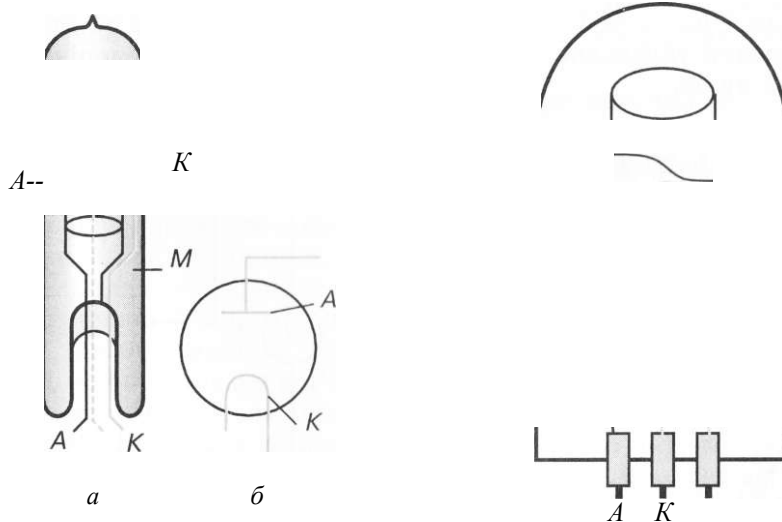
З попереднього параграфа стає зрозумілим, як зробити, щоб у розглянутій вище схемі (див. мал. 187) йшов постійний електричний струм. Очевидно, досить нагріти один з металевих електродів, а саме електрод, з'єднаний з негативним полюсом джерела струму. В цьому випадку електрони,

вилітаючи з нагрітого металу, притягуюватимуться до позитивно зарядженого електрода, і в колі йтиме струм. Електрод можна нагріти, приєднавши його до джерела струму. Так ми, нарешті, підійшли до принципу будови *двох-електродної лампи* (діода), яка широко застосовується в електро- й радіотехніці.

Сучасний діод складається із скляного або металевого балона *M* (мал. 188), з якого старанно відкачане повітря. В балон впаяні два електроди, один з яких *K* (катод) роблять у вигляді нитки з тугоплавкого металу, звичайно вольфраму, яка може розжарюватися від джерела струму для створення електронної «хмарки» в балоні. Анод діода *A* найчастіше має форму циліндра, всередині якого по осі розміщений розжарюваний катод.

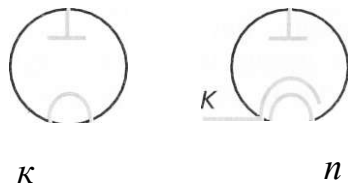
Розглянутий нами катод — катод прямого розжарення — застосовується рідко. Найпоширеніші катоди побічного розжарення. Вони є напівпровідниковим шаром, нанесеним на керамічну трубку. Нагріваються ці катоди за допомогою мініатюрної електричної пічки (мал. 189) — підігрівника. На малюнку "190 показано схематичне зображення діода з катодом прямого (а) і побічного (б) розжарення.

Ознайомимося з основними властивостями діода. Для цього складемо електричне коло з діода, джерел напруги C_a і Π_K і міліамперметра (мал. 191). Комутатор K_2 дає можливість створювати між анодом і катодом напругу (анодну) різної



Мал. 188

Мал. 189



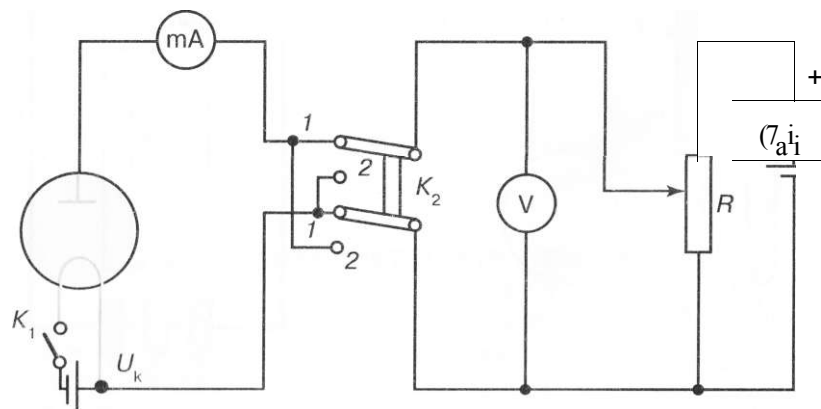
Мал. 190

полярності. У разі замикання перемикача K_2 в положення 1 на анод подається позитивний відносно катода потенціал, а у разі замикання перемикача K_2 в положення 2 — негативний.

Якщо замкнено перемикач K_2 в положення 1, тобто подамо на анод позитивний відносно катода потенціал, але не замкнемо перемикач K_1 , тобто не будемо розігрівати катод, то струму в колі не буде навіть у разі великих анодних напруг U_a . Це й зрозуміло. Температура обох електродів дорівнює кімнатній, термоелектронна емісія катода й анода мізерно мала і у просторі між анодом і катодом практично відсутні заряджені частинки, рух яких в електричному полі міг би створити електричний струм.

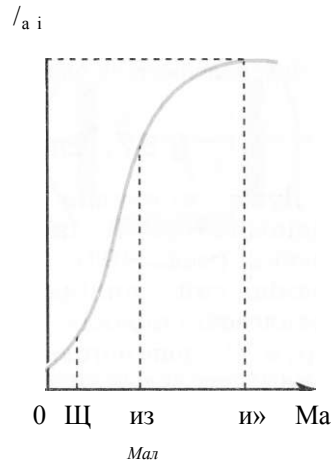
Якщо перемикач замкнути і розігріти катод, то навіть за анодної напруги $U_a = 0$ в колі анода йтиме струм I_0 незначної сили. Виникнення цього струму можна пояснити так.

За високої температури катода великою буде і емісія електронів з нього. Найшвидші електрони, вилетівши з катода, долітають до анода, створюючи в колі анодний струм. Якщо на анод подати невеликий від'ємний потенціал відносно катода (перемикач K_2 у положенні 2), то анодний струм зменшується, оскільки в цьому випадку електрони мають долати гальмівне поле між анодом і катодом. За певної анодної напруги навіть найшвидші електрони не можуть подолати гальмівне поле і сила анодного струму дорівнюватиме нулю.



Мал. 199

Подамо тепер на анод додатний відносно катода потенціал (перемикач K_2 у положенні 1). У цьому випадку електричне поле між анодом і катодом сприяє рухові електронів до анода, але порушується динамічна рівновага між випусканням з катода та поверненням до нього електронів і емісія посилюється. Залежність між силою струму в діоді і анодною напругою можна зобразити графічно (мал. 192). Криву, яка показує залежність сили струму в діоді від анодної напруги, називають *вольтамперною характеристикою діода*.



Зі збільшенням анодної напруги все більше електронів, емітованих катодом, захоплюється електричним полем, і сила анодного струму різко зростає доти, поки напруга не досягне такого значення I_n , за якого всі емітовані катодом за одиницю часу електрони переноситимуться полем до анода. Сила анодного струму досягає максимального значення i_n , яку називають *силою струму насичення діода*, і подальше збільшення анодної напруги не веде до збільшення сили анодного струму. Анодна напруга U_n дістала назву *напруги насичення*.

За напруги $U_a = 0$ сила струму I_0 дуже мала, значно менша за силу струму насичення I_n , тому вважають, що вольтамперна характеристика проходить через початок координат, тобто нехтують силою струму I_0 ; тоді ($U_a = 0$ і $I_0 = 0$)

Зверніть увагу, що вольтамперна характеристика діода не є лінійною, як це має місце у випадку металевого провідника, а отже, опір, знайдений як частка від ділення анодної напруги на силу струму, у разі різних анодних напруг буде різним і не може бути параметром діода. Таким чином, електронна лампа є прикладом провідника, який не підлягає закону Ома.

Оскільки розжарений катод лампи випускає електрони, а не позитивні йони, діод проводить струм лише тоді, коли на анод лампи подається додатний відносно катода потенціал. Якщо на анод подати від'ємний потенціал, то термоелектрони відштовхуватимуться від негативно зарядженого анода і притягуватимуться до позитивно зарядженого катода і струм через лампу не йтиме — лампа запирається. Це означає, що лампа має *однобічну провідність*. Однобічна провідність діода широко використовується в техніці для випрямлення змінного струму.

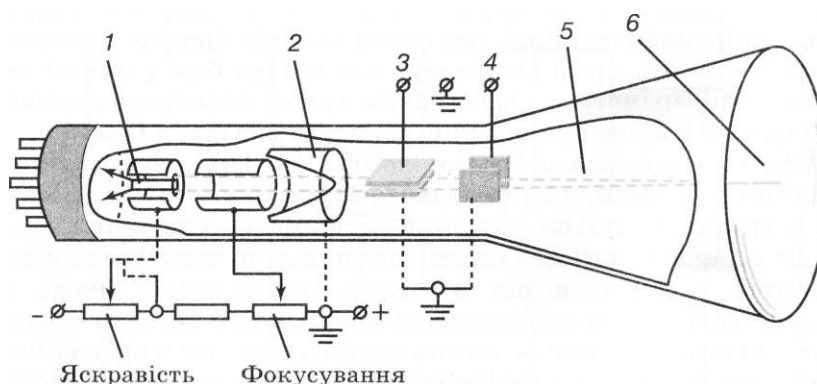
- ; 1. Опишіть будову діода. Як розташовано катоди в електронних лампах? 2. Що таке струм насичення діода? Як можна його збільшити? 3. Чим пояснюється одnobічна провідність електронної лампи?

§ 87. Електронно-променева трубка

Дуже важливим елементом телевізора, осцилографа, радіолокатора та інших приладів є електронно-променева трубка (мал. 193). У вузькому кінці вакуумного балона розміщений циліндричний катод, який підігрівається металевією спіраллю 1, через яку пропускають електричний струм. За допомогою діафрагми 2 з електронів, які випускає катод, виділяється вузький електронний пучок 5 (електронний промінь). В електричному полі, створюваному між катодом і циліндричним анодом, електрони розганяють до швидкості порядку 10^4 км/с. Катод з підігріванням, діафрагма і анод утворюють *електронну гармату*.

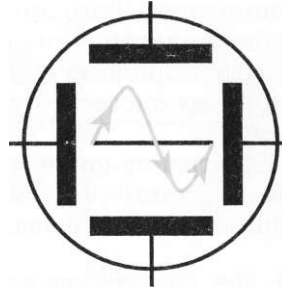
Електронний промінь проходить через два конденсатори 3 і 4, пластини яких розміщені у взаємно перпендикулярних площинах, і попадає на екран 6, покритий речовиною, яка світиться під дією падаючих на нього електронів. У місці падіння променя на екрані з'являється світна точка.

Якщо подати на пластини конденсатора 3 постійну напругу, напрям електронного променя зміниться і світна точка зміститься вздовж вертикалі. У випадку змінної напруги електронний промінь коливатиметься у вертикальній площині, а на екрані з'явиться світна вертикальна лінія, довжина якої залежить від значення прикладеної напруги. За довжиною цієї лінії можна знаходити значення дуже слабких напруг і сил струму.



Мал. 193

и



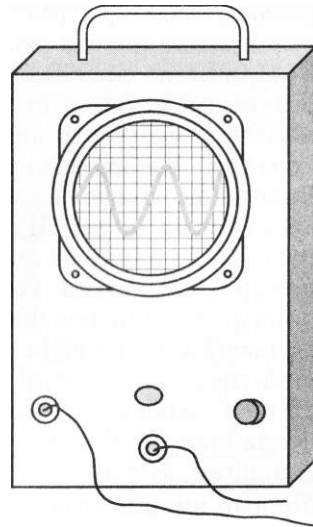
Мал. 194

Мал. 195

За допомогою спеціальної схеми на пластини конденсатора 4 подається змінна напруга U пилкоподібної форми (мал. 194). Під дією такої напруги світна точка рівномірно переміщатиметься вздовж горизонталі, наприклад вправо, а потім стрибком повертатиметься в крайнє ліве положення. Цей періодично повторюваний процес, названий горизонтальним розгортанням променя, дає на екрані горизонтальну світну лінію.

Якщо на вертикальне коливання променя, зумовлене досліджуваною напругою, накласти горизонтальну розгортку, то промінь описуватиме на екрані криву залежності досліджуваної напруги від часу (мал. 195). Коли ж ця напруга змінюється періодично, можна, дібравши відповідну частоту горизонтальної розгортки, дістати на екрані нерухомий графік досліджуваної напруги і сфотографувати його.

Електроіно-променева трубка є основною частиною електронного осцилографа (мал. 196), який широко використовується у науці й техніці під час вивчення різноманітних швидкоплинних процесів (як електричних, так і неелектричних після перетворення їх в електричні). Найменша тривалість процесів, яка фіксується сучасними осцилографами, досягає 10^{-10} секунд. Крім трубки, в осцилографі є генератор пилкоподібної напруги (генератор розгортки), джерело живлення електронної гармати, блоки з регуляторами фокусування і яскравості, а також деякі інші допоміжні пристрої й деталі, які поліпшують роботу і



Мал. 196

розширюють його можливості. Зокрема, для спостереження слабких електричних сигналів в осцилографі передбачено підсилувач, причому відповідним регулятором можна змінювати амплітуду спостережуваних на екрані коливань до потрібних розмірів.

Електронно-променеві трубки застосовуються в телевізійних і радіолокаційних установках, в електронно-обчислювальних машинах, у вимірювальній апаратурі тощо.

? 1. Яке призначення електронної гармати? 2. Як керують електронним променем в електронно-променевій трубці?

§ 88. Електричний струм у розчинах і розплавах електролітів

З курсу хімії вам уже відомо, що розчини солей, кислот і лугів у воді є добрими провідниками електричного струму (електролітами). Струм в електролітах супроводжується електролізом — окисно-відновними реакціями з виділенням на електродах речовини. Таким чином, на відміну від металів, які мають електронну провідність, електропровідність електролітів зумовлена переміщенням йонів. На дослідах ви також переконалися, що ні дистильована вода, ні розчинювана сіль, кислота чи луг вільних йонів не містять і тому всі вони добрі ізолятори. Отже, йони виникають лише у процесі взаємодії молекул розчиненої речовини з молекулами води. Процес розпаду молекул розчиненої речовини на йони під впливом розчинника називають *електролітичною дисоціацією*.

Причина дисоціації електролітів у воді (чи іншому розчиннику) полягає в тому, що молекули води є полярними молекулами (тобто центр позитивних зарядів не збігається з центром негативних) з великим дипольним моментом. Внаслідок цього навколо молекули води виникає сильне електричне поле. Під час розчинення речовини, наприклад солі NaCl , навколо кожного з йонів (Na^+ і Cl^-) орієнтуються полярні молекули розчинника (мал. 197). До позитивного йона молекули розчиненої речовини притягуються негативні полюси молекул води (чрі іншого розчинника), при цьому вони відштовхують другий йон цієї молекули. Зрозуміло, що цей процес «обліплювання» йонів молекулами розчинника послаблює зв'язок між йонами молекули розчиненої речовини. Наближено можна вважати, що сила взаємодії між йонами зменшується згідно із законом Кулона в n раз, де n — діелектрична проникність розчинника. Цей зв'язок між йонами може ослабнути настільки, що енергії теплових

співударянь виявиться достатньо для відокремлення йонів один від одного.

Одночасно з дисоціацією внаслідок співударянь стають можливими зворотні процеси — возз'єднання різнойменних йонів у нейтральні молекули. Цей процес називають *рекомбінацією*, або *молізацією*. У такому стані електроліту встановлюється рухома (динамічна) рівновага, за якої кількість йонів, які утворюються внаслідок дисоціації, дорівнює кількості йонів, які рекомбінують за той самий час.

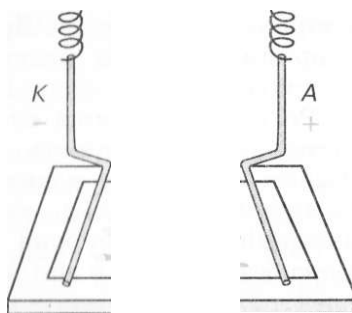
Врі також знаєте, що здатність дисоціювати у різних речовин істотно різна і для кількісної характеристики ступеня дисоціації вводиться *коефіцієнт*, або *ступінь дисоціації* α , який показує, яка частина молекул розчиненої речовини розпалася на йонрі.

Отже, під час розчинення відбувається розпад частини молекул речовини на йони. Коли зовнішнє електричне поле відсутнє, йони в електроліті здійснюють хаотичній тепловий рух. Але якщо створити в електроліті електричне поле, позитрхвні йони набувають додаткової шврдкості (швидкість дрейфа) у напрямі електричного поля, а негатривні йони — у протилежному напрямі. На хаотичній тепловий рух накладається напрямлене зміщення йонів, тобто виникає електричний струм.

Напрямлений рух йонів в електричному полі ви спостерігали на досліді на уроках хімії (мал. 198). Нагадаємо цей дослід. Змочений розчином якогось безбарвного електроліту, наприклад глауберової солі MgSO_4 , кухонної солі NaCl тощо, фільтрувальний папір кладуть на скло. Якщо накидати на цей папір шматочків кольорової солі, наприклад CuCl_2 або K_2CrO_4 , то вони розчрніятимуться і навколо кожного утворюється забарвлена кругла пляма. Але якщо перед тим, як кидатрї шматочки солі, опустити на папір два електроди і приєднати їх до джерела постійної напруги, то замість круглої плями від кожного шматочка потягнеться кольоровий язичок у напрямі катода тоді, коли



Мал. 197



Мал. 199

кольоровими є позитивні йони солі, або ж у напрямі анода, якщо забарвлення розчину надають негативні йони. Цей дослід дає змогу не лише спостерігати рух йонів, а й оцінити порядок швидкості напрямленого переміщення йонів. Досліди показують, що електропровідність електролітів з підвищенням температури зростає. Це пояснюється тим, що під час нагрівання електроліту зростає ступінь дисоціації, тобто концентрація йонів, і зростає їх рухливість, що веде до зменшення опору.

Отже, електропровідність електролітів, на відміну від електронної провідності металів, є йонною (електролітичною). Таку провідність мають не лише водні та інші розчини солей, кислот і лугів, а й розплавлені солі, кристали багатьох сполук.

? 1. Чиста вода не проводить електричного струму. Чому вона стає провідником у разі розчинення в ній солей, кислот або лугів? 2. Що являє собою електричний струм в електролітах? 3. Від чого залежить електропровідність електролітів?

§ 89. Закони електролізу

З курсу хімії ви знаєте, що електроліз полягає у виділенні на електродах нових речовин, яких не було в розчині. Це можна пояснити так. Під дією електричного поля негативно заряджені йони (аніони) рухаються до анода, віддають йому надлишок електронів і перетворюються на нейтральні атоми (або групи атомів). Позитивно заряджені йони (катіони) рухаються до катода, дістають від нього електрони і теж перетворюються в нейтральні атоми, які не можуть існувати без надлишкового заряду і тому вступають у хімічну реакцію з розчинником або матеріалом електродів. В обох випадках біля поверхні електродів відбувається виділення нових речовин. В хімії ви розглянули приклад електролізу розчину хлориду купруму CuCl_2 і йодиду калію KI , розглянули вторинні хімічні реакції, які відбуваються у процесі електролізу.

Розглянемо явище електролізу з кількісного боку, тобто встановимо залежність між кількістю речовини, яка виділяється під час електролізу на електродах, і кількістю електрики (зарядом), яка пройшла крізь електроліт. Така залежність вперше була встановлена М. Фарадеєм у 1833 р. Вона безпосередньо впливає з йонного характеру провідності електролітів.

Нехай за час t крізь електроліт проходить кількість електрики Q . Заряд одного йона $d_0 = ne$, де n — валентність йона, а e — елементарний електричний заряд. Кількість n_0

йонів, які досягли електрода за час t (а значить, і кількість атомів, які виділилися на електроді), дорівнює $n_0 = \frac{I t}{F} = \frac{e n t}{F}$

Масу m речовини, яка виділилася на електродах, можна визначити за формулою: $m = m_{i_0} = \sum_i m_i$ — маса йона.

Маса атома або молекули, які утворюються внаслідок нейтралізації йона, істотно не відрізняється від маси йона, тобто $m_i = m_a$. Масу одного атома (молекули) даної речовини можна визначити на основі закону Авогадро: $m_a = \frac{M}{N_A}$ де M — молярна маса речовини, а N_A — стала Авогадро. Отже,

$$m = \frac{I t M}{n F} \quad (89.1)$$

Для даної речовини величина $k = \frac{M}{n F}$ стала. Тоді

$$m = k q, \quad (89.2)$$

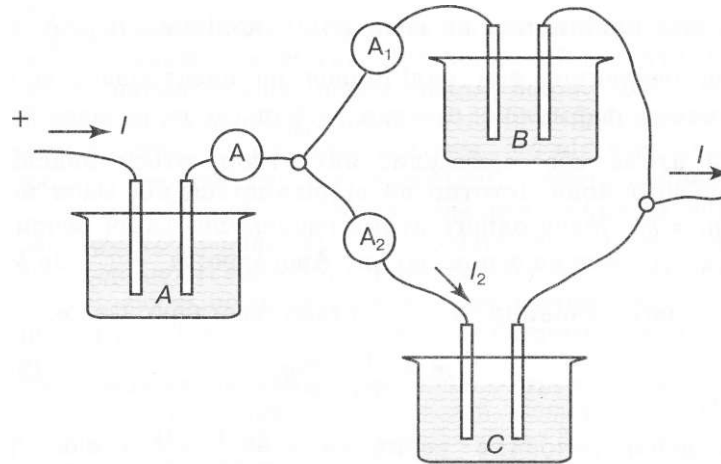
тобто маса речовини, яка виділяється на одному електроді, пропорційна кількості електрики, яка проходить крізь електрод.

У цьому і полягає перший закон електролізу Фарадея. Коефіцієнт пропорційності k називають *електрохімічним еквівалентом* речовини. Він залежить від хімічної природи речовини і чисельно дорівнює масі, яка виділяється на електроді під час проходження одиниці заряду. Вимірюючи величини m і q , можна визначити електрохімічні еквіваленти різних речовин.

Переконатися в справедливості першого закону Фарадея можна на такому досліді (мал. 199). Якщо всі три електролітичні ванни заповнити одним і тим самим розчином електроліту, то маси речовин, які виділяються на електродах, будуть пропорційні силам струмів I_1 і I_2 . При цьому маса речовини, яка виділяється у ванні A , дорівнюватиме сумі мас речовин, які виділяються у ваннах B і C , оскільки $I_1 = I_2 + I_3$.

Проаналізуємо вираз для електрохімічного еквівалента. Добуток числа Авогадро N_A на елементарний електричний заряд e є сталою величиною, яку називають *сталю Фарадея*. Її значення $F = e N_A = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 9,65 \times 10^4 \text{ Кл/моль}$. Скориставшись сталою Фарадея, останню рівність можна записати:

$$k = \frac{M}{n F} \quad (89.3)$$



Мал. 199

тобто електрохімічні еквіваленти речовин прямо пропорційні масам їх молів і обернено пропорційні їх валентностям.

У цьому полягає другий закон Фарадея для електролізу. Часто обидва закони електролізу об'єднують в одному виразі:

$$m = \frac{M}{n} \cdot I \cdot t, \text{ або } m = I \cdot n \quad (89.4)$$

Отже, ми переконалися, що закони Фарадея, як і сталі значення числа Фарадея для всіх речовин, впливають безпосередньо з йонного характеру провідності розчинів.

Задача 1. Яка кількість електроенергії витрачається на добування $m = 1$ кг алюмінію, якщо електроліз ведеться за напруги $V = 10$ В, а ККД всієї установки $\eta = 80\%$. Електрохімічний еквівалент алюмінію $k = 9,3 \cdot 10^{-8}$ кг/Кл.

Розв'язання. На добування алюмінію витрачається енергія $W =$ Кількість електрики, яка проходить при цьому крізь електроліт, визначимо із закону Фарадея $m = kd$, звідси $d = \frac{m}{k}$. Підставивши це значення d у формулу для енергії, дістанемо $W = \frac{m}{k} \cdot U$, або $W = 13,5 \cdot 10^7$ Дж.

Задача 2. Нікелювання деталі, поверхня якої $S = 120$ см², тривало $t = 5$ год за сили струму $I = 0,3$ А. Визначте товщину утвореного покриття нікелю. Електрохімічний еквівалент нікелю $k = 3 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл, густина $\rho = 8,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Розв'язання. На деталі виділилась маса нікелю $m = Mi$. З другого боку, $m = pU \cdot pH8$, де H — шукана товщина покриття. Тоді $Mi = pH8$, звідси $H = \frac{m}{pU}$ або $H = 1,53 \cdot 10^{-5}$ м.

На основі законів Фарадея можна визначити заряд одновалентного йона. Кількість електрики, що дорівнює числу Фарадея P , виділяє на електродах 1 моль речовини. У випадку одновалентної речовини на електродах виділяється кількість частинок, яка дорівнює числу Авогадро M_A . Тому $p = eM_A$, або

$$e = \frac{P}{M_A} = \frac{9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Обчислений на основі законів Фарадея найменший заряд йона відповідає числовому значенню заряду електрона. Це служить підтвердженням загальноприйнятої теорії утворення йонів: негативний йон утворюється в результаті приєднання до атома електронів, позитивний йон утворюється, якщо атом втрачає електрони. Заряд йона залежить від кількості втрачених або набутих електронів.

? 1. Чи залежить кількість виділеної на електродах під час електролізу речовини від концентрації розчину, якщо крізь розчин проходить однакова кількість електрики? Поясніть. 2. Запишіть формулу об'єднаного закону Фарадея. 3. Що таке число Фарадея і чому воно дорівнює? 4. Як можна експериментально визначити елементарний електричний заряд?

Вправа 26 Спектральні деталі проводилося за сили струму $I = 5$ А протягом $t = 15$ хв. Яка кількість срібла була витрачена за цей час? Електрохімічний еквівалент срібла $k = 1,118$ -КГ⁶ кг/Кл.

2. Під час електролізу мідного купоросу за $t = 20$ хв виділилося на електроді $m = 1,64$ г міді, причому амперметр показував силу струму $I = 4$ А. Чи правильними були показання амперметра? Електрохімічний еквівалент міді $k = 3,3 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл.

3. Визначаючи електрохімічний еквівалент міді, учень протягом $t = 5$ хв пропускав крізь розчин мідного купоросу струм силою $I = 1,2$ А. За цей час маса катода збільшилася на $\Delta m = 0,119$ г. Яке значення електрохімічного еквівалента міді дістав учень на основі досліду?

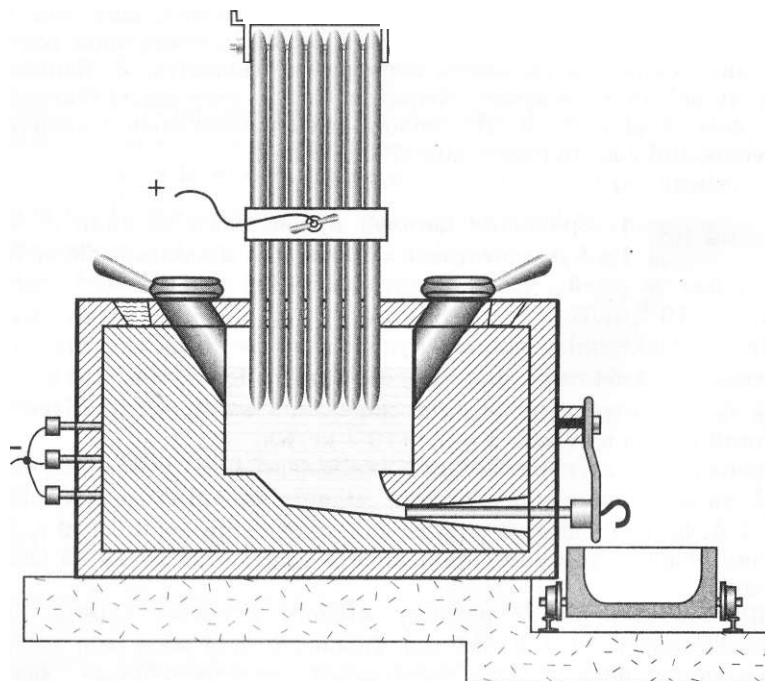
4. Під час електролізу розчину мідного купоросу $CuSO_4$, було виконано роботу $A = 2$ кВт · год. Визначте, яка маса міді виділилась, якщо напруга на затискачах електролітичної ванни $V = 6$ В.

§ 90- Застосування електролізу

Розглянемо найважливіші застосування електролізу в техніці, враховуючи, що в курсі хімії ви вже ознайомилися з використанням електролізу для добування вільного фтору, хлору та інших речовин.

Електрометалургія. Нині багато металів одержують за допомогою електролізу руд. Так, наприклад, алюміній одержують виключно електролізом його розплавленого оксиду (глинозему Al_2O_3) в криоліті Na_3AlF_6 . Електролітичною ванною і одночасно катодом служить залізний ящик з вугільним подом (мал. 200), а анодами — вугільні стержні, які опускаються в розплав. Електроліз ведеться за температури близько $900\text{ }^\circ\text{C}$, причому висока температура підтримується самим струмом. Розплавлений алюміній опускається на дно ящика, звідки його через особливий отвір випускають у форми для виливків. За допомогою електролізу одержують також натрій, магній, берилій, кальцій, фтор та інші речовини.

Очищення (рафінування) металів. У промисловості під час електролізу здійснюється очищення, або рафінування,



Мал. 169

металів. Для цього очищуваний метал відливають у вигляді пластин і роблять їх анодами в електролітичній ванні. Електролітом є розчин солі даного металу. Добираючи напругу між анодом і катодом, можна добитися, щоб тільки очищуваний метал переходив з анода в розчин і виділявся на катоді. Домішки ж випадають на дно посудини у вигляді осаду. Найбільш широко цей спосіб застосовується для очищення міді.

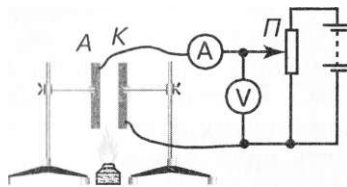
Гальванопластика, або електролітичне осадження металу на поверхні предмета для відтворення його форми здійснюється так: з предмета спочатку знімають зліпок з воску, стеарину, гіпсу тощо, покривають його порошком графіту для надання електропровідності і потім використовують зліпок як катод в електролітичній ванні, яка містить розчинену сіль відповідного металу. Під час електролізу метал з електроліту виділяється на поверхні зліпка і утворює металеву копію предмета. Цим способом, зокрема, виготовляють друкарські кліше, безшовні труби, а також інші металеві деталі складної форми.

Гальваностегія. Електролітичне осадження металів широко застосовується для покриття одних металів шаром інших з метою оздоблення або захисту від корозії. Таким є електролітичне сріблення, золочіння і платинування, покриття хромом і нікелем тощо.

§ 91. Електричний струм у газах

За звичайних умов гази практично не містять вільних заряджених частинок (електронів або йонів), здатних упорядковано переміщатися під дією електричного поля. Тому навіть за наявності електричного поля крізь газ не йтиме електричний струм, за нормальних умов гази є ізоляторами. В цьому можна переконатися, приєднавши до джерела ЕРС повітряний конденсатор (мал. 201). Але якщо в простір між пластинами конденсатора внести полум'я, наприклад, свічки, то стрілка амперметра відхиляється, сигналізуючи про існування електричного струму. Проходження струму свідчить, що в газі під дією полум'я виникли вільні заряджені частинки, які рухаються. З'ясуємо, що це за частинки і як вони виникають.

За звичайних умов газ складається з електрично нейтральних атомів і молекул. Однак під дією



Мал. 201

1

а високої температури від полум'я швидкості їх різко зростають і в результаті зіткнень молекула може втратити один або кілька електронів, внаслідок чого перетворюється на позитивний йон. Частина звільнених електронів захоплюється нейтральними атомами чи молекулами, що веде до утворення негативних йонів.

Мал. 202

и Процес утворення йонів називають *йонізацією* газу, а збудників йонізації — *йонізаторами*.

Відривання електрона від атома (йонізація атома) вимагає затрат певної енергії — енергії йонізації, яка може бути надана атому не лише під час нагрівання газу, а й під час опромінення його рентгенівськими чи ультрафіолетовими променями, ядерним випромінюванням тощо.

Природно, що поряд з йонізацією в газі може відбуватися і зворотний процес — *рекомбінація* (або *молізація*) йонів у нейтральні атоми чи молекули. Він полягає в тому, що від зіткнення позитивного йона з електроном знову утворюється нейтральний атом або молекула. Через певний час після початку дії йонізатора в газі встановлюється динамічна рівновага — кількість йонів, які утворюються і рекомбінують за одиницю часу, зрівнюється.

Проходження електричного струму крізь газ називають *газовим розрядом*. Якщо електропровідність у газі виникає під дією йонізаторів, а з віддаленням останніх припиняється, то має місце *несамостійний розряд*, а провідність називають *несамостійною*.

Несамостійний газовий розряд зручно вивчати експериментально на описаній вище установці (див. мал. 201). Дослідимо залежність сили струму у разі несамостійного розряду від напруги між електродами, тобто знімемо вольтамперну характеристику газового розряду. Напругу, прикладену до електродів *A* і *K*, регулюють за допомогою потенціометра і вимірюють вольтметром *V*, силу струму — чутливим амперметром *A*. Газ між електродами *A* і *K* йонізують йонізатором, наприклад, рентгенівським промінням. Переміщуючи повзунок потенціометра, збільшують прикладену між електродами напругу і встановлюють залежність сили струму в колі від напруги між пластинами розрядного проміжку. Результати вимірювань подано у вигляді кривої на малюнку 202.

Розглянемо криву. За невеликих напруг вольтамперна характеристика є прямою лінією, і сила струму пропорційна напрузі (ділянка 0—1), тобто тут справджується закон Ома. Це легко зрозуміти, якщо врахувати, що несамостійний газовий розряд схожий на струм в електролітах; обидва вони здійснюються внаслідок впорядкованого переміщення йонів.

Зі збільшенням напруги між електродами лінійна залежність сили струму від напруги порушується (ділянка 1—2); сила струму зростає повільніше, ніж напруга. Це пояснюється істотною відмінністю несамостійного газового розряду від струму в електролітах. В електролітах втрата йонів, які беруть участь у провідності і нейтралізуються біля електродів, безперервно поповнюється за рахунок дисоціації нових молекул електроліту; в несамостійному розряді поповнення йонів цілком залежить від йонізатора, і тому зі збільшенням напруженості поля між електродами зменшується концентрація йонів в об'ємі газу, що й зумовлює відставання в збільшенні сили струму від напруги.

Починаючи з деякої напруги C_n (ділянка 2—3), сила струму зберігає сталі значення I_n , яке називають *струмом насичення*. Це явище пояснюється тим, що в сильних електричних полях всі йони, створювані за одиницю часу йонізатором, за той самий час переносяться електричним полем до пластин. Тому подальше збільшення напруги вже не веде до зростання сили струму.

Нарешті, за ще більшого значення напруги між електродами сила струму знову різко зростає (ділянка 3—4). Це свідчить про те, що відбувається додаткова, дуже сильна йонізація газу. Пояснюється це явище тим, що йони й електрони співударяються під час руху з нейтральними молекулами чи атомами газу. Якщо напруженості поля невеликі, такі співударяння не мають істотного значення. Однак зі збільшенням напруженості поля зростає кінетична енергія електронів та йонів і, починаючи з певного значення напруги між електродами, електрони і йони внаслідок співударянь з нейтральними молекулами вибивають з них електрони, тобто додатково йонізують газ. Це явище називають *ударною йонізацією* молекул газу. Вторинні електрони і йони, які утворюються в результаті додаткової йонізації, теж прискорюються електричним полем і в свою чергу йонізують ударом нові молекули газу.

Особливо велику йонізуючу дію мають електрони завдяки своїй великій рухливості. Таким чином, число носіїв струму в газі наростає лавиноподібно і в такий спосіб сила розрядного струму різко зростає (в багато тисяч разів). Детальніше

процеси, пов'язані з виникненням іонно-електронних лавин у газі, розглянемо в наступному параграфі.

Звернемо увагу, що хоча струм в газах, як і в електролітах, зумовлений переміщенням йонів під дією електричного поля, між ними є ряд істотних відмінностей. По-перше, в газах, особливо при малих тисках, поряд з йонами в створенні електропровідності мають велике значення і вільні електрони; по-друге, струм у газах не супроводжується перенесенням речовини, тобто електролізом. Йони в газі не є звичайними «хімічними» йонами. Йони газів — це атоми або молекули, які або втратили один чи кілька електронів, або ж набули їх. Тому під час нейтралізації газового йона біля електродів він перетворюється на нейтральну молекулу, яка повертається назад у газ і виділення речовини не відбувається. Таким чином, газова молекула йонізується не обов'язково шляхом її дисоціації, як у рідин. Йонізуються всі гази, в той час як дисоціювати можуть далеко не всі рідини.

? 1. Яка природа струму в газах? 2. Чим відрізняється йонізація газу від електролітичної дисоціації? 3. Якщо гарячий газ охолодити, то він **втрачає** провідність. Чому? 4. Чи підлягає струм у газах закону Ома?

§ 92. Самостійний електричний розряд у газах. Види розрядів

У газах за певних умов можливе збудження великої провідності за рахунок дії електричного поля. В цьому випадку маємо явище самостійного розряду і самостійну провідність. *Самостійним* називають *розряд* у газах, який зберігається й після припинення дії зовнішнього йонізатора. Під час будь-якого самостійного розряду має місце йонізація газу електронними ударами, однак наявність йонізації внаслідок електронного удару ще не веде до самостійного розряду. Дійсно, якщо прибрати зовнішній йонізатор, всі йони лавини врешті-решт будуть нейтралізовані на електродах і розряд припиниться. Щоб розряд був самостійним, треба, щоб і позитивні йони набували в електричному полі достатньої енергії для вибивання вільних електронів з молекул або з катода.

Залежно від стану газу (температури і тиску), від напруги, форми й розмірів електродів самостійні газові розряди можуть відрізнятися один від одного як за зовнішнім виглядом, так і за характером фізичних процесів, які зумовлюють їх виникнення й проходження. Всі види газових

Джерело
високої
напруги



> До насоса

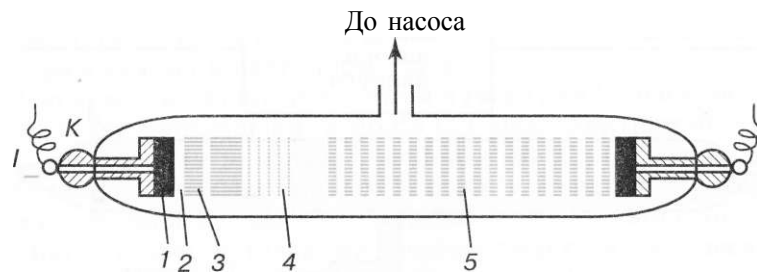
Мал. 203

розрядів супроводжуються своєрідними, властивими лише їм явищами. Це різноманітні свічення, характерний звук (шипіння, тріск), наявність певних реакцій (наприклад, утворення озону). За зовнішніми ознаками розпізнають, який з видів газового розряду має місце. Розглянемо характерні види розрядів у газах.

Тліючий розряд. Цей вид розряду спостерігається в газах за низьких тисків (порядку 0,1 мм рт. ст.). Такий розряд ви можете спостерігати за допомогою скляної трубки (мал. 203) з впаяними електродами А і Я, до яких прикладено сталу напругу в кілька сот вольтів. З трубки за допомогою насоса можна поступово відкачувати повітря.

Коли тиск газу в ній дорівнює атмосферному, прикладеної напруги недостатньо для пробою газу, і трубка залишається темною. Зі зменшення тиску газу (до порядку 100 мм рт. ст.) між анодом і катодом виникає розряд, що має вигляд світлого шнура, який з'єднує анод і катод трубки. Починається самостійний газовий розряд. Якщо далі зменшувати тиск, цей шнур розширюється і заповнює весь переріз трубки. Коли значення тиску досягає порядку 0,1 мм рт. ст., розряд має вигляд, показаний на малюнку 204. Безпосередньо до катода прилягає тонкий світний шар 1 (перше катодне свічення або катодна плівка), простір за ним має незначну інтенсивність свічення — катодний темний простір 2. Він поступово переходить у новий світний шар 3 (тліюче свічення), який має чітку межу з боку катода і поступово зникає з боку анода. За тліючим свіченням спостерігається знову темний проміжок 4, який називається другим, або фарадеевим, темним простором. Решта трубки до анода заповнена червоним свіченням 5, яке дістало назву додатного стовпа.

У разі збільшення розрідження додатний стовп розпадається на окремі, розділені темними проміжками ділянки — страти, а потім картина починає помітно тьмяніти, темний



Мал. 204

простір поширюється майже на всю трубку. Коли значення тиску становить близько 0,001 мм рт. ст., газ перестав світитися, а розташована проти катода ділянка скла помітно світиться жовто-зеленим світлом. Нарешті, за тиску менше 0,001 мм рт. ст. катодний темний простір поширюється в зону анода, і тліючий розряд припиняється. При цьому відсутнє будь-яке свічення газу і стінок трубки.

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 знаходить широке застосування як джерело світла в різних газосвітних трубках. У лампах денного світла тліючий розряд звичайно відбувається в парі ртуті. Випромінювання ртутної пари поглинається шаром спеціальної речовини, нанесеної на внутрішню поверхню трубки, яка під дією поглинутого випромінювання світиться видимим світлом. Можна підібрати речовину, щоб вона світилася світлом, близьким до денного. Такі трубки в три-чотири рази економічніші за звичайні лампи розжарення.

Газосвітні трубки застосовуються для рекламної і декоративної мети (для чого їм надають обрисів різних фігур і літер). Заповнюючи трубки різними газами (неоном, аргоном, криптоном тощо), можна дістати свічення різного кольору.

Тліючий розряд використовується також для катодного розпилення металів. Речовина катода у разі тліючого розряду внаслідок бомбардування позитивними йонами сильно нагрівається і поступово переходить у газоподібний стан, а потім осідає у вигляді металевого нальоту на стінках трубки. Поміщаючи в тліючому розряді поблизу катода різні предмети, їх можна покрити рівномірним шаром металу. Катодним розпиленням користуються для виготовлення високоякісних дзеркал.

Іскровий розряд. Самостійні електричні розряди можуть відбуватися в газах і за нормальних та великих тисків. Одним

із таких розрядів, який має важливі застосування в техніці, є іскровий.

Якщо поступово збільшувати напругу між двома вміщеними в атмосферне повітря електродами, за певної напруги між електродами проскакує електрична іскра. Вона має вигляд тонкого, яскраво світлого, зігнутого і розгалуженого шнура (мал. 205). При цьому іскровий розряд з величезною швидкістю пронизує проміжок між електродами, гасне і знову виникає, так що око бачить одну суцільну іскру. Розряд звичайно 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, які мають різні потенціали. Максимальна сила струму в блискавці досягає десятків і сотень ампер, її тривалість порядку 10^{-2} с, різниця потенціалів між хмарою і землею іноді перевищує $15 \cdot 10^7$ В, а довжина блискавки може становити десятки кілометрів.

Якщо проміжок між електродами невеликий, іскровий розряд викликає специфічне руйнування анода, яке називається *електричною ерозією*. Явище електричної ерозії застосовується в техніці для обробки металів.

Коронний розряд. За атмосферного тиску в дуже неоднорідних електричних полях, наприклад поблизу проводів ліній високої напруги, спостерігається розряд, світна ділянка якого часто нагадує корону. Тому цей розряд і називають *коронним*.

Густина електричного заряду на поверхні провідника трим більша, чим більша його кривизна. Тому поблизу проводів високовольтрях електропередач виникає сильне електричне поле. Якщо напруженість цього поля перевищить $3 \cdot 10^6$ В/м, настає розряд і біля дротини виникає свічення. Коли провідник заряджений негативно, наявні у повітрі позитивні йонри бомбардують його і врібають електронри. Ці електронри, потрапивши в сильне електричне поле провідника, йонізують

молекули повітря і спричиняють його свічення. У разі позитивного заряду провідника електричне поле розганяє наявні в повітрі (за рахунок різних йонізаторів) електрони поблизу цього провідника до такої швидкості, що вони можуть у результаті ударів йонізувати молекули. В міру віддалення від поверхні провідника напруженість швидко зменшується. Тому йонізація і пов'язане з нею свічення повітря спостерігаються лише поблизу провідника.

Іноді коронний розряд виникає в природі під впливом атмосферної електрики. Перед грозою чи під час неї нерідко на вістрях і гострих кутах високо піднятих предметів (вершинах дерев, шпилях башт, антенах тощо) спалахують схожі на китиці конуси свічення. В давнину це свічення дістало назву вогнів святого Ельма. Особливо часто це свічення спостерігається високо в горах.

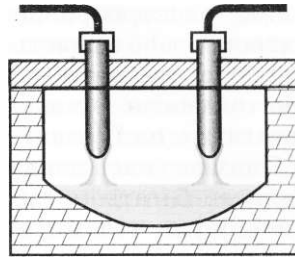
Виникнення коронного розряду доводиться завжди враховувати в техніці високих напруг. Так, виникаючи на високовольтних лініях передач, такий розряд призводить до втрат електроенергії. Щоб коронний розряд не міг виникнути, провідники високовольтних ліній повинні мати досить великий діаметр, тим більший, чим вища напруга лінії.

Дуговий розряд. Якщо одержати іскровий розряд, а потім поступово зменшувати електричний опір кола, зменшуючи відстань між електродами, розряд перейде з переривчастого у безперервний — виникає новий вид газового розряду, який дістав назву *дугового*. При цьому сила струму різко зростає, досягаючи десятків і сотень амперів, а напруга на розрядному проміжку падає до кількох десятків вольтів.

Дуговий розряд можна одержати, обминувши стадію іскри. Для цього електроди зближують до дотику, в місцях контакту вони розжарюються струмом, потім їх розсовують і одержують між електродами електричну дугу. Основною причиною дугового розряду є інтенсивне випускання термоелектронів розжареним електродом. Ці електрони прискорюються електричним полем і здійснюють ударну йонізацію молекул газу. Важливе значення має при цьому також термічна йонізація молекул навколишнього середовища.

Від горіння дуги вугільний електрод загострюється, а на аноді утворюється заглиблення — кратер. Температура кратера за атмосферного тиску становить близько 4000 С, а під тиском 20 атм перевищує 7000 °С, тобто вища за температуру зовнішньої поверхні Сонця (близько 6000 С). Катод дуги має нижчу температуру, за атмосферного тиску його температура дорівнює приблизно 3500 С.

Дуговий розряд має численні і важливі застосування. Електрична дуга є потужним джерелом світла, і тому її широко використовують у проєкційних, прожекторних та інших установках. Особливо широко електричну дугу використовують для зварювання й різання металів, а також у дугових електропечах, які широко застосовуються в сучасній металургійній промисловості. Складається така піч із сталюого кожуха розміром в кілька метрів (мал. 206), викладеного зсередини вогнетривкою цеглою. Верхня частина печі знімна, подібна до кришки. Через отвори в ній пропускаються вугільні або графітові електроди, діаметр яких може перевищувати півметра. Горить дуга між електродами й металом. У дугових печах виплавляють сталь, чавун, бронзу та інші метали.



Мал. 206

- ? 1. За яких умов виникає самостійний електричний розряд в газах?
 2. Який механізм розвитку самостійного електричного розряду?
 3. Чому електричний розряд між грозовою хмарою і Землею відбувається за дуже короткий час? 4. Які характерні ознаки дугового електричного розряду? 4. За яких умов виникає коронний розряд?

§ 93- Поняття про плазму

Розглядаючи електричні розряди в газах, ми говоримо про те, що газ у міжелектродному просторі сильно йонізований. За високого ступеня йонізації газ набуває нових властивостей і фактично є особливим станом речовини, відмінним від газоподібного, рідкого чи кристалічного. Тому такий сильно йонізований газ дістав назву *плазми* — *четвертого стану речовини*. Таким є, наприклад, стан газу в стовпі тліючого розряду, дуговому розряді, каналі іскрового розряду. Оскільки концентрація електронів та йонів у плазмі однакова, то сумарний об'ємний заряд у ній, як і в металах, дорівнює нулю. Це дуже важлива властивість плазми. Взагалі йонізований газ можна назвати плазмою тільки в тому випадку, коли він у цілому електрично нейтральний.

Властивості плазми як сильно йонізованого газу істотно відрізняються від властивостей слабо йонізованого, а тим більше нейонізованого газу. Які ж саме властивості плазми?

Звичайно ступінь йонізації газу в плазмі становить відсотки і навіть десятки відсотків. Тому плазма має дуже

велику електропровідність і за характером своєї електропровідності наближається до металів. Завдяки високій електропровідності плазма сильно взаємодіє із зовнішніми електричними і магнітними полями і саме ці поля сильно впливають на її властивості.

Плазма має деяку схожість зі звичайними газами і підлягає багатьом газовим законам. Проте між плазмою та звичайними газами є великі відмінності. У плазмі йони й електрони сильно взаємодіють між собою внаслідок дії кулонівських сил. Оскільки ці сили є більше далекодіючими (обернена пропорційність r^2), ніж сили взаємодії між нейтральними молекулами (звичайно обернена пропорційність r^7 для сил притягання), то плазма є своєрідним пружним середовищем, в якому можуть легко збуджуватися і поширюватися різноманітніші, ніж у звичайному газі, коливання і хвилі. Особливо різко відрізняється плазма від звичайного газу, коли є зовнішнє електричне або магнітне поле. В цьому випадку на частинки плазми (йони й електрони) діють збоку полів великі сили, яких не існує в газі нейтральних атомів і молекул.

Обидві ці обставини в поєднанні з великою електропровідністю плазми приводять до того, що властивості плазми за наявності електричних полів різко відрізняються від властивостей звичайних газів і рідин.

Одержують плазму не тільки за допомогою газового розряду. Всі методи йонізації газу (теплова, або термічна йонізація, фотойонізація за допомогою радіоактивного випромінювання тощо) можуть бути використані для добування плазми.

Газорозрядна плазма стійка лише за наявності електричного поля. З припиненням дії електричного поля майже миттєво зникає й газорозрядна плазма (внаслідок рекомбінації електронів і позитивних йонів). Газорозрядну плазму називають низькотемпературною — температура її становить близько 100 000 °С.

За надвисоких температур порядку мільйонів градусів атоми газу повністю йонізуються. Властивості такої високотемпературної плазми і способи її одержання набули останнім часом надзвичайно важливого значення у зв'язку з проблемою здійснення керованих термоядерних реакцій — реакцій злиття двох ядер дейтерію (одного з ізотопів Гідрогену) з утворенням ядер Гелію і тритію (також ізотопу Гідрогену), які супроводжуються виділенням величезних кількостей внутрішньоядерної енергії. Розв'язання проблеми керованих термоядерних реакцій відкрило б доступ людству

до величезних запасів енергії, зосередженої в ядрах елементів, широко розповсюджених у природі. Некерована термоядерна реакція є джерелом енергії у водневих бомбах.

Низькотемпературну плазму широко застосовують у різних газорозрядних приладах. Перспективним напрямом використання низькотемпературної плазми є створення магнітогидродинамічних генераторів (МГД-генераторів), принцип дії яких буде розглянуто пізніше.

Досить перспективним є також створення плазмових реактивних двигунів. Основна їх перевага — високі швидкості витікання робочого тіла (плазми).

Як відомо, сила тяги ракети визначається добутком маси викинутої речовини на швидкість її витікання. Під час розряду в газі можна одержати дуже високі температури, а значить, і високі швидкості витікання йонізованого газу, тому плазмовий реактивний двигун може значно економніше витратити робочу речовину, досягаючи одночасно набагато більших швидкостей польоту. Основою плазмового двигуна є електричний розряд у газі або сукупність розрядів, внаслідок яких утворюється, а потім розганяється плазма.

Висновки

Електропровідність металів зумовлена вільними електронами. У металах майже всі атоми йонізовані, тому концентрація електронів провідності в них дуже висока. Сила струму в металевому провіднику $I =$

Опір металів у широких межах прямо пропорційний абсолютній температурі: $R = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$. За температур, близьких до абсолютного нуля, багато металів і сплавів стають надпровідниками.

Опір напівпровідників різко змінюється під дією зовнішніх впливів — нагрівання, освітлення, а також завдяки введенню певних домішок. У напівпровідників існують два типи провідності: електронна, здійснювана електронами провідності, і діркова, створювана електронами, які беруть участь у взаємодії між атомами. Введенням відповідних домішок можна створити в напівпровіднику переважно електронну (n-типу) або діркову (p-типу) провідність.

Контакт напівпровідників n- і p-типу є діодом, який добре проводить струм в одному напрямі і майже не проводить у протилежному. Напівпровідники з двома р—ьнереходами є тріодами транзисторами. Транзистори широко застосовують у радіотехніці для підсилення і генерації електричних коливань.

Електричний струм у вакуумі можна створити за рахунок введення в нього носіїв заряду. Для цього використовують електронну емісію. Струм через вакуумний діод проходить лише в тому випадку, коли розжарюваний електрод є катодом, а холодний — анодом. Вакуумний діод застосовують для випрямлення змінного струму.

За малих напруг сила струму у вакуумі зростає зі збільшенням напруги, але нелінійно. За певної напруги, коли всі випущені катодом електрони досягають анода, настає насичення. Дальше збільшення напруги не приводить до зростання сили струму.

Електропровідність водних розчинів електролітів зумовлена позитивними і негативними йонами (йонна провідність). Під час проходження струму крізь електроліти разом із зарядом переноситься і речовина. Маса речовини, що виділяється під час електролізу за час t дорівнює $m = \frac{4 \cdot I t}{z F}$ (закон

Фарадея). Для електролітів, як і для металів, справедливий закон Ома.

Гази в звичайних умовах складаються з нейтральних молекул і не проводять електричний струм (є діелектриками). Внаслідок зовнішніх впливів (полум'я, ультрафіолетове і рентгенівське випромінювання тощо) відбувається йонізація газів і в них з'являються вільні носії заряду — електрони та йони обох знаків. Йонізація газу виникає також внаслідок зіткнень електронів з нейтральними атомами і молекулами.

Розряд, який зникає після припинення дії йонізатора, називають несамостійним. У разі самостійного розряду йони й електрони утворюються внаслідок йонізації електронним ударом, термоелектронної емісії тощо.

В розріджених газах розряд відбувається за нижчих напруг, ніж у газах за атмосферного тиску.

За умов великої концентрації заряджених частинок (понад 10^{18} частинок в 1 м^3) газ утворює плазму. За температур 10^6 — 10^7 К будь-яка речовина перебуває в стані плазми. У високотемпературній плазмі можливі реакції термоядерного синтезу, за яких виділяється значна енергія.

$$i' \pm 'k$$

Ви ознайомилися з особливостями проходження електричного струму в різних середовищах. Однак цим не завершується вивчення електродинаміки. Було розглянуто лише електромагнітні явища, пов'язані з нерухомими електричними зарядами (постійне електричне або електростатичне поле) і зарядами, що рухаються зі сталою швидкістю

(постійне магнітне поле). Інакше кажучи, ви вивчали електричні і магнітні поля, які не змінюються з часом, тобто стаціонарні поля. Однак особливо цікавими і практично важливими є явища в електричних і магнітних полях, які змінюються в часі. Виявляється, що змінне магнітне поле породжує електричне поле (явище електромагнітної індукції). У свою чергу змінне електричне поле є причиною появи магнітного поля (явище, зворотне електромагнітній індукції).

Явище електромагнітної індукції лежить в основі всієї сучасної електро- і радіотехніки. Зокрема, воно покладене в основу принципу дії генераторів електричної енергії всіх електростанцій світу. Після вивчення явища електромагнітної індукції ви ознайомитеся з властивостями, добуванням і різноманітним застосуванням змінного електричного струму. Завершите вивчення електродинаміки розглядом швидкозмінних електромагнітних полів і електромагнітних хвиль та їх застосувань у радіотехніці. Лише після цього ви дістанете повне уявлення про цікавий і різноманітний світ електромагнітних явищ.

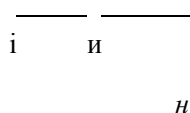
(ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ)

1. Дослідне підтвердження закону Бойля — Гуаріотта

Мета роботи: дослідити, як змінюється об'єм певної маси газу (за сталої температури) зі змінюю тиску, і встановити співвідношення між ними.

Обладнання: скляний циліндр висотою « 40 см з водою; скляна трубка довжиною 40—50 см, закрита з одного кінця; вимірنا лінійка з міліметровими поділками; барометр-анероїд БР-52 (один на клас); штатив універсальний.

Короткі теоретичні відомості. Закон Бойля — Маріотта можна порівняно просто перевірити за допомогою нескладного обладнання. Якщо в циліндр з водою 1 опустити відкритим кінцем вниз трубку 2 (мал. 207), повітря в ній буде під тиском, який дорівнює атмосферному плюс гідростатичний тиск стовпчика води висотою H . (Для спрощення розрахунків атмосферний тиск і тиск стовпчика води доцільно вимірювати в мм рт. ст.) Густина води в 13,6 раза менша за густину ртуті, тому стовпчик води висотою H мм створює такий самий тиск, як стовпчик ртуті висотою $\frac{H}{13,6}$ мм.



Повітря в трубці буде під тиском

$$p = H + \frac{H}{13,6}$$

де H — атмосферний тиск, виражений в міліметрах ртутного стовпчика, H — різниця рівнів води, виміряна в міліметрах, у циліндрі і в трубці.

Мал. 207

Об'єм повітря в трубці $V = \delta l$, де l — довжина стовпчика повітря, а δ — площа його поперечного перерізу. Оскільки площа поперечного перерізу трубки (а значить, і повітряного стовпчика) стала, її числове значення можна прийняти за значення V в умовних одиницях. Зі зміною глибини занурення трубки змінюються об'єм і тиск повітря в ній. Дослідіть залежність між цими величинами.

Хід роботи. 1. Виміряйте барометром атмосферний тиск H (в мм рт. ст.). (Під таким тиском знаходиться повітря в трубці до її занурення у воду.)

2. Опустіть у воду трубку відкритим кінцем вниз на максимальну глибину. Виміряйте довжину l стовпчика повітря в трубці і різницю рівнів води в ній і циліндрі l_0 .

3. Повторіть вимірювання l і l_0 для двох менших глибин занурення трубки.

4. Обчисліть добутки $C \cdot (H + \Delta H) \cdot l$ для всіх трьох дослідів, порівняйте їх; зробіть висновок.

5. Обчисліть абсолютну ΔC і відносну $\Delta C / C$ похибки вимірювань.

6. Результати вимірювань і обчислень запишіть у таблицю такого вигляду:

№ дослідів	H	H	$l(Y)$	$p + 13,6$	$\{ H + \frac{13,6}{l} l = c$	ΔC	$\epsilon = \frac{\Delta C}{C}$
1							
2							
3							

Контрольні запитання. 1. Чому під час дослідів не слід тримати трубку рукою? 2. Від чого залежить стала C в законі Бойля — Маріотта? 3. Чи має істотне значення для дослідів площа поперечного перерізу трубки?

2. Визначення модуля пружності гуми

Мета роботи: експериментально перевірити закон Гука і визначити модуль пружності гуми.

Обладнання: гумова смужка довжиною 20—30 см з дротяною петелькою на одному кінці; динамометр лабораторний на 4 Н; вимірна лінійка з міліметровими поділками; штангенциркуль.

Короткі теоретичні відомості. Для розтягу тіла формулу закону Гука можна записати так: $P = \frac{F_0}{A}$, звідси

де E — модуль пружності (Юнга) речовини, з якої складається деформоване тіло. Якщо виміряти E , l , δ і A , можна визначити модуль пружності E .

Хід роботи. 1. За допомогою штангенциркуля виміряйте ширину і товщину поперечного перерізу гумової смужки і обчисліть його площу.

2. Закріпіть вільний кінець гумової смужки в штативі і виміряйте її довжину від нижнього краю лапки штатива до петлі.

3. Зачепіть гачок динамометра за дротяну петлю і розтягуйте гуму. Виміряйте силу пружності, яка виникає від розтягу гуми на 5, 10, 15, 20, 25, 30 мм.

4. За даними досліду побудуйте графік залежності розтягу гуми від прикладеної сили.

5. Виділіть на графіку прямолінійну ділянку і в межах цієї ділянки обчисліть модуль пружності для трьох-чотирьох значень сили.

6. Обчисліть середнє значення модуля пружності.

Контрольні запитання. 1. Що характеризує модуль пружності? 2. Якщо для дослідів взяти гумову смужку з більшим поперечним перерізом, то чи зміниться значення модуля пружності? А якщо смужка буде довша? 3. Чому для визначення модуля пружності треба брати значення сили у межах прямолінійної ділянки графіка?

3. Визначення питомого опору провідника

Мета роботи: виміряти питомий опір дроту; набути навичок користування амперметром, вольтметром, мікрометром.

Обладнання: дріт з матеріалу з великим питомим опором, натягнутий на дерев'яну планку; лабораторний амперметр (шкільний); лабораторний вольтметр (шкільний); акумулятор; вимикач; реостат на 6—10 Ом і 2 А; мікрометр; лінійка з ціною поділки 1 мм/под.; з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості. Питомий опір матеріалу можна обчислити, використовуючи формули

де d — діаметр провідника. Опір провідника R можна виміряти, склавши електричне коло за схемою, поданою на

малюнку 208. У цьому випадку формула для обчислення питомого опору провідника набуває вигляду:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \text{ а б о р } = \frac{\text{ТМ}}{\text{Я}}$$



Я,

Хід роботи. 1. Складіть електричне коло за схемою. Змінюючи положення повзунка реостата, підберіть силу струму не більшу за 0,5 А (щоб не перевантажити джерело струму).

У -
К
Мал. 208

2. Виміряйте силу струму і напругу на досліджуваному опорі за цієї сили струму.

3. Виміряйте довжину провідника лінійкою, а діаметр дроту — мікрометром у трьох-чотирьох місцях. Якщо результати вимірювань діаметра дроту різні, обчисліть середнє значення діаметра.

4. Обчисліть приблизне значення питомого опору провідника.

5. Визначте інструментальні похибки вимірювальних приладів і похибки відліку. Обчисліть максимальні абсолютні і відносні похибки вимірювань величин S , l , i . Обчисліть максимальні відносну і абсолютну похибки вимірювання питомого опору провідника.

6. Запишіть результат вимірювання питомого опору провідника у вигляді $\rho = \dots \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\nu = \dots \%$.

За допомогою довідника визначте матеріал провідника.

Контрольні запитання. 1. Що таке питомий опір і в яких одиницях його вимірюють? 2. Чому для виготовлення нагрівних приладів застосовують провідники з великим питомим опором, а для підвідних провідників — з малим?

4. Послідовне і паралельне з'єднання провідників

Мета роботи: навчитись з'єднувати провідники послідовно і паралельно, визначати їх опір у разі такого з'єднання, розподіл сил струмів і напруг.

Обладнання: батарея акумуляторів; два дротяні резистори; амперметр постійного струму на 1 А; вольтметр постійного струму на 4 В; реостат; вимикач; з'єднувальні провідники.

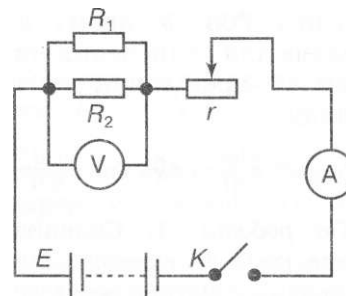
Короткі теоретичні відомості. У процесі виконання роботи перевіряють такі закони:

Я₁ #2

Я

• " Ч И ĩ - ® - 1

Мал. 209



Мал. 210

1. Для послідовного з'єднання провідників:

$$V = V_1 + V_2; \quad i = i_1 = i_2; \quad R = R_1 + R_2 \quad \text{Лі}$$

2. Для паралельного з'єднання провідників:

$$I = I_1 + I_2; \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{Лі}$$

роботи. 1. Складіть коло для вивчення послідовного з'єднання резисторів (мал. 209).

2. Виміряйте силу струму і напруги на обох резисторах, приєднавши вольтметр по чергово до потрібних точок кола.

3. Перевірте виконання законів з'єднання і зробіть висновки.

4. Складіть коло для вивчення паралельного з'єднання резисторів (мал. 210).

5. Виміряйте напругу і сили струмів в окремих резисторах, вмикаючи амперметр у відповідні гілки кола.

6. Перевірте виконання законів з'єднання і зробіть висновки.

Контрольні запитання. 1. Як з'єднуються споживачі електроенергії у квартирах? Чому? 2. У кімнаті світить люстра з 6 ламп. Чи зміниться напруга на клеммах ламп, якщо половину з них вимкнути?

5. Вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму

Мета роботи: ознайомитися з одним із методів вимірювання ЕРС і внутрішнього опору джерела струму.

Обладнання: досліджуваний гальванічний елемент (акумулятор або батарейка кишенькового ліхтарика); лабораторний амперметр (шкільний); лабораторний вольтметр (шкільний); реостат на 6—8 Ом і 2 А; вимикач та з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості.
 ЕРС джерела можна виміряти за допомогою вольтметра, опір якого значно більший за внутрішній опір джерела. Внутрішній опір джерела струму можна визначити на основі закону Ома, вимірявши напругу на резисторі з відомим опором R , приєднаним до джерела. Оскільки

•у Λ
 ©

Мал. 211

$$I = \frac{E}{R + r}, \text{ то } r = \frac{E}{I} - R.$$

Хід роботи. 1. Складіть електричне коло за схемою (мал. 211). Перевірте надійність електричних контактів, правильність вмикання амперметра і вольтметра.

2. Зніміть показання вольтметра, коли вимикач розімкнутий.

3. Замкніть коло і за допомогою реостата відрегулюйте силу струму так, щоб стрілка амперметра встановилася проти цілої поділки шкали амперметра.

4. Запишіть значення сили струму I і напруги на зовнішній ділянці кола U .

5. Обчисліть напругу на внутрішній ділянці кола

6. Обчисліть внутрішній опір джерела струму r

7. Використавши дані про клас точності амперметра і вольтметра, визначте максимальну відносну похибку результату:

$$\epsilon_r = \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}$$

8. Визначте максимальну абсолютну похибку $\Delta r = \epsilon_r \cdot r$ і запишіть значення внутрішнього опору джерела струму з урахуванням похибки вимірювання: $r \pm \Delta r$.

Контрольні запитання. 1. Чому показання вольтметра різні при розімкненому і замкненому вимикачі? 2. Чому не можна безпосередньо виміряти точно ЕРС джерела? Як можна підвищити точність вимірювання ЕРС джерела?

6. Спостереження дії магнітного поля на струм

Мета роботи: дослідити взаємодію провідника зі струмом і магніту. Набути практичних навичок у визначенні напрямку руху провідника зі струмом у магнітному полі.

Обладнання: джерело постійного струму, штабовий магніт, штатив, вимикач, котушка, з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості. На провідник зі струмом I , вміщений у магнітне поле з індукцією B , діє сила Ампера $F = BIl \sin \alpha$, напрям якої визначається за правилом лівої руки.

Хід роботи. 1. Підвісьте котушку до штатива, приєднавши її до джерела струму послідовно з реостатом і вимикачем. Попередньо вимикач слід розімкнути, повзун реостата встановити на максимальний опір.

2. До підвішеної котушки піднесіть магніт і, замикаючи коло, спостерігайте за рухом котушки.

3. У звіті про роботу зробіть малюнки магніту і котушки, вкажіть напрям ліній магнітної індукції і напрям струму в котушці під час замикання кола.

4. Визначте передбачуваний напрям руху котушки для обох випадків і вкажіть його на кожному малюнку.

5. Перевірте на досліді правильність припущень про напрям руху котушки.

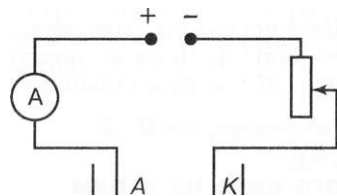
6. Повторіть досліди, змінивши напрям струму в котушці і на відповідних малюнках укажіть напрям руху котушки.

7. Визначення заряду електрона

Мета роботи: навчитися застосовувати закон Фарадея для визначення елементарного електричного заряду.

Обладнання: електролітична ванна з водним розчином сульфату купруму $CuSO_4$ і мідними електродами; джерело постійного струму; секундомір або годинник із секундною стрілкою, амперметр постійного струму на 1—2 А; терези з важками; реостат з ковзним контактом; наждачний і фільтрувальний папір; вимикач; сушильна камера; з'єднувальні провідники.

Короткі теоретичні відомості. Згідно з законом Фарадея для електролізу $m = \frac{M}{nF} I t$, звідси



заряд електрона $e = \frac{M}{nF} I t$.

Щоб визначити масу міді, яка виділилася на катоді, його зважують до і після виконання досліду (відповідно m_1 і m_2). Тому $m = m_2 - m_1$ і формула для визначення заряду електрона матиме остаточний вигляд:

$$e = \frac{M}{nF} \frac{m}{I t}$$

Хід роботи. 1. Зважте катод, заздалегідь зробивши на його верхній частині позначку, щоб надалі не переплутати його з анодом.

2. Укріпіть електроди в тримачі і, не вставляючи електроди у ванну з розчином, складіть електричне коло (згідно з мал. 212). Перевірте надійність електричних контактів, правильність приєднання електродів до джерела струму, правильність вмикання амперметра.

3. Опустіть електроди у ванну з розчином, замкніть коло, встановіть за допомогою реостата силу струму в колі не більше 1 А. Процес електролізу має тривати 15—20 хв, при цьому силу струму в колі підтримуйте незмінною (за допомогою реостата).

4. Після завершення досліду розімкніть коло, вийміть мідний катод, обережно промийте його проточною водою, висушіть (спочатку за допомогою фільтрувального паперу, а потім над електроплиткою) і зважте.

5. Обчисліть значення заряду електрона, максимальні абсолютні і відносні похибки вимірювання сили струму і часу; визначте абсолютну похибку вимірювання маси; обчисліть максимальні похибки (відносну й абсолютну) вимірювання значення заряду електрона.

6. Запишіть результат визначення заряду електрона: $e \pm \Delta e$ в = ... %. Порівняйте дослідне значення заряду електрона з табличним.

Контрольне запитання. Яку з величин у даній роботі слід вимірювати з найбільшою точністю, щоб одержати точніше значення заряду електрона?

ЗАДАЧІ ДЛЯ ПОВТОРЕННЯ

1. Чому об'єм розчину спирту у воді менший за суму об'ємів води і спирту, взятих окремо?
2. Чому сильно надута і щільно зав'язана гумова кулька виявляється через кілька днів «здутою»?
3. Якщо мікропористою трубою, вміщеною в герметичний резервуар, з якого відкачане повітря, пропускати суміш газів, то в резервуарі накопичуватиметься газ з більшим, ніж у трубі, відносним вмістом «легких» молекул. Як це пояснити?
4. На рівноплечих терезах встановлені дві однакові посудини. Одна заповнена сухим повітрям, друга — вологим, яке має такі самі тиск і температуру, що й сухе. Яка з цих посудин важча?
5. Визначити відносні молекулярні маси молекул вуглекислого газу (CO_2), аміаку (NH_3), хлоридної кислоти (HCl) і нітратної кислоти (HNO_3).
6. Обчислити маси атомів Фтору, Натрію і Аргентуму і маси молекул речовин, перелічених у задачі 5.
7. Знайти кількість молекул у 2 кг вуглекислого газу.
8. Яка кількість речовини міститься в 100 см^3 міді, якщо її густина становить $9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$?
9. Гранично допустима концентрація оксиду карбону у повітрі $0,02 \text{ мг/л}$, а пари ртуті — $0,0015 \text{ мг/л}$. Яке співвідношення числа молекул оксиду карбону і пари ртуті в 1 л повітря за гранично допустимих доз?
10. Яка кількість речовини міститься в одноатомному водні масою $m_1 = 1 \text{ г}$? у двоатомному водні масою $m_2 = 2 \text{ г}$?
11. Чому броунівський рух не спостерігається на прикладі чаїнок у склянці?
12. Чому розбиту склянку не можна зібрати, з'єднавши осколки, хоч між ними існують сили зчеплення?
13. У посудині об'ємом $V = 10 \text{ м}^3$ міститься $\nu = 1$ моль водню. Скільки молекул водню підлітає за $t = 1 \text{ с}$ до поверхні кожної з чотирьох стінок площею по $S = 1 \text{ м}^2$? Вважати стінки плоскими. Модуль проекції швидкості молекул на будь-яку вісь вважати рівним $V = 1000 \text{ м/с}$.
14. У перший момент після вибуху ядерної бомби виникає газова куля, температура якої дорівнює $T = 2 \cdot 10^7 \text{ К}$. Яка середня кінетична енергія окремої частинки такого газу?
15. Балон об'ємом $V = 50 \text{ л}$ містить кисень за температури $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ під тиском $p = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Визначити масу і число молів кисню в цьому балоні.
16. Балон містить стиснутий газ під тиском $p = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Яким буде тиск газу, якщо з балона випустити половину маси газу, а температуру підвищити від $17 \text{ }^\circ\text{C}$ до $27 \text{ }^\circ\text{C}$?
17. У балоні об'ємом $V = 24 \text{ л}$ знаходиться водень за температури $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Після того як частину водню витратили,

тиск у балоні знизився на $\Delta p = 4 \cdot 10^5$ Па. Визначити масу витраченого водню.

18. Балон об'ємом $V = 40$ л містить кисень масою $m = 2,6$ кг. За якої температури виникає небезпека вибуху балона, якщо допустимий тиск не більше $p = 5 \cdot 10^6$ Па?

19. Газовий пальник потребує $m = 71,2$ г світильного газу ($M = 16,4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) за $\Delta t = 1$ год. Яким має бути об'єм газового балона, щоб маси газу, яка в ньому міститься за тиску $p = 10^7$ Па, вистачило на $t = 12$ год роботи пальника? Температура газу ($\nu = 0$ Сі під час роботи пальника залишається сталою).

20. За температури $t_1 = 27$ °С і тиску $p_1 = 10^5$ Па об'єм повітряної кулі, заповненої гелієм, дорівнює $V = 500$ м³. Яким буде об'єм цієї кулі при піднятті у верхні шари атмосфери, де її температура знизиться до $t_2 = -33$ °С, а тиск навколишнього повітря стане рівним $p_2 = 5 \cdot 10^4$ Па? Маса гелію вважати сталою.

21. У компресор надходить повітря об'ємом $V = 0,6$ м³ за нормального атмосферного тиску і температури $t = 10$ С. До якого тиску буде стиснуте повітря, якщо за температури $t_2 = 80$ °С його об'єм дорівнював $V_2 = 200$ дм³?

22. У балоні об'ємом $V = 0,2$ м³ знаходиться гелій під тиском $p_1 = 10^5$ Па за температури $t_1 = 17$ °С. Після підкачування гелію тиск підвищився до $p_2 = 3 \cdot 10^5$ Па, а температура зросла до $t_2 = 47$ °С. На скільки збільшилась маса m гелію? Молярна маса гелію дорівнює $M = 0,004$ кг/моль. Універсальна газова стала $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

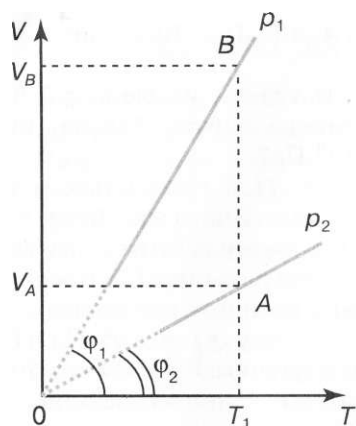
23. У циліндрі дизельного двигуна об'єм повітря під час стискання поршнем зменшується в $n = 20$ раз, тиск збільшується від $p_1 = 10^5$ Па до $p_2 = 6 \cdot 10^6$ Па. Яка температура повітря в кінці процесу стиснення, якщо на початку процесу вона дорівнювала $t_1 = 27$ °С?

24. У балоні об'ємом $V = 100$ л міститься гелій під тиском $p_1 = 5 \cdot 10^6$ Па за температури $T_1 = 300$ К. Вентиль балона зіпсувався, і гелій почав витікати. Коли вентиль відремонтували, тиск у балоні виявився рівним $p_2 = 5,1 \cdot 10^6$ Па, але температура підвищилась до $T_2 = 340$ К. Знайти масу гелію, яка витекла з балона. Молярна маса гелію $M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

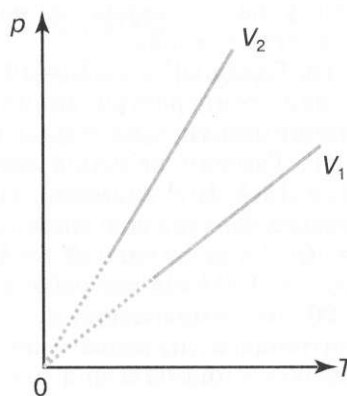
25. Певна маса ідеального газу зазнає спочатку ізобарного розширення, а потім ізотермічного стискання. Зобразити ці процеси графічно, взявши за осі координат p, T (а) і V, T (б).

26. Певна маса ідеального газу зазнає спочатку ізобарного підвищення температури, а потім, після ізотермічного стискання і ізохорного охолодження, повертається у вихідний стан. Зобразити ці процеси графічно у координатах (p, V) і (p, T) .

27. Певна маса ідеального газу піддається ізохорному охолодженню, а потім ізотермічному стисненню. Зобразити графічно ці процеси у координатах (p, V) , (V, T) і (T, p) .



Мал. 213



Мал. 214

28. Певна маса ідеального газу піддається ізохорному підвищенню температури, а потім зменшенню об'єму за постійного тиску. Зобразити графічно ці процеси у координатах (p, V) , (p, T) і (p, T) .

29. Чи можуть перетинатися дві ізотерми, які відповідають різним температурам однієї й тієї самої маси газу?

30. Користуючись рівнянням Клапейрона, встановити, яка з двох ізобар, побудованих для однієї й тієї самої маси ідеального газу (мал. 213), відповідає більшому тиску.

31. На p — T -діаграмі (мал. 214) зображені два ізохорні процеси в ідеальному газі для об'ємів V_1 і V_2 . Який об'єм більший? Маси газів однакові.

32. У посудину з рухомих поршнем, піднятим так, що об'єм під ним дорівнює $V_1 = 2$ л, вводиться вода масою m — 1 г, яка повністю випаровується. Потім рухом поршня пара стискається і, коли об'єм стає рівним $V_2 = 1,5$ л, на стінках посудини з'являються перші краплі води (стілки пітніють). Чи була пара до стискання насиченою? Яка густина насиченої пари?

33. Якими способами ненасичену пару можна перетворити в насичену?

34. У циліндрі під поршнем міститься насичена водяна пара без повітря. Чи «пружинитиме» ця пара під час стискання?

35. Манометр парового котла показує тиск $p = 1,2 \cdot 10^6$ Па за температури $T = 470$ К. На якій парі (насиченій чи перегрітій) працює котел?

36. Чи підкоряються насичена і ненасичена водяна пара газовим законам Бойля—Маріотта, Гей-Люссака і Шарля?

37. Чому збільшення тиску насиченої пари зі зростанням температури відбувається швидше, ніж в ідеального газу?

38. У посудину об'ємом $V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, сполучену з сухим повітрям за $i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ і нормального тиску, кидають шматочок сухого льоду масою $m = 1,5 \text{ г}$, і посудину щільно закривають корком. Чи розірветься при цьому посудина, якщо її стінки витримують надмірний тиск, не більший за $p = 10^5 \text{ Па}$? Тиск насиченої пари вуглекислоти за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $p_s = 56,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

39. Такі гази, як водень і гелій, тривалий час не вдавалося зрідити, і вони дістали у зв'язку з цим назву «постійні» гази. Пояснити причину їх «постійності».

40. За яких умов зростання абсолютної вологості повітря може супроводжуватися зменшенням відносної вологості?

41. У який час доби влітку відносна вологість повітря більша за однієї і тієї самої абсолютної вологості?

42. Вологий термометр психрометра показує температуру $t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$, сухий — $t_2 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$. Яка відносна вологість повітря? На скільки молекул повітря припадає одна молекула водяної пари за цих умов, якщо атмосферний тиск дорівнює $p = 99 \text{ 000 Па}$?

43. Відносна вологість повітря за температури $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $\phi = 80 \%$. Чи випаде роса у разі зниження температури до $t_2 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$?

44. Увечері на березі озера відносна вологість повітря за температури $t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $\phi = 60 \%$. За якої температури вранці може з'явитися туман?

45. Чи конденсуватиметься водяна пара в кімнаті у разі зниження температури повітря від $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо відносна вологість повітря $\phi = 75 \%$?

46. У кімнаті за температури $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ відносна вологість $\phi = 20 \%$. Скільки треба випарити води для збільшення вологості до значення $\phi_2 = 50 \%$, якщо об'єм кімнати $V = 40 \text{ м}^3$? Густина насичуючої водяної пари за температури $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $\rho = 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$.

47. Чому відносна вологість повітря у службових приміщеннях влітку, як правило, завжди вища, ніж узимку?

48. Чому восени після сходу Сонця туман над річкою тримається довше, ніж над сушею?

49. Чи утворюється роса під час вітру?

50. Чому їжу в каструлі-півидковарці можна зварити швидше, ніж у звичайній каструлі?

51. Температура кипіння ртуті $T = 630 \text{ К}$. Як пояснити застосування ртутних термометрів для вимірювання температур, які перевищують цю температуру?

52. Воду об'ємом $V = 2 \text{ л}$ у відкритій посудині нагріли на електричній плитці від $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ до температури кипіння. При цьому випарилася частина рідини. Яка кількість теплоти

затрачена на нагрівання рідини і її випаровування? Питома теплоємність води $c = 4200$ Дж/(кг·К), а питома теплота випаровування за температури 100°C $\lambda = 2,25 \cdot 10^6$ Дж/кг.

53. Яку кількість теплоти треба витратити, щоб воду масою $m = 10$ кг з початковою температурою $t = 20^\circ\text{C}$ нагріти у відкритій посудині до кипіння і перетворити в пару?

54. Мильна плівка на каркасі з рухомою перекладинкою, довжина якої $l = 4$ см, зрівноважується вантажем масою $m = 0,2$ г. Визначити поверхневий натяг мильної води.

55. В одному з методів визначення поверхневого натягу рідини вимірюють діаметр шийки краплі у момент її відривання від кінця капілярної трубки і визначають масу краплі. Вимірювання дали такі результати: діаметр шийки краплі $d = 0,7$ мм, маса $m = 300$ крапель води $m = 5$ г. Визначити за цими даними поверхневий натяг води.

56. Гліцерин піднявся у капілярній трубці на $h = 20$ мм. Визначити поверхневий натяг гліцерину, якщо діаметр каналу трубки $(d = 1$ мм. Густина гліцерину $\rho = 1,26 \cdot 10^3$ кг/м³. На яку висоту в цій трубці піднялася б вода? Густина води $\rho_w = 10^3$ кг/м³, а її поверхневий натяг $\sigma = 7,3 \cdot 10^{-2}$ Дж/м².

57. Визначити поверхневий натяг ртуті, якщо у разі занурення в неї трубки діаметром $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м ртуть у ній опускається на $h = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м.

58. Яку кількість теплоти потрібна для розплавлення чавуну масою $m = 6$ т в металургійній печі від моменту, коли чавун нагріється до температури плавлення? Питома теплота плавлення чавуну $\lambda = 1,4 \cdot 10^5$ Дж/кг.

59. Максимальна вантажопідйомність підйимального крана $P = 10^5$ Н. Якого діаметра має бути сталевий стержень для гака крана, щоб забезпечити десятикратний запас міцності?

60. У момент початку руху вгору пасажирського ліфта масою $m = 1,5$ т сталевий трос довжиною $l = 20$ м, що підтримує ліфт, видовжується на $\Delta l = 5$ мм. Визначити, якої напруги зазнає трос і яке прискорення ліфта, якщо діаметр троса $d = 19$ мм.

61. Який поперечний переріз повинен мати сталевий трос підйимального крана, щоб можна було піднімати вантаж масою $m = 2$ т за допустимої напруги $\sigma_d = 1,6 \cdot 10^7$ Па і трикратного запасу міцності.

62. 1 кг гелію перебуває під тиском $p = 8 \cdot 10^4$ Па і має густину $\rho = 0,2$ кг/м³. Визначити внутрішню енергію гелію.

63. Внутрішня енергія певної маси одноатомного газу за $T = 32^\circ\text{C}$ дорівнює $U = 1$ Дж. Скільки молекул містить ця маса газу?

64. Яку кількість теплоти треба передати ідеальному газу, який знаходиться в циліндрі під поршнем, щоб внутрішня

енергія газу зросла на $\Delta U = 100$ Дж і при цьому газ виконав роботу $A = 200$ Дж?

65. Визначити роботу зовнішніх сил над термодинамічною системою, якщо зміна внутрішньої енергії системи становить $\Delta U = 500$ Дж у разі передачі їй кількості теплоти $Q = 400$ Дж.

66. У результаті одержання кількості теплоти $Q = 800$ Дж, повітря в циліндрі розширилося і виконало роботу $A = 200$ Дж. Як змінилася при цьому внутрішня енергія повітря?

67. Яку роботу виконав газ під час передачі йому кількості теплоти $Q = 10^4$ Дж, якщо його внутрішня енергія при цьому зросла на $\Delta U = 2 \cdot 10^4$ Дж?

68. Під час швидкого стискання газу температура його підвищилася. Чи можна сказати, що: а) газу надана певна кількість теплоти? б) внутрішня енергія газу зросла?

69. Чи завжди у разі надання термодинамічній системі енергії шляхом теплообміну внутрішня енергія системи зростає?

70. Чи можна передати газові певну кількість теплоти, не викликаючи при цьому підвищення його температури?

71. Чи може збільшення об'єму газу супроводжуватися збільшенням його тиску?

72. У разі різкого опускання поршня об'єм ідеального газу в циліндрі зменшується втричі. Чи можна сказати, що тиск газу зріс втричі?

73. Які межі застосовності рівняння теплового балансу, якщо виходити з першого закону термодинаміки?

74. Як змінюються внутрішня енергія і тиск даної маси ідеального газу під час ізохорного підвищення температури?

75. Чи супроводжується ізобарне зниження температури ідеального газу виконанням роботи?

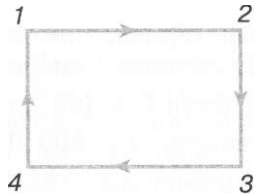
76. Чи можлива ізотермічна зміна об'єму ідеального газу без теплообміну?

77. В якому випадку ідеальний газ за однакового збільшення об'єму виконує більшу роботу: у разі ізобарного чи ізотермічного розширення?

78. Визначити швидкість витікання струмини пари із сопла парової турбіни, якщо кожен кілограм пари під час розширення зменшує свою внутрішню енергію ΔU на $5 \cdot 10^5$ Дж. Вважати початкову швидкість пари на вході в сопло рівною нулю.

79. У разі проходження через сопло турбіни швидкість струмини пари зростає на 800 м/с. На скільки зміниться внутрішня енергія пари масою $m = 100$ г, яка проходить через сопло? Вважати початкову швидкість пари рівною нулю.

80. Які з процесів зображеного на малюнку 215 циклу відбувалися з поглинанням теплоти, а які — з тепловіддачею?



У

Мал. 215

81. Об'єм газу, що перебував під тиском $p = 8 \cdot 10^6$ Па, під час ізобарного процесу збільшився на $\Delta V = 0,5$ м³. При цьому газу була передана кількість теплоти $Q = 6 \cdot 10^6$ Дж. На скільки змінилась внутрішня енергія газу? Нагрівся чи охолонув газ у результаті?

82. Температура пари, яка надходить у турбіну, $T_1 = 723$ К, а температура пари в конденсаторі $T_2 = 303$ К. Який тепловий ККД парової турбіни?

83. В ідеальній тепловій машині газ віддав холодильнику 55 % кількості теплоти, одержаної від нагрівника. Визначити температуру холодильника, якщо температура нагрівника $t = 327$ С.

84. Двигун автомобіля витрачає за годину тп — 22 кг бензину. Яку максимальну корисну потужність може розвивати цей двигун, якщо середня температура газів у циліндрі двигуна під час робочого ходу поршня $T_1 = 1073$ К, а температура відпрацьованих газів $T_2 = 423$ К? Порівняти цю потужність з фактичною потужністю двигуна, якщо його ККД $\eta = 26$ %.

85. Якою має бути температура нагрівника, щоб стало можливим досягнення максимального значення ККД теплової машини $\eta = 80$ % за температури холодильника $T_2 = 300$ К?

86. Крапля дощу, яка несла позитивний електричний заряд 5д, з'єдналася з краплею дощу, яка несла негативний електричний заряд -3д. Яким став загальний заряд краплі?

87. Як визначити знак заряду електроскопа?

88. Дві хмари, розмірами яких для спрощення можна знехтувати, взаємодіють з силою $F = 9 \cdot 10^4$ Н. Визначити заряд однієї з хмар, якщо заряд другої хмари $q_2 = 25$ Кл, а відстань між ними $r = 5$ км.

89. Сила взаємодії двох точкових зарядів, розміщених на відстані $l = 60$ см один від одного, дорівнює $F = 1,5 \cdot 10^{-5}$ Н. Визначити модуль другого заряду q_2 якщо модуль першого заряду $q_1 = 1,2 \cdot 10^{-8}$ Кл.

90. Два точкові негативні заряди, розміщені у вакуумі на відстані $l = 10$ мм один від одного, відштовхуються з силою $F = 2 \cdot 10^{-5}$ Н. Вважаючи заряди однаковими, визначити кількість зайвих електронів в одному із зарядів.

91. Однакові кульки малого розміру мають заряди $q_1 = 3 \cdot 10^{-6}$ Кл і $q_2 = -8 \cdot 10^{-6}$ Кл. Відстань між їх центрами у повітрі дорівнює $r = 0,5$ м. Кульки дотикають одну до одної, а потім знову розсовують на таку саму відстань. Знайти силу взаємодії кульок після дотику.

ОГКА

92. Навколо нерухомого точкового заряду $q_0 = 10^{-9}$ Кл рівномірно обертається під дією сил притягання маленька кулька, заряджена негативним зарядом. Чому дорівнює відношення заряду кульки до її маси $\frac{q}{m}$, якщо радіус орбіти

$R = 2 \cdot 10^{-2}$ м, а кутова швидкість обертання $\omega = 3$ рад/с. Поле тяжіння не враховувати.

93. Електрон обертається по коловій орбіті радіуса $r = 10^{-10}$ м навколо ядра із зарядом Q де $Q/e = 20$. Визначити швидкість руху електрона. Заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, маса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

94. Два точкові заряди взаємодіють між собою з силою $F_1 = 4 \cdot 10^{-4}$ Н у вакуумі на відстані $r_1 = 20$ см. Якщо їх помістити в рідкий діелектрик на відстані $r_2 = 10$ см один від одного, то сила взаємодії стане рівною $F_2 = 8 \cdot 10^{-4}$ Н. Знайти діелектричну проникність діелектрика.

95. Два точкові заряди перебувають у парафіні на відстані $r_1 = 20$ см. На якій відстані вони мають бути у повітрі, щоб сила взаємодії між ними не змінилася?

96. З якою силою притягуються електрон і ядро атома Гідрогену, якщо відстань між ними $r = 5 \cdot 10^{-9}$ см? Заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а заряд ядра атома Гідрогену чисельно дорівнює заряду електрона, але з протилежним знаком.

97. У вершинах рівностороннього трикутника поміщено три однакові заряди $q_1 = q_2 = q_3 = 6,7 \cdot 10^{-9}$ Кл. На кожен заряд діє сила $F = 0,01$ Н. Визначити довжину l сторони трикутника.

98. Дві однакові заряджені кульки, які знаходяться в гасі і підвішені до одного гачка на нитках довжиною $l = 50$ см, розійшлися на відстань $r = 50$ см. Заряди кульок однакові і рівні $q = 8 \cdot 10^{-7}$ Кл. Яка густина матеріалу кульок ρ , якщо їх радіус $R = 1$ см? Густина гасу $\rho_f = 0,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Прискорення вільного падіння вважати рівним $g = 10$ м/с².

99. Дві однакові заряджені однаковим зарядом кульки, підвішені на нитках однакової довжини в одній точці, розійшлися на певний кут. Якою має бути густина матеріалу кульок, щоб у разі занурення їх у гас (діелектрична проникність $\epsilon = 2$) кут між нитками не змінився? Густина гасу $\rho_f = 0,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

100. Маленька кулька, заряджена зарядом $q = 1,2 \cdot 10^{-8}$ Кл, перебуває в електростатичному полі напруженістю $E = 100$ Н/Кл. Яка сила діє на кульку?

101. Обчислити напруженість E точки поля, в якій на заряд $q = 10^{-7}$ Кл діє сила $F = 9 \cdot 10^{-6}$ Н. Чому дорівнює точковий заряд який створює поле, якщо дана точка поля знаходиться від нього на відстані $r = 5$ см? Середовище — повітря ($\epsilon = 1$).

102. На точковий електричний заряд $d = 5 \cdot 10^{-10}$ Кл електричне поле діє силою $E = 10^{-7}$ Н. Визначити напруженість електричного поля.

103. Напруженість поля на відстані $r_1 = 30$ см від точкового електричного заряду дорівнює $E_1 = 900$ В/м. Чому дорівнює напруженість поля на відстані $r_2 = 10$ см від заряду?

104. На якій відстані від маленької зарядженої кульки напруженість електричного поля у воді з діелектричною проникністю $\epsilon = 81$ буде такою самою, як у вакуумі на відстані $r = 18$ см від центра кулі?

105. На відстані $B = 10$ см у вакуумі розміщені два різнойменні точкові заряди однакові модулем $d = 1,5 \cdot 10^{-8}$ Кл. Знайти напруженість електричного поля в точці, яка знаходиться на відстані $r = 10$ см від обох зарядів.

106. Два однакові заряди перебувають на відстані B — їм один від одного і відштовхуються з силою $P = 1$ Н. Визначити напруженість поля E , створюваного системою цих зарядів у точці, рівновіддаленій від обох зарядів на ту саму відстань E .

107. Однакові за модулем, але різні за знаком заряди $q = 10$ нКл розміщені в двох вершинах рівностороннього трикутника із стороною $a = 1$ м. Знайти напруженість електричного поля в третій вершині.

108. У вершинах квадрата розміщені однакові позитивні електричні точкові заряди. Чому дорівнює напруженість електростатичного поля цих зарядів у центрі квадрата?

109. Маленька кулька масою $m = 1$ г, заряджена зарядом $d = 10^{-7}$ Кл, підвішена на діелектричній нитці. На який кут від вертикалі відхилиться нитка, якщо систему помістити в однорідне електричне поле з напруженістю $E = 10^4$ В/м, лінії напруженості якого горизонтальні?

110. Щоб у повітрі за атмосферного тиску «проскочила» електрична іскра, в ньому має бути електростатичне поле напруженістю не менше, ніж $E = 3 \cdot 10^6$ В/м. Яка напруга між хмарою і землею під час грози, якщо довжина іскри, тобто блискавки, дорівнює $l = 400$ м?

111. На висоті $H = 2,5$ км над Землею пливе хмара, яка несе позитивний заряд. Як переміщуються вільні електрони у поверхневому шарі Землі? Визначити напруженість поля простору «Земля — хмара», якщо хмара має потенціал $\phi = 2 \cdot 10^8$ В. Поле вважати однорідним.

112. Якщо поблизу антени проходить хмара, яка несе позитивний заряд, на ній індуються позитивний або негативний заряди. Чи збережеться заряд на антені, коли хмара відійде? Визначити різницю потенціалів між хмарою і Землею, відстань між якими дорівнює ($h = 2$ км, за напруженості $E = 6000$ В/м. Поле можна вважати однорідним.

113. Заряд q в точці електростатичного поля має потенціальну енергію $W = 1$ Дж. Яку потенціальну енергію матиме в тій самій точці поля електричний заряд $5q$?

114. Заряд q знаходиться в точці електростатичного поля з потенціалом $\varphi = 2$ В. Яким стане потенціал того самого поля в тій самій точці у разі вміщення в неї електричного заряду $5q$?

115. Різниця потенціалів між двома зарядженими паралельними пластинами дорівнює $(\varphi_1 - \varphi_2) = 100$ В, відстань між пластинами $d = 2$ см. Визначити напруженість електричного поля між пластинами.

116. Напруженість однорідного електричного поля $E = 30$ В/м. Яка різниця потенціалів між точками електричного поля, розміщеними на одній лінії напруженості на відстані $(d = 30$ см одна від одної)?

117. Два точкові заряди $q_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл і $q_2 = -3 \cdot 10^{-8}$ Кл розміщені у вакуумі на відстані $d = 20$ см один від одного. На якій мінімальній відстані від першого заряду знаходиться точка, потенціал якої дорівнює нулю?

118. Перший у світі штучний супутник Землі мав форму кулі діаметром $d = 58$ см. У польоті супутник електризувався до потенціалу $\varphi = 6$ В. Визначити електричний заряд на супутнику.

119. Напруженість електричного поля біля поверхні Землі дорівнює $E = 130$ В/м. Здавалося б, що між основою підйомального крана і його вершиною має існувати напруга порядку тисяч вольт. Чому насправді така напруга не виявляється?

120. На краплинах ртуті радіусом $R = 0,4$ см знаходяться однакові заряди $q = 2,78 \cdot 10^{-14}$ Кл. Вісім таких краплин зливаються в одну велику краплю. Яким буде потенціал цієї краплі? Електрична стала $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

121. Під час переміщення в електростатичному полі заряду $q = 4$ Кл електричні сили виконали роботу $A = 8$ Дж. Визначити різницю потенціалів початкової і кінцевої точок шляху.

122. Електричний заряд $q = 2$ Кл переміщається в електричному полі з точки з потенціалом $\varphi_1 = 20$ В в точку з потенціалом $\varphi_2 = 5$ В. Яку роботу виконують при цьому сили електричного поля?

123. Заряджена частинка після проходження точок поля, які мають різницю потенціалів $\Delta\varphi = 1000$ В, набула енергію $W = 4,8 \cdot 10^{-6}$ Дж. Визначити заряд q частинки.

124. В електронно-променевої трубці електрони розганяються, проходячи різницю потенціалів $\Delta\varphi = 8000$ В. З якою швидкістю електрони бомбардують екран трубки?

125. Який заряд треба надати конденсаторам ємністю $C_1 = 10$ мкФ і $C_2 = 20$ мкФ, щоб зарядити їх до напруги $U = 400$ В?

126. Яка енергія конденсатора ємністю $C = 5 \text{ мкФ}$ за напруги на його обкладках $U = 1000 \text{ В}$?

127. Електрична ємність провідника дорівнює $C = 0,2 \text{ Ф}$. Чому дорівнює потенціал провідника, якщо йому надали заряд $q = 8 \text{ Кл}$? У скільки разів треба змінити ємність провідника, щоб заряд $q = 2,5 \text{ Кл}$ створив той самий потенціал, що і в першого провідника?

128. Площа пластини плоского конденсатора $S = 49 \text{ см}^2$. Товщина шару діелектрика між пластинами $d = 0,1 \text{ см}$. Визначити ємність, заряд і енергію конденсатора, якщо різниця потенціалів на його обкладках $U = 200 \text{ В}$, а діелектрична проникність слюди $\epsilon = 7$.

129. За якої напруги енергія поля конденсатора дорівнює $W = 400 \text{ Дж}$, якщо його ємність $C = 200 \text{ мкФ}$? Що станеться з енергією поля конденсатора, якщо його ємність збільшити в 2 рази, а подану на нього напругу зменшити також у 2 рази?

130. Плоский конденсатор зарядили до напруги $U = 500 \text{ В}$. Потім його занурили в рідкий аміак, після чого різниця потенціалів виявилась рівною $U' = 20 \text{ В}$. Чому дорівнює діелектрична проникність аміаку?

131. Плоский конденсатор спочатку знаходився у повітрі, а потім його занурили в гас так, що він заповнив половину об'єму зазору конденсатора (конденсатор занурювався при вертикальному положенні пластин). У скільки разів змінилась ємність конденсатора? Діелектрична проникність гасу $\epsilon = 2$.

132. На конденсаторі вказують робочу напругу, а іноді і напругу, під якою випробувано конденсатор. Чому не можна перевищувати ці напруги під час експлуатації конденсатора?

133. У паспорті конденсатора вказано: « 150 мкФ ; 200 В ». Який найбільший електричний заряд можна надати даному конденсатору? Яку найбільшу енергію може мати конденсатор?

134. Якщо в електричному колі є конденсатори, то і після його розмикання існує небезпека «удару» електричним струмом. Чому? Що слід зробити після розмикання такого кола?

135. Імпульсне стикове електрозварювання мідного дроту здійснюють за допомогою розряду конденсатора ємністю $C = 10^{-3} \text{ Ф}$ за напруги на конденсаторі $U = 1500 \text{ В}$. Яка середня корисна потужність розряду імпульсу, якщо його тривалість $t = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, а ККД установки $\eta = 44 \%$?

136. Генератор постійного струму має внутрішній опір $r = 0,5 \text{ Ом}$. У разі замикання на зовнішній опір $R = 8 \text{ Ом}$ напруга на його затискачах стає рівною $U = 160 \text{ В}$. Визначити ЕРС генератора.

137. Генератор з ЕРС $\mathcal{E} = 80 \text{ В}$ і внутрішнім опором $r = 0,2 \text{ Ом}$ з'єднаний зі зварювальним апаратом, опір якого $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$. Підвідні провідники мають опір $R_2 = 0,1 \text{ Ом}$. Визначити силу

струму в колі, напругу на клеммах зварювального апарата, силу струму короткого замикання.

138. Визначити напругу на виході джерела постійного струму з ЕРС $\mathcal{E} = 20$ В і внутрішнім опором $r = 2$ Ом під час підключення навантаження з електричним опором $R = 8$ Ом.

139. До полюсів джерела струму з ЕРС $\mathcal{E} = 8$ В приєднали резистор опором $R = 30$ Ом. При цьому напруга на кінцях резистора стала рівною $U = 6$ В. Чому дорівнює внутрішній опір джерела?

140. Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму до його виходу був приєднаний спочатку резистор опором $R_1 = 2$ Ом, а потім резистор опором $R_2 = 4$ Ом. У першому випадку сила струму в колі була $I_1 = 0,5$ А, в другому — $I_2 = 0,3$ А. За цими значеннями сили струму і електричного опору зовнішнього кола визначити ЕРС джерела і його внутрішній опір.

141. Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму до його виходу підключили реостат. При одному положенні повзунка реостата сила струму в колі була $I_1 = 1,5$ А, а напруга $U_1 = 4,5$ В; при другому положенні повзунка одержані значення $I_2 = 2$ А і $U_2 = 3$ В. Визначити за цими даними ЕРС джерела і його внутрішній опір.

142. Для життя людини небезпечно ураження електричним струмом силою понад $I = 20$ мА. Яка напруга становитиме небезпеку для життя людини? Електричний опір тіла людини у разі пошкодження шкіри становить близько $R = 1000$ Ом.

143. Як змінюватиметься напруга на затискачах джерела струму у разі збільшення сили струму в колі?

144. Визначити показання вольтметра і амперметра в колі, складеному за схемою на малюнку 216. ЕРС джерела $\mathcal{E} = 6$ В, його внутрішній опір $r = 0,2$ Ом; опори резисторів R_1 і R_2 відповідно дорівнюють $R_1 = 1,8$ Ом і $R_2 = 10$ Ом.

145. До джерела струму з ЕРС $\mathcal{E} = 6$ В і внутрішнім опором $r = 0,5$ Ом приєднано два резистори — R_1 і R_2 — опором $R_{\pm} = 2$ Ом і



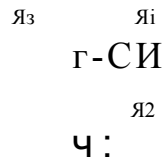
Ч:

$\frac{1}{I} - \frac{2}{\mathcal{E} r R}$

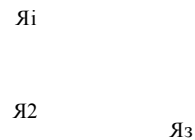
Мал. 216

3

Мал. 217



Мал. 218



Мал. 219

B_2 — $1,5$ Ом, з'єднані послідовно, і амперметр (мал. 217). Яку силу струму показує амперметр? Якими будуть показання амперметра, якщо паралельно до першого резистора приєднати ще один резистор 3 з опором E_3 — 2 Ом?

146. Джерело струму має ЕРС $\mathcal{E} = 4$ В, а його внутрішній опір $r = 0,3$ Ом. Визначити показання амперметра (мал. 218), якщо $R_1 = 40$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, а $i_3 = 1,3$ Ом.

147. Три резистори з опорами R_1 — $R_2 = 10$ Ом і $R_3 = 3$ Ом приєднані до джерела з ЕРС $\mathcal{E} = 10$ В (мал. 219). Сила струму в колі $I = 1$ А. Визначити внутрішній опір джерела і силу струму короткого замикання.

148. Радіоаматор має резистори з опорами $1, 2, 3$ і 4 кОм. Як їх треба з'єднати, якщо необхідно одержати опір $2,5$ кОм?

149. Як, користуючись вольтметром і акумулятором, визначити опір одного з двох резисторів, на якому стерся напис? Як це зробити, якщо є амперметр і акумулятор?

150. Опір амперметра $r_a = 8 \cdot 10^{-3}$ Ом, а шкала розрахована на $I = 1$ А. Що треба зробити, щоб амперметр давав можливість вимірювати силу струму до $I = 5$ А?

151. Амперметр з верхньою межею вимірювання сили струму $I = 10$ А має внутрішній опір $r_a = 1$ Ом. Який опір повинен мати шунт, щоб у разі його приєднання верхня межа вимірювань амперметра стала дорівнювати $I = 100$ А?

152. Як можна виміряти напругу в колі, яка перевищує 220 В, якщо є два однакові вольтметри зі шкалами до 150 В?

153. Вольтметром з межею вимірювань до 75 В і внутрішнім опором 2000 Ом необхідно виміряти напругу 300 В. Що для цього треба зробити? Як при цьому зміниться ціна поділки приладу?

154. Вольтметр з верхньою межею вимірювань напруги 10 В має внутрішній опір 5000 Ом. Який опір повинен мати додатковий резистор, щоб у разі його приєднання верхня межа вимірювань дорівнювала б 100 В?

155. Електропраска розрахована на напругу $V = 120$ В і потужність $P = 400$ Вт. Який додатковий опір треба поставити, щоб праска могла працювати за напруги $U_1 = 220$ В?

156. Електродвигун токарного верстата працює за напруги $U_1 = 220$ В і сили струму $I = 25$ А. Визначити корисну потужність і опір обмотки двигуна, якщо його ККД $\eta = 70$ %.

157. Електрогенератор мідними проводами перерізом $S = 16$ мм² подає до місця зварювання струм силою $I = 100$ А на відстань $l = 20$ м. Напруга на клеммах генератора у разі навантаження $U_1 = 60$ В, а у випадку холостого ходу $U_2 = 85$ В. Визначити внутрішній опір генератора, спад напруги в проводах, напругу на електродах зварювального апарата.

158. У трамваї встановлено два електродвигуни. Водій може вмикати їх послідовно або паралельно. З якою метою передбачені різні види з'єднання двигунів?

159. Визначити напругу на клеммах тягової підстанції, якщо електровоз споживає силу струму $I = 1000$ А. Напруги на клеммах струмоприймача електровоза, коли він знаходиться на відстанях $l_1 = 2$ км і $l_2 = 5$ км від підстанції, відповідно дорівнюють $U_1 = 3125$ В і $U_2 = 2930$ В. Опір 1 км провода контактної мережі дорівнює $R_1 = 0,04$ Ом, а 1 км рейкового шляху — $R_2 = 0,025$ Ом.

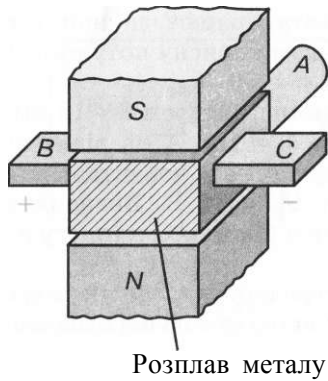
160. Провідник із струмом силою $I = 12$ А вміщений у магнітне поле з індукцією $B = 0,4$ Тл. З якою силою діє поле на провідник довжиною $l = 40$ см, розміщений під кутом $\alpha = 90^\circ$ до вектора магнітної індукції? Чому дорівнюватиме сила, коли напрям струму утворює з напрямом вектора індукції кут $\alpha = 30^\circ$? Чому дорівнює сила, коли провідник із струмом розміщений вздовж ліній магнітної індукції поля?

161. Якою має бути сила струму в обмотці якоря електродвигуна, щоб на ділянку обмотки з 20 витків довжиною $l = 10$ см кожний, розміщену перпендикулярно до **вектора** індукції **в** магнітному полі з індукцією $B = 1,5$ Тл, діяла сила $F = 120$ Н?

162. Визначити силу, яка діє на кабель, що містить 200 жил, кожною з яких тече струм силою $I = 60$ мА, якщо він вміщений у магнітне поле з індукцією $B = 1,5$ Тл, перпендикулярною до напрямку струму. Активна довжина кабеля $l = 50$ см.

163. Для відведення теплоти в ядерних реакторах як теплоносії часто застосовують рідкий метал, який перекачується магнітним насосом (мал. 220). У трубі А, розміщеній між полюсами електромагніта, знаходиться рідкий метал. Через контактні шини В і С поперек струмини металу пропускають постійний струм. В якому напрямі рухається струмина металу? З якою силою магнітне поле діє на струмину металу, якщо сила струму $I = 10^4$ А, магнітна індукція $B = 1,2$ Тл і ширина трубки $a = 12$ см?

164. Визначити максимальний обертальний момент, що діє на рамку зі струмом силою $I = 5$ А, якщо магнітна індукція поля $B = 0,6$ Тл і площа контуру рамки $S = 0,05$ м².



Мал. 220

165. В однорідному магнітному полі, індукція якого за модулем $B = 0,5$ Тл, знаходиться квадратна рамка зі стороною, рівною $l = 10$ см. Площина рамки паралельна вектору індукції поля, і сила струму в ній $I = 10$ А. Чому дорівнює момент сил, які діють на рамку?

166. За якої сили струму в обмотці обертальний момент на валу електродвигуна постійного струму дорівнює $M = 10$ Н·м, якщо обмотка якоря з $n = 40$ витків має довжину $l = 20$ см, радіус рамки $B = 5$ см, індукцію магнітного поля $B = 1,2$ Тл?

167. Частинка, яка має електричний заряд $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл, рухається в однорідному магнітному полі з швидкістю $v = 4 \cdot 10^4$ м/с. Чому дорівнює сила Лоренца, що діє на частинку, якщо індукція поля $B = 3 \cdot 10^{-5}$ Тл, а кут між векторами v і B дорівнює $\alpha = 30^\circ$?

168. Як зміниться радіус кола, по якому рухається заряджена частинка в однорідному магнітному полі, якщо збільшити його індукцію в чотири рази і зменшити швидкість в два рази?

169. Як зміниться період обертання зарядженої частинки в однорідному магнітному полі під час збільшення магнітної індукції в три рази?

170. Заряджена частинка влітає зі швидкістю $v = 10^3$ м/с в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 2 \cdot 10^{-2}$ Тл і рухається по колу радіуса $r = 10$ см. Чому дорівнює заряд частинки, якщо її енергія $W = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж?

171. Сила струму в металевому провіднику $I = 0,8$ А, переріз провідника $S = 4$ мм². Вважаючи, що в кожному кубічному сантиметрі металу міститься $n_0 = 2,5 \cdot 10^{22}$ вільних електронів, визначити середню швидкість їхнього впорядкованого руху.

172. На яку відстань перемістяться електрони мідним провідником перерізом $S = 4$ мм² за сили струму $I = 10$ А і за час $t = 5$ с? На яку відстань поширився б струм за цей час?

173. Опір обмотки генератора за температури $t_1 = 20$ °С дорівнює $R_1 = 0,05$ Ом. На скільки градусів підвищилась температура обмотки генератора під час роботи, якщо її опір зріс до $R_2 = 0,06$ Ом? Обмотка виготовлена з мідного дроту.

174. Допустима температура за нормального навантаження обмотки електродвигуна дорівнює $t_1 = 70$ °С. В якому режимі (недовантаження, нормальний, перевантаження) працює електродвигун, якщо опір мідного провoda його обмотки зріс від 0,45 (за 20 °С) до 0,50 Ом?

175. Визначити опір діода, якщо за напруги $U = 0,3$ В сила струму в провідному напрямі дорівнює $I = 200$ мА. Які втрати потужності на нагрівання діода?

176. Найбільша допустима густина струму для селенових випрямлячів (вентилів), які працюють в умовах природного охолодження, дорівнює $i = 400$ А/мм². Визначити площу пластини випрямляча, розрахованого на $I = 10$ А.

177. Чому за кімнатної температури (20 °С) електрони практично не вилітають з металу, незважаючи, що їхні швидкості досягають кількох сотень кілометрів за секунду?

178. Між електродами електронної лампи-діода прикладена напруга $U = 300$ В. Визначити кінцеву швидкість електронів біля анода, якщо біля катода вона порядку нуля. Визначити прискорення і час руху електрона, якщо відстань між електродами $si = 12$ мм. Поле між електродами можна вважати однорідним.

179. Алюміній одержують за сили струму $I = 40\,000$ А і напруги на електродах ванни $U = 4,5$ В. Визначити, яку кількість алюмінію одержують за добу, площу поверхні електродів, витрату електроенергії і потужність установки, якщо густина струму дорівнює $i = 0,8$ А/дм², а ККД установки $\eta = 90$ %.

180. Під час визначення електрохімічного еквівалента міді одержали такі дані: час пропускання струму $t = 25$ хв; сила струму $I = 0,6$ А; маса катода до досліду $m_1 = 52,41$ г, а після досліду $m_2 = 52,70$ г. Яке значення електрохімічного еквівалента міді одержали на основі цього досліду?

181. Чому провід повітряних ліній передачі електричної енергії не покритий ізолюючою оболонкою?

182. Чи можливий самостійний розряд між проводами ЛЕП (лінія передачі електричної енергії)?

183. Який вид розряду спостерігається в лампах денного світла? З якою метою вони заповнюються паром ртуті?

184. Для дугового розряду в газовому проміжку необхідна напруга 40—50 В, а для іскрового розряду в тому самому проміжку — кілька тисяч вольт. Як це пояснити?

185. Чому для зменшення втрат енергії на коронний розряд збільшують діаметр проводу і застосовують порожнистий провід?

ВІДПОВІДІ ДО ВПРАВ

Вправа 1. 1. 32; 16 і 34. 2. $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг; $2,65 \cdot 10^{26}$ кг; $5,6 \cdot 10^{26}$ кг. 3. 2,5 моль. 4. $32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $16 \cdot 10^{13}$ кг/моль; $34 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. 5. $6,02 \cdot 10^{23}$. 6. $2,1 \cdot 10^{25}$. 7. 0,96 кг.

Вправа 2. 1. $5,39 \cdot 10^3$ Па. 2. $1,2 \cdot 10^{19}$ Дж. 3. $\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_1^2}{v_2^2}$. 4. $0,96 \text{ кг/м}^3$. 5. 7-Ю²².

Вправа 3. 1. « 98 кг. 2. $0,72 \cdot 10^7$ Па. 3. $0,07 \text{ м}^3$. 4. $4,1 \cdot 10^7$ Па. 5. $M = 8,4 \cdot 10^{-2}$ кг/моль; криптон. 6. $1,16 \cdot 10^5$ Па. 7. 2617 К, або 2344 °С.

Вправа 4. 1. $1,06 \cdot 10^6$ Па. 2. Зростає на $2,56 \cdot 10^3$ Па. 3. Із підвищенням температури зростає тиск газу всередині балона і виникає небезпека вибуху. 4. Об'єм збільшувався.

Вправа 5. 1. Треба додатково випарити 64 кг води. 2. 22 %. 3. До 4 °С. 4. Так.

Вправа 6. 1. Для води. 2. $22,4 \cdot 10^{-3}$ Н/м. 3. « 0,04 Н/м. 4. Треба збільшити число крапель.

Вправа 7. 1. $2,2 \cdot 10^{12}$ Н/м. 2. 61 мм. 3. Так. Рівень піднімається, оскільки густина рідини під час охолодження збільшується. 4. 376 Па; » 0,4 %. 6. « 6,1 см.

Вправа 8. 1. 1 см. 2. При твердненні бетону відбувається зчеплення розтягнутої арматури з бетоном і бетон виявляється стиснутим, а це підвищує стійкість напруженої залізобетонної конструкції проти утворення тріщин. 3. $2,3 \cdot 10^4$ Н.

Вправа 9. 1. 3. 2. $1,5 \cdot 10^8$ Н/м². 3. 4,9 мм; 3,4 мм.

Вправа 10. 1. 460 ДжДкг-К). 2. $6,8 \cdot 10^4$ Дж. 3. ® $9,5 \cdot 10^9$ Дж. 4. $2,4 \cdot 10^8$ Дж. 5. * $2,4 \cdot 10^8$ Дж.

Вправа 11. 1. 2 год 50 хв. 2. 13,8 кг. 3. 20,4 °С.

Вправа 12. 1. $1,72 \cdot 10^5$ Дж. 2. Оскільки теплоємність мідного тіла менша, воно нагрівається до вищої температури. 3. 34 рази. 4. 6-Ю⁸ Дж.

Вправа 13. 1. За ізобарного. 2. $7,3 \cdot 10^3$ Дж. 4. $7,7 \cdot 10^3$ Дж. 5. ~ $1,4 \cdot 10^3$ Дж.

Вправа 14. 1. Ні, треба враховувати виконану газом роботу» 2. Так, якщо тіло виконуватиме роботу (або переходитиме в інший

агрегатний стан). 3. Внаслідок перетворення частини внутрішньої енергії в механічну роботу, виконувану під час розширення газу, його температура знижуватиметься. 4. 30 Дж. 5. 5,25 кДж. 6. 96 К.

Вправа 15. 1. « 10 %. 2. « $6,3 \cdot 10^6$ Дж. 3. 67 %. 4. Без холодильника не можна було повернути робоче тіло до початкового стану (здійснити замкнений цикл). 5. Цю енергію можна використати для нагрівання холодніших тіл способом теплопередачі.

Вправа 16. 1. « $1,1 \cdot 10^{20}$ Н. 2. * $9,15 \cdot 10^{22}$ Н; « 0,29 м. 3. « $6,2 \cdot 10^{-3}$ Кл.

Вправа 17. 1. « $0,55 \cdot 10^{-19}$ Н/Кл. 2. * $0,8 \cdot 10^{-4}$ Н/Кл. 3. Н/Кл; $2,5 \cdot 10^{-5}$ Кл.

Вправа 18. 1. @ $2 \cdot 10^3$ м. 2. 210 аркушів. 3. 10° В/м. 4. $1,0$ м².

Вправа 19. 1. Енергія електричного поля зменшується в ϵ раз. 2. Зросте. 3. У разі з'єднання з обкладками може виникнути розрядний струм. Після розмикання кола з конденсаторами їх слід розрядити провідним стержнем. 4. 36 Дж; 15 кВт.

Вправа 20. 1. 100 В; 20 В; 30 В і 50 В. 2. $4 \cdot 10^4$ Ом. 3. 3,2 Ом; 4,8 Ом. 4. 0,36 А.

Вправа 21. 1. 20 А; 132 В. 2. 5 В. 3. 20 А. На акумуляторі позначена максимально допустима сила струму за умови нормальної експлуатації батареї. Значення сили струму у разі перевантажень може бути набагато більшим. Однак від перевантаження руйнуються пластини акумулятора, внаслідок чого він може швидко вийти з ладу. 4. 100 А; 50 В; 400 А.

Вправа 22. 1. 0,98 А. 2. * 57° .

Вправа 23. 1. $1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. 2. « 0,09 м; « $3 \cdot 10^8$ с. 3. ~ $12,5 \cdot 10^{-11}$ Дж; $12,96 \cdot 10^{-19}$ кг·м/с. 4. $2,4 \cdot 10^{-8}$ Н.

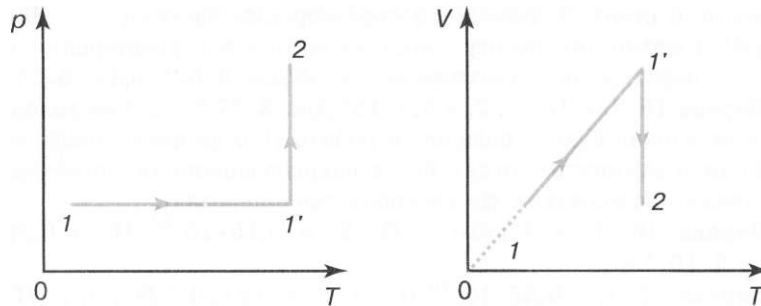
Вправа 24. 1. $3 \cdot 10^4$ м/с. 2. « $9,4 \cdot 10^{-5}$ м; $3 \cdot 10^6$ км.

Вправа 25. 1. « 5 А. 2. « 0,2. 3. « 26,7 Ом. 4. « 76 Ом.

Вправа 26. 1. 5 г. 2. Правильними. 3. $3,3 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл.

ВІДПОВІДІ ДО ЗАДАЧ ДЛЯ ПОВТОРЕННЯ

1. У розчині в результаті взаємодії молекули води і спирту «упаковані» щільніше, а між молекулами води і спирту, взятими окремо, існують проміжки. 2. Внаслідок різниці тисків всередині і зовні кульки молекули повітря «просочуються» крізь оболонку кульки і тиск в ній зменшується. 3. Молекули компонентів з меншою молярною масою рухливіші за більш масивні молекули і тому частіше проходять через пори труби. 4. У разі рівних тиску і температури в рівних об'ємах міститься однакове число молекул будь-якого газу. Середня молярна маса повітря більша за середню молярну масу суміші повітря з водяною парою. Тому посудина з вологим повітрям легша за посудину з сухим.



Мал. 221

5. 44; 17; 36; 63. 6. $3,15 \cdot 10^{26}$ кг; $3,82 \cdot 10^{26}$ кг; $3,27 \cdot 10^{25}$ кг.
 7. $2,7 \cdot 10^{25}$ молекул. 8. 14 моль. 9. $i \ll 96$. 10. 1 моль; 1 моль.

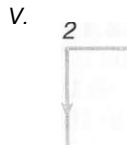
11. Число ударів молекул рідини об поверхню частинки зростає пропорційно площі цієї поверхні, маса ж частинки пропорційна її об'єму. Тому із зростанням розмірів частинки молекулам все важче її зрушити. Броунівська частинка також має бути достатньо малою, щоб удари молекул були некомпенсовані. 12. У разі складання осколків практично не можна розмістити поверхні тріщин на такій відстані, щоб сили притягання молекул стали помітними. 13. $3 \cdot 10^{25}$. 14. $4,14 \cdot 10^{16}$ Дж. 15. 1,3 кг; 41 моль. 16. $2,6 \cdot 10^5$ Па. 17. $8,1 \cdot 10^3$ кг. 18. 296 К. 19. $\ll 11,8 \cdot 10^3$ м³. 20. 800 м³. 21. $3,74 \cdot 10^5$ Па. 22. $\ll 57$ г. 23. 900 К. 24. 80 г. 25. Див. мал. 221. 26. Див. мал. 222. 27. Див. мал. 223. 28. Див. мал. 224. 29. Ні. 30. $p_2 > p_1$. 31. $V_2 < V_1$. 32. Ні; $0,66$ кг/м³. 33. Стисканням пари, зниженням температури. 34. Ні, оскільки під час стискання пара почне конденсуватися і її тиск не змінюватиметься. 35. На перегрітій парі. 36. Насичена пара не підкоряється, а ненасичена підкоряється газовим законам, причому, чим далі пара від насичення, тим точніше.

р а

Р а

V 0

Мал. 222



V

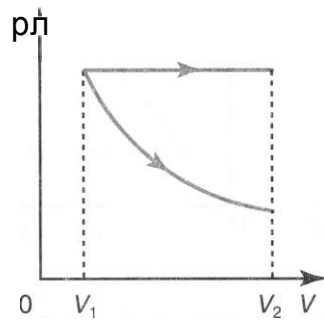
Мал. 223

37. Під час нагрівання рідини в закритій посудині зростає концентрація і, отже, густина пари. Крім того, підвищується температура пари, а значить, і середня кінетична енергія молекул. Тому тиск зростає з двох причин. 38. Ні. 39. Труднощі, пов'язані з проблемою зрідження гелію і водню, викликані їх дуже низькою критичною температурою. 40. Під час підвищення температури. 41. У той час, коли температура повітря найнижча (звичайно, близько 5 години ранку). 42. 73 %; 48. 43. Роса не випаде. 44. 9,5 °С. 45. Буде конденсуватися. 46. 208 г. 47. Взимку існує велика різниця температур повітря на вулиці і в приміщенні за приблизно однакової абсолютної вологості повітря. Тому відносна вологість повітря в приміщенні значно нижча, ніж на вулиці. Влітку ж такої різниці температур не існує. 48. Абсолютна вологість повітря над річкою більша, ніж над землею. 49. Ні. 50. Температура кипіння в каструлі-швидковарці значно вища за 100 С, оскільки в ній за допомогою клапанів підтримують високий тиск насиченої пари. Висока температура і прискорює приготування їжі. 51. У таких термометрів простір капіляра над ртуттю заповнюється азотом під великим тиском, що призводить до значного підвищення температури кипіння. 52. $1572 \cdot 10^3$ Дж. 53. « $2,6 \cdot 10^7$ Дж. 54. $2,45 \cdot 10^{12}$ Н/м. 55. 0,074 Н/м. 56. 0,063 Н/м; « 1,5 см. 57. 0,47 Н/м.

РА

РА

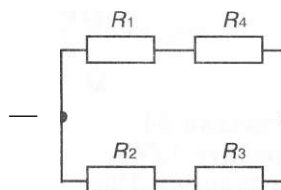
Мал. 224



Мал. 225

58. $8,4 \cdot 10^8$ Дж. 59. 4,6 см.
 60. $55 \cdot 10^6$ Па; $0,6 \text{ м/с}^2$. 61. 37 см^2
 62. $6 \cdot 10^5$ Дж. 63. $1,5 \cdot 10^{20}$.
 64. 600 Дж. 65. 300 Дж. 66. 100 Дж.
 67. 10^{-4} Дж. 68. а) Ні; б) так. 69. Ні.
 70. Можна. 71. Може, якщо енергія, набута газом шляхом теплообміну, настільки перевищує енергію, яку віддає газ під час виконання роботи, що забезпечується зростання температури і тиску газу. 72. Ні. 73. Необхідно, щоб процеси відбувалися без теплообміну з навколишнім середовищем і без виконання роботи у разі зміни об'єму.
 74. Внутрішня енергія і тиск підвищуються. 75. Над газом виконується робота. 76. Ні. 77. У разі ізобарного розширення, оскільки за всіх значень об'ємів від V_1 до V_2 (мал. 225) тиск при цьому процесі більший, ніж за ізотермічного, і площа, обмежена ізобарою, більша. 78. 10^3 м/с . 79. $32 \cdot 10^3$ Дж. 80. Процеси 1—2 і 4—1 відбувалися з поглинанням теплоти, 2—3 і 3—4 з тепловіддачею. 81. $2 \cdot 10^6$ Дж; газ нагрівся. 82. 58 %. 83. 330 К. 84. 170 кВт; 73 кВт. 85. 1500 К. 86. 2д. 87. До електроскопа необхідно піднести паличку, наелектризовану позитивним або негативним зарядом, і за розходженням листочків електроскопа визначити знак його заряду. 88. 10 Кл. 89. $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ Кл. 90. $\ll 3 \cdot 10^9$. 91. $\sim 0,225$ Н. 92. $\cdot 8 \cdot 10^{-6}$ Кл/кг. 93. $\ll 7,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. 94. 2. 95. $\ll 28,3 \text{ см}$. 96. $\ll 0,92 \cdot 10^7$ Н. 97. $\cdot 0,83 \cdot 10^{-2}$ м. 98. $\ll 1,28 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. 99. $1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. 100. $1,2 \cdot 10^{-6}$ Н. 101. 90 Н/Кл; $2,5 \cdot 10^{-5}$ Кл. 102. 200 В/м. 103. 8100 В/м. 104. 0,02 м. 105. $\ll 1,35 \cdot 10^4$ В/м. 106. $\gg 1,6 \cdot 10^5$ В/м. 107. 90 В/м. 108. $\gg 0$. 109. $\ll 5 \cdot 10^9$. 110. $1,2 \cdot 10^9$ В. 111. Рухаються за хмарою; $8 \cdot 10^3$ В/м. 112. Ні; $12 \cdot 10^6$ В. 113. 5 Дж. 114. 2 В. 115. 5000 В/м. 116. 9 В. 117. $8 \cdot 10^2$ м. 118. $0,2 \cdot 10^{-9}$ Кл. 119. Підймальний кран — провідник, який являє собою в електричному полі Землі екіпотенціальну поверхню. Тому напруга між двома будь-якими точками крана дорівнює нулю. 120. $\ll 1$ В. 121. 2 В. 122. 30 Дж. 123. $4,8 \cdot 10^{-9}$ Кл. 124. $5,3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$. 125. $4 \cdot 10^{-3}$ Кл. 126. 2,5 Дж. 127. 40 В; зменшити в 3,2 рази. 128. $\ll 3 \cdot 10^{10}$ Ф; $\cdot 6,1 \cdot 10^8$ Кл; $\cdot 6,1 \cdot 10^{-6}$ Дж, 129. 2000 В зменшиться в 2 рази. 130. 25. 131. 1,5. 132. У разі перевищення цих напруг відбудеться пробій діелектрика. 133. $3 \cdot 10^2$ Кл; 3 Дж. 134. «Удар» може бути викликаний розрядним струмом конденсатора. Після розмикання кола конденсатори треба розрядити провідним стержнем.

135. 22,5 кВт. 136. 170 В. 137. 100 А;
 50 В; 400 А. 138. 16 В. 139. 10 Ом.
 140. 1,5 В; 1 Ом. 141. 9 В; 30 Ом.
 142. 20 В. 143. Почне зменшуватися.
 144. 5 В; 0,5 А. 145. 1,5 А; 2 А.
 146. 1 А. 147. 2 Ом; 5 А. 148. Резистори
 треба з'єднати за схемою, наведеною
 на малюнку 226. 149. З'єднати резис-



Мал. 226

тори послідовно і виміряти напруги на них. З'єднати резистори паралельно і виміряти сили струму, які проходять через них. 150. Увімкнути шунт опором $2 \cdot 10^{-3}$ Ом. 151. 0,11 Ом. 152. З'єднати вольтметри послідовно і увімкнути їх паралельно до кола. 153. Увімкнути додатковий опір 6000 Ом; у 4 рази. 154. 45 000 Ом." 155. 30 Ом. 156. 3,85 кВт; 8,8 Ом. 157. 0,25 Ом; 4,25 В; 55,7 В. 158. При послідовному з'єднанні на кожен двигун припадає половина напруги, а при паралельному — кожен двигун працює в нормальному режимі. В цьому випадку потужність буде більшою, трамвай може розвинути більшу швидкість. 159. $3,3 \cdot 10^3$ В. 160. 1,92 Н; 0,96 Н; 0. 161. 6 А. 162. 9000 Н. 163. $1,4 \cdot 10^3$ Н. 164. 0,15 Н-м. 165. 0,05 Н-м. 166. 10,4 А. 167. $2,4 \cdot 10^8$ Н. 168. Зменшиться у 8 раз. 169. Зменшиться в три рази. 170. $1,6 \cdot 10^{19}$ Кл. 171. $5 \cdot 10^5$ м/с. 172. $7,8 \cdot 10^4$ м; $1,5 \cdot 10^9$ м. 173. 74 °С. 174. Недовантаження (50 °С). 175. 1,5 Ом; 0,06 Вт. 176. 25 см². 177. Енергія електронів менша за роботу виходу їх з металу. 178. $1,02 \cdot 10^7$ м/с; $4,2 \cdot 10^{15}$ м/с²; $2,35 \cdot 10^9$ с. 179. 311 г; 500 м²; 200 кВт; 4800 кВт·год. 180. $\gg 0,32 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл. 181. У звичайних умовах повітря — ізолятор. 182. Можливий. Йонізатором можуть бути швидкі космічні частинки; частинки, випромінювані радіоактивною речовиною, яка знаходиться в Землі, тощо. 183. Тліючий. Електричний струм, проходячи крізь газову суміш (пара ртуті і аргон), викликає випромінювання пари ртуті (видиме й ультрафіолетове). Під дією ультрафіолетового випромінювання світиться люмінофор (спеціальна речовина), яким покриті стінки лампи. 184. Дуговий розряд зумовлений термоелектричною емісією з катода, а іскровий розряд — йонізацією повітря в сильному електричному полі. 185. У разі збільшення діаметра проводу зменшується напруженість електричного поля, що призводить до зменшення інтенсивності йонізації повітря.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- А
- Автоклав 54
Адіабата 127
Азотування 12
Амперметр 188
Анізотропія 75
Атомна маса відносна 18
Атомна одиниця маси (а.о.м.) 18
- Б
- База 251
Броунівський рух 6, 10
- В
- Вебер (одиниця магнітного потоку) 211
Взаємодії магнітні 199
Видовження відносне 81
Випаровування 46
«Вічний» двигун другого роду 124
 першого роду 113
Вологість повітря абсолютна 55
 відносна 56
Вольт 164
Вольтамперна характеристика газового розряду 269
 лампового діода 257
 напівпровідникового діода 250
 провідника 186
Вольтметр 191
- Г
- Газ ідеальний 24
Гармата електронна 258
Гальванопластика 267
Гальваностегія 267
Гігрометр 58
Гістерезис 225
Гучномовець 217
- Д
- Двигун внутрішнього згоряння 131
 дизельний 133
 — постійного струму 213
 повітряно-реактивний 135
 — турбогвинтовий 136
 — турбокомпресорний 135
Детандер 51
Деформація
 — згину 84
 — зсуву 83
 — кручення 85
 — пластична 81, 86
 — пружна 81
 — розтягу (стиску) 80
Джерело струму 186, 194
Диполь 176
Дисоціація електролітична 260
Дифузія 6, 8
Діаграма розтягу 85
Діамагнетик 222
Діелектрик 167, 241
 — неполярний 177
 — полярний 176
Діод 255
 — напівпровідниковий 250
«Дірка» 242
Домішки акцепторні 244
 — донорні 244
Дослід Міллікена 156
- Е
- Еквівалент електрохімічний 263
Електрет 180
Електроємність 166
Електродинаміка 139
Електроліз 260
Електрометалургія 266
Електрометр 142
Електронно-променева трубка 258

- Електрон провідності 231
 Електрорушійна сила 194
 Електроскоп 142
 Емісія автоелектронна 254
 — вторинна електронна 254
 — електронів 254
 — термоелектронна 254
 Емітер 251
 Енергія внутрішня 100
 — електричного поля 173
 — йонізації 240
 Ерозія електрична 273
- л
- Жорсткість 80
- з
- Закон Бойля—Маріотта 39
 — Гей-Люссака 40
 — Гука 80
 — збереження електричного заряду 145
 енергії 100
 — Кулона 145
 — Ома 186, 195
 — Фарадея (для електролізу) 263
 — Шарля 41
 Запис магнітний 226
 Заряд електричний
 негативний 141
 позитивний 141
 З'єднання провідників
 паралельне 189
 послідовне 187
 Змочування 68
 Зрідження газів 50
 Зріз 84
- І
- Изобара 40
 Изопроцес 39
 Изотерма 39
 — пари і рідини 48
 Изохора 41
 Індукція електро-
 статична 158
- магнітного поля 208
- Й
- Йонізатор 268
 Йонізація газу 268
 ударна 269
- К
- Кельвін 26
 Кипіння 46, 53
 Кількість речовини 19
 — теплоти 102
 Коефіцієнт безпеки 87
 — дисоціації 261
 — корисної дії 128
 — опору температурний 234
 Колектор 213
 — транзистора 251
 Конденсатор 166
 — електролітичний 171
 — змінної ємності 171
 — керамічний 171
 — паперовий 170
 — плоский 167
 — слюдяний 171
 Конденсація пари 46
 Контакт тепловий 25
 Контур зі струмом 212
 Кристали атомні 78
 — йонні 78
 — металічні 79
 — молекулярні 79
 — рідкі 91
 Кріобіологія 53
 Кулон 147
- Л
- Лампа двохелектродна 255
 Лінії магнітної індукції 208
 — напруженості
 електричного поля 154
 - силові магнітного поля 203
- М
- Маса атомна відносна 18
 — молекули 17
 — молекулярна відносна 18

— молярна 20
Матеріали крихкі 86
— магнітожорсткі 225
— магнітом'які 225
— пластичні 86
Машина тепла 125
Межа міцності 86
— пропорційності 85
— пружності 86
— текучості 86
Меніск опуклий 70
— увігнутий 70
Металізація дифузійна 12
Метод статистичний 3
— термодинамічний 4
Міцність 73, 87
Модуль пружності (модуль Юнга) 82
Молізація 261
Моль 19
Момент обертальний 212, 214
— протидіючий 215
Монокристал 74

Н

Надпровідність 236
Наклепування 86
Намагніченість насичення 224
Напівпровідник 238
Напруга електрична
— механічна 81
— насичення 257
Напруженість електричного поля 151
Незмочування 68
Нуль абсолютний температури 26

О

Обробка поверхнева термохімічна 12
Опір
— внутрішній 195
— питомий 234
Осмо́с 9
Осцилограф електронний 259

П

Паливо умовне 107
Пара насичена 47
— ненасичена 47
Парамагнетик 222
Перехід електронно-дірковий (р—п-перехід) 249
Плазма 275
Пластичність 89
Поле електричне 149
— однорідне 155
— магнітне 200
Полікристал 75
Потенціал поля 163
Потік магнітний 210
Правило лівої руки 205
Принцип суперпозиції полів 153
Поляризація діелектрика 177
Провідність діркова 242
— домішкова 243
— електронна 244
Проникність діелектрична 147
— магнітна 221
Процес адіабатний 120
— ізобарний 39
— ізотермічний 39
— ізохорний 41
— круговий (цикл) 125
— необоротний 123
— оборотний 123
— термодинамічний 99
Психрометр 59

Р

Рафінування металів 266
Рекомбінація 261, 268
Речовини поверхнево-активні 67
Решітка кристалічна 76
Рівновага динамічна рідини і пари 47
Рівняння Клапейрона 37
— основне кінетичної теорії газів 34
— стану ідеального газу 35

- теплового балансу 108
 - Різниця потенціалів 163
 - Робота виходу 254
 - сил електричного поля 160
 - Розряд газовий 268
 - дуговий 274
 - іскровий 272
 - коронний 273
 - несамостійний 268
 - самостійний 270
 - тліючий 271
 - Ротор 214
- С
- Сегнетоелектрик 179
 - Сила Ампера 207
 - коерцетивна 225
 - Лоренца 218
 - поверхневого натягу 65
 - пружності 80
 - стороння 186
 - струму насичення діода 257
 - Система термодинамічна
 - ізолювана 100
 - Спад напруги 187
 - Стала Авогадро 20
 - Больцмана 28
 - електрична 148
 - молярна газова 36
 - Фарадея 264
 - Стан речовини критичний 49
 - Статор 214
 - Струм дірковий 242
 - електричний 185
 - електронний 242
 - насичення 257, 269
- Т
- Текучість 63
 - Температура 24
 - критична 49
 - криогенна 52
 - Кюрі 226
 - Теплоємність питома 103
 - згоряння 107
 - питома пароутворення 106
 - — плавлення 104
- Терези крутильні 146
 - Термодинаміка 4, 99
 - , другий закон 124
 - , перший закон (перше начало) 112
 - Термометр 25
 - опору 235
 - Терморезистор (термістор) 245
 - Тесла 209
 - Тиск ідеального газу 30
 - Тіло аморфне 73
 - кристалічне 73
 - Тороїд 220
 - Точка роси 58
 - Тріод (напівпровідниковий транзистор) 251
 - Трубка електронно-променева 258
 - Турбіна активної дії 133
 - газова 134
 - реактивної дії 134
 - Турбодетандер 52
- Ф
- Фарад 166
 - Феромагнетик 224
 - Фізика статистична 3
 - Флотація 69
 - Фотоємність 254
 - Фоторезистор (фотоопір) 246
 - Фреон 61
- Х
- Холодильник 61
- Ц
- Цементация 12
 - Цикл Карно 127
 - Ціанування 12
- Ш
- Шкала абсолютна температурна 26
 - Шкала Кельвіна 26
 - Шунт 191
- Я
- Явища капілярні 71

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

- Авогадро А. 20
Ампер А. 207
Арістотель 7
Бардін Дж. 238
Боголюбов М. М. 238
Бойль Р. 7, 39
Больцман Л. 28, 29
Броун Р. 10
Гассенді П. 7
Гей-Люссак Ж. 40
Демокріт 7
Камерлінг-Оннес Г. 236
Капіца П. Л. 52
Карно С. 126
Кельвін (Томсон) У. 26
Клапейрон Б. 37
Кулон П. 145
Купер А. 238
Лоренц Г. 218
Маріотт Е. 39
Міллікен Р. 156
Ньютон І. 7
Ом Г. 186
Перрен Ж. 7
Релей Д. 17
Рентген В. 17
Тесла Н. 209
Фарадей М. 51, 166, 263
Цельсій А. 25
Шарль Ж. 41
Шріффер Дж. 238
Штерн О. 21

ЗМІСТ

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ

§ 1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії	5
§ 2. Дослідне обґрунтування молекулярно-кінетичної теорії	8
§ 3. Молекулярні явища в техніці і природі	11
§ 4. Сили взаємодії між молекулами	13
§ 5. Маса і розміри молекул	17
<i>Вправа 1.</i>	21
§ 6. Швидкість руху молекул газу	21
§ 7. Ідеальний газ. Температура та її вимірювання	24
§ 8. Пояснення температури і тиску газу на основі молекулярних уявлень	26
§ 9. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів	30
<i>Вправа 2.</i>	35
§ 10. Рівняння стану газу (рівняння Клапейрона)	35
<i>Вправа 3.</i>	38
§ 11. Ізопроееси в газах	38
<i>Вправа 4.</i>	43
§ 12. Застосування стиснутих і розріджених газів у техніці	44
§ 13. Насичена і ненасичена пара	45
§ 14. Критична температура	48
§ 15. Зрідження газів	50
§ 16. Кипіння. Залежність температури кипіння від тиску	53
§ 17. Вологість повітря	55
<i>Вправа 5.</i>	61

§ 18. Принцип роботи холодильника	61
§ 19. Особливості рідкого стану речовини	63
§ 20. Властивості поверхні рідини.	
Поверхневий натяг.	64
<i>Вправа 6.</i>	67
§ 21. Явища змочування і незмочування	68
§ 22. Капілярні явища	70
<i>Вправа 7.</i>	72
§ 23. Кристалічні й аморфні тверді тіла. Внутрішня будова кристалів.	73
§ 24. Типи кристалів	78
§ 25. Деформація твердих тіл	79
<i>Вправа 8.</i>	82
§ 26. Види деформацій	83
§ 27. Механічні властивості твердих тіл.	
Діаграма розтягу.	85
<i>Вправа 9.</i>	88
§ 28. Аморфні речовини та їх властивості	88
§ 29. Рідкі кристали	91
§ 30. Створення матеріалів із наперед заданими технічними властивостями	93
<i>Висновки.</i>	96

РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

§ 31. Внутрішня енергія	100
§ 32. Зміна внутрішньої енергії тіла під час тепло- передачі (в процесі нагрівання й охолодження, плавлення й тверднення).	102
<i>Вправа 10.</i>	105
§ 33. Зміна внутрішньої енергії тіла під час тепло- передачі (в процесі пароутворення, конденсації і згоряння палива)	106
<i>Вправа 11.</i>	108
§ 34. Зміна внутрішньої енергії тіла під час виконання роботи.	109
<i>Вправа 12.</i>	111
§ 35. Перший закон термодинаміки	112
§ 36. Робота під час розширення газу	114
<i>Вправа 13.</i>	116
§ 37. Застосування першого закону термодинаміки до ідеального газу. Адіабатний процес	117
<i>Вправа 14.</i>	122
§ 38. Необоротність теплових процесів	122
§ 39. Принцип дії теплової машини	125
<i>Вправа 15.</i>	130

§ 40. Деякі теплові машини	131
§ 41. Застосування теплових машин і проблеми охорони навколишнього середовища	136
<i>Висновки</i>	137

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

§ 42. Електризація тіл. Електричні заряди	141
§ 43. Закон збереження електричного заряду	144
§ 44. Закон Кулона	145
<i>Вправа 16</i>	149
§ 45. Електричне поле. Напруженість електричного поля	149
<i>Вправа 17</i>	153
§ 46. Лінії напруженості електричного поля	154
§ 47. Дослід Міллікена	155
§ 48. Провідники в електричному полі	158
§ 49. Робота електричного поля під час переміщення заряду	160
§ 50. Потенціал і різниця потенціалів	162
§ 51. Зв'язок між напругою і напруженістю однорідного поля	164
§ 52. Електроємність	165
§ 53. Конденсатор	166
<i>Вправа 18</i>	170
§ 54. Види конденсаторів	170
§ 55. Енергія електричного поля	173
<i>Вправа 19</i>	175
§ 56. Діелектрики в електричному полі. Діелектрична проникність	175
§ 57. Сегнетоелектрики і електрети	179
§ 58. Електризація на виробництві і в побуті	180
<i>Висновки</i>	183

РОЗДІЛ 4. ЗАКОНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

§ 59. Умови існування електричного струму	185
§ 60. Закон Ома для ділянки кола з послідовним і паралельним з'єднанням провідників	186
<i>Вправа 20</i>	192
§ 61. Електрорушійна сила	192
§ 62. Закон Ома для повного кола	195
<i>Вправа 21</i>	197
<i>Висновки</i>	197

РОЗДІЛ 5. МАГНІТНЕ ПОЛЕ

§ 63. Взаємодія електричних струмів	199
§ 64. Магнітне поле струму	201
§ 65. Сила Ампера	204
§ 66. Магнітна індукція	207
<i>Вправа 22.</i>	209
§ 67. Магнітний потік	210
§ 68. Замкнутий контур у магнітному полі. Двигун постійного струму.	211
§ 69. Принцип дії електровимірювальних приладів	214
§ 70. Гучномовець	217
§ 71. Дія магнітного поля на рухомі заряджені частинки. Сила Лоренца	218
<i>Вправа 23.</i>	220
§ 72. Магнітні властивості речовини	220
§ 73. Феромагнетики	223
§ 74. Магнітне записування і збереження інформації.	226
<i>Висновки.</i>	229

**РОЗДІЛ 6. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ
У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

§ 75. Основні положення електронної теорії провідності металів	230
<i>Вправа 24.</i>	233
§ 76. Залежність опору металевих провідників від температури	233
<i>Вправа 25.</i>	236
§ 77. Надпровідність	236
§ 78. Електричний струм у напівпровідниках	238
§ 79. Властивості напівпровідників	240
§ 80. Власна провідність напівпровідників	241
§ 81. Домішкова електропровідність напівпровідників	243
§ 82. Термо- і фоторезистор	245
§ 83. Електронно-дірковий перехід. Напівпровідниковий діод	248
§ 84. Транзистор	251
§ 85. Електричний струм у вакуумі. Електронна емісія	253
§ 86. Двохелектродна лампа	254
§ 87. Електронно-променева трубка	258
§ 88. Електричний струм у розчинах і розплавах електролітів	260
§ 89. Закони електролізу	262
<i>Вправа 26.</i>	265
§ 90. Застосування електролізу	266

§ 91. Електричний струм у газах	267
§ 92. Самостійний електричний розряд у газах. Види розрядів	270
§ 93. Поняття про плазму	275
<i>Висновки</i>	277
Лабораторні роботи	280
Задачі для повторення	288
Відповіді до вправ	304
Відповіді до задач для повторення	305
Предметний покажчик	310
Іменний покажчик	314

Навчальне видання

ГОНЧАРЕНКО Семен Устимович

ФІЗИКА

Підручник для 10 класу
середньої загальноосвітньої школи

Затверджено Міністерством освіти І науки України

Відповідальна за випуск *Є. М. Коденко*

Редактор *В. Р. Голуб*

Художник обкладинки *О. Я. Остапов*

Художній редактор *І. П. Васильєва*

Технічний редактор *Г. Г. Саливон*

Коректори *Р. І. Борисенко, Л. В. Липницька*

**Здано до набору 21.03.02. Підписано до друку 24.09.02.
Формат 60x90/16. Папір офс. Гарнітура Шкільна. Друк офс.
Ум. друк. арк. 20. Ум. фарбовідб. 41,0. Обл.-вид. арк. 18,23.
Тираж 400 000 пр. (2-й завод 100 001—200 000 пр.).
Вид. № 36780. Зам. № 2—325.**

Набір та верстка комп'ютерного центру видавництва «Освіта»

**Видавництво «Освіта», 04053, Київ, Ю. Коцюбинського, 5.
Свідоцтво ДК № 27 від 31.03.2000 р.**

**Виготовлено в ЗАТ «Київська книжкова фабрика»
01054, Київ, вул. Воровського, 24
Свідоцтво ДК № 787 від 28.01.2002 р.**



Видавництво «Освіта»

сгвфїо^пїдру'їніи
НОВОГО ПОКОЛІННЯ –
цікаві, уобрз ігїмсгровонї,
методично вивїренї
МИ ПРОПОНУЄМО

- підручники
- навчальні посібники
- робочі зошити
- « хрестоматїї
- методичні посібники
- дидактичні матеріали
- довідники
- словники
- енциклопедичні видання для школярїв
- посїбники для дошкїльних закладїв
- розвивальну лїтературу

їз Вн 966 04-0389-



789660 403895 >