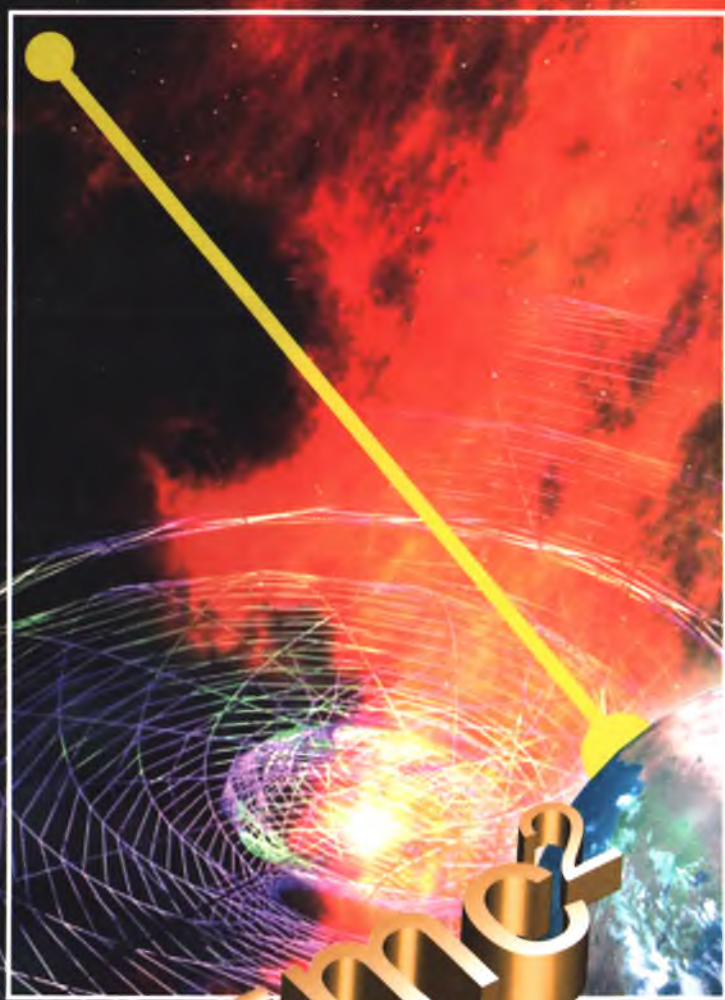


В. Ф. Дмитрієва

Фізика



Фізика

В. Ф. Дмитрієва

Фізика

*Рекомендовано Міністерством освіти
і науки України як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів
I–II рівнів акредитації*

НБ ПНУС



758322

Київ
“Техніка”
2008

ББК 22.3я 723
Д 53
УДК 53(07)

Гриф надано Міністерством
освіти і науки України,
лист №1.4/18-Г-1248 від 01.12.2006 р.

ПЕРЕДМОВА

Сучасна фізика має фундаментальне значення для теорії пізнання, формування наукового світогляду, розуміння будови і властивостей навколишнього світу.

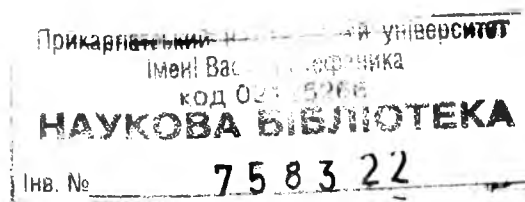
Фізика глибоко впливає на розвиток інших наук і різних галузей техніки. Завдання економічного і соціального розвитку мають розв'язувати люди, озброєні сучасними знаннями, тому у відповідних розділах і темах курсу наведено завдання і перспективи розвитку науки і техніки.

У посібнику роз'яснюється зміст фізичних законів, понять і явищ, які розкривають фізичну картину світу в усій його різноманітності. При викладі матеріалу розглянуто основні етапи складного історичного розвитку сучасної фізики.

Наприкінці кожної глави наведено короткі висновки з викладеного матеріалу, запитання для самоконтролю і повторення. Поряд з теоретичним матеріалом у книзі подано задачі з розв'язаннями та для самостійної роботи, що дає можливість уникнути формального застосування навчального матеріалу і навчити застосовувати його для розв'язання практичних завдань. Щоб полегшити роботу з посібником, матеріал параграфів там, де це доцільно, поділено на невеликі частини.

Рецензенти: М. В. Головка, канд. пед. наук; І. Т. Горбачук, канд. фіз.-мат. наук;
Т. М. Вечера; О. І. Бабинюк

Навчальний посібник містить матеріал в обсязі курсу фізики, що вивчається студентами вищих навчальних закладів I–II рівнів акредитації, а також розбір і розв'язування типових задач. Задачі є розвиванням і доповненням основного тексту. В кінці кожної глави подано короткі висновки та запитання для самоконтролю і повторення.



ВСТУП

Фізика – наука про природу

Найвидатніший учений стародавніх часів Арістотель (384–322 рр. до н. е.) у зміст слова “фізика” (від грец. – природа) вкладав усю сукупність відомостей про природу, все, що було відомо про земні і небесні явища. В російську мову термін “фізика” запровадив великий учений-енциклопедист, основоположник матеріалістичної філософії в Росії М. В. Ломоносов (1711–1765).

Довгий час фізику називали натуральною філософією (філософією природи), і вона фактично зливалася з природознавством. З нагромадженням експериментального матеріалу, його науковим узагальненням і розвитком методів дослідження з натуральної філософії як загального вчення про природу виділились астрономія, хімія, фізика, біологія та інші науки. З цього випливає, що різку межу між фізикою та іншими природничими науками встановити дуже важко, і цим зумовлений органічний зв'язок фізики з іншими природничими науками.

Процес тривалого вивчення явищ природи спонукав учених до ідеї про матеріальність навколишнього світу. Матерія включає в себе все, що оточує нас, і нас самих. Вчення про будову матерії – одне з центральних у фізиці. Воно охоплює два відомі фізиці види матерії: речовину і поле. Усяка зміна, що відбувається в навколишньому світі, є рухом матерії. Рух – це форма існування матерії.

Усі матеріальні об'єкти (тіла) не залишаються незмінними. З часом змінюються їх взаємне положення, форма, розміри, агрегатний стан, фізичні і хімічні властивості і т. д.

Рух об'єднує в собі всі зміни і процеси, які відбуваються у Всесвіті, починаючи з простого переміщення і закінчуючи мисленням. Фізика вивчає найзагальніші форми руху матерії та їх взаємні перетворення, такі, як механічна, молекулярно-теплова, електромагнітна, атомна і ядерна. Такий поділ на форми руху умовний, проте фізика в процесі вивчення звичайно має саме такі розділи.

Матерія існує у просторі і в часі.

Простір визначає взаємне розміщення об'єктів (які одночасно існують) один відносно одного і їх відносну величину (відстань і орієнтацію).

* Відомо, що матерія існує не тільки у вигляді фізичних тіл, а й у вигляді полів, наприклад електромагнітного, гравітаційного.

Усі явища природи відбуваються в певній послідовності і мають скінченну тривалість. *Час* визначає послідовність явищ природи і їх відносну тривалість. Отже, простір і час не існують самі собою, у відриві від матерії, і матерія не існує поза простором і часом.

Загальною мірою різних форм руху матерії є енергія. Якісно різні фізичні форми руху матерії здатні перетворюватись одні в одних, але саму матерію не можна знищити і створити. До такого висновку дійшли ще античні філософи-матеріалісти. Отже,

фізика – наука, яка вивчає найпростіші і водночас найзагальніші закономірності явищ природи, властивості і будову матерії та закони її руху.

Фізика – основа природознавства. Вона належить до точних наук і вивчає кількісні закономірності явищ. Фізика – наука експериментальна, її закони базуються на фактах, встановлених дослідним шляхом. Факти залишаються, а їх пояснення іноді змінюється з історичним розвитком науки, в процесі дедалі глибшого розуміння основних законів природи.

Поняття про фізичну картину світу

З нагромадженням експериментальних даних поступово вимальовувалась і формувалась велична і складна картина навколишнього світу в цілому.

Наукові пошуки і дослідження, проведені протягом багатьох століть, дали можливість І. Ньютону (1643 – 1727) відкрити і сформулювати фундаментальні закони механіки – науки про механічний рух матеріальних тіл і взаємодії між ними, які при цьому відбуваються. На той час закони Ньютона були такими всеохопними, що лягли в основу побудови так званої *механічної картини світу*, за якою всі тіла мають складатися з абсолютно твердих частинок, що перебувають у безперервному русі. Тіла взаємодіють між собою за допомогою сил тяжіння (гравітаційних сил). Усе розмаїття навколишнього світу, за Ньютоном, полягало у відмінності руху частинок.

Механічна картина світу панувала доти, поки Дж. Максвелл (1873) не сформулював рівняння, які описують основні закономірності електромагнітних явищ. Ці закономірності не можна було пояснити з точки зору механіки Ньютона. На відміну від класичної механіки, де припускається, що тіла взаємодіють миттю (теорія далекодії), теорія Максвелла твердила, що взаємодія відбувається із скінченною швидкістю, яка дорівнює швидкості світла у вакуумі, за допомогою електромагнітного поля (теорія близькодії). Створення спеціальної теорії відносності – нового вчення про простір і час – дало можливість повністю обґрунтувати електромагнітну теорію.

До складу всіх без винятку атомів входять електрично заряджені частинки. За допомогою електромагнітної теорії можна пояснити природу

сил, які діють усередині атомів, молекул і макроскопічних тіл. Це положення покладено в основу створення *електромагнітної картини світу*, за якою всі явища, що відбуваються в навколишньому світі, намагалися пояснити за допомогою законів електродинаміки. Проте пояснити будову і рух матерії тільки електромагнітними взаємодіями не вдалося.

Дальший розвиток фізики показав, що, крім гравітаційної і електромагнітної, є й інші типи взаємодій. Перша половина ХХ ст. позначилась інтенсивними дослідженнями будови електронних оболонок атомів і тих закономірностей, які керують рухом електронів у атомі. Це спричинило виникнення нової галузі фізики – квантової механіки. У квантовій механіці використано поняття *дуалізму*: рухома матерія є водночас і речовиною, і полем, тобто має одночасно корпускулярні і хвильові властивості. У класичній фізиці матерія – завжди або сукупність частинок, або потік хвиль.

Розвиток ядерної фізики, відкриття елементарних частинок, дослідження їхніх властивостей і взаємоперетворень зумовили встановлення ще двох типів взаємодій, які назвали *сильними* і *слабкими*. Отже, сучасною фізичною картиною світу передбачено чотири типи взаємодії: сильна (ядерна), електромагнітна, слабка і гравітаційна. Сильна взаємодія забезпечує зв'язок нуклонів у ядрі. Слабка взаємодія проявляється в основному під час розпаду елементарних частинок. Отже, вчення про будову матерії тепер є атомістичним, квантовим, релятивістським. У ньому застосовують статистичні уявлення.

Фізика і техніка

Техніка – вся сукупність засобів і пристроїв, створених людиною, яка сприяє вищій продуктивності праці, – ґрунтується на науці.

Техніка спирається на фундаментальні відкриття всіх наук, зокрема природознавства. Коли фізики відкривали яке-небудь явище і могли керувати ним, відразу ж з'являлися спеціалісти, які мали на практиці застосовувати набуті відомості. Так виникли окремі галузі техніки (тепло, електро- і радіотехніка, електроніка, ядерна техніка тощо).

Найбухливіший прогрес техніки, пов'язаний з розвитком фізики, відбувається з кінця ХVІІІ ст., коли на алтайських заводах геніальний російський механік І.І. Ползунов (1728–1766) збудував пареоатмосферну машину безперервної дії. Універсальний паровий двигун створив англійський винахідник Дж. Уатт (1736–1819). Парові машини працювали на багатьох заводах і фабриках, надавали руху колесам пароплавів, створювались перші паровози. Настала епоха пари. З фізики виділилась нова наука – термодинаміка.

Кінець ХІХ і початок ХХ ст. були ознаменовані безліччю відкриттів у галузі вивчення електромагнітних явищ. Велике значення для розвитку техніки мало відкриття італійськими вченими Л. Гальвані (1737–1798) і

А. Вольтою (1745–1827) електричного струму і створення гальванічних батарей. В. В. Петров (1761–1834) відкрив і дослідив електричну дугу. У 1889 р. німецький фізик Г. Р. Герц (1857–1894) експериментально виявив електромагнітні хвилі, а в 1895 р. О. С. Попов (1859–1906) вперше використав електромагнітні хвилі для бездротового зв'язку. Настав час електрики. З фізики виділились електро- і радіотехніка, інші науки.

З другої чверті ХХ ст. відбувається даліше революційне перетворення фізики, пов'язане з пізнанням структури атомного ядра і процесів, які відбуваються в ньому. Важливим результатом цього етапу було відкриття поділу атомного ядра. У 1939 – 1945 рр. уперше вивільнено ядерну енергію за допомогою ланцюгової реакції поділу ^{235}U . У 1954 р. в СРСР почала діяти перша атомна електростанція (м. Обнінськ). У 1952 р. здійснено реакцію термоядерного синтезу. Створено атомні криголами і підводні човни, дають струм атомні електростанції. Тому ХХ ст. називають атомним, але це століття називають і космічним.

Під керівництвом С. П. Корольова (1907–1966) 4 жовтня 1957 р. в колишньому СРСР було виведено на орбіту перший штучний супутник Землі, а 12 квітня 1961 р. Ю. О. Гагарін на кораблі “Восток” здійснив перший у світі космічний політ. Почалася епоха освоєння космосу, людина вийшла за межі Землі.

Теорії і методи фізики значною мірою використовують в астрономії, хімії, біології, геології та інших природничих науках. Теорія відносності і квантова механіка пояснили ряд явищ у Всесвіті. Метод мічених атомів застосовують для вивчення хімічних реакцій. Молекулярна і атомна фізика входять до різних галузей біологічної науки. Досягнення фізики широко використовують у радіоелектроніці, ядерній енергетиці, ракетній і напівпровідниковій техніці, автоматичній і телемеханіці, обчислювальній і контрольно-вимірювальній техніці.

Фізичні поняття – найпростіші та водночас основоположні і загальні в природознавстві (простір, час, рух, маса, робота, енергія тощо). Фізичні закони (такі, наприклад, як закони збереження енергії), висновки, наслідки з фізичних теорій мають глибокий філософський зміст.

Одиниці фізичних величин

Одиницю будь-якої фізичної величини, взагалі кажучи, можна встановити довільно. Але якщо одиниці всіх фізичних величин установити незалежно одну від одної, то до формул, які пов'язують різні фізичні величини, треба вводити багато перевірних коефіцієнтів, що ускладнить як самі формули, так і обчислення. К. Гаусс показав, що для побудови системи одиниць фізичних величин досить узяти кілька незалежних одна

від одної одиниць. Ці одиниці називають *основними*. Одиниці фізичних величин, які визначають, користуючись рівняннями, за допомогою основних одиниць, називають *похідними*.

Сукупність основних і похідних одиниць називають системою одиниць.

При виборі основних одиниць треба враховувати таке.

1. Визначення основних теоретичних одиниць мають охоплювати фізичний зміст кожної з них, не допускаючи різних тлумачень.

2. Основні теоретичні одиниці мають бути встановлені так, щоб можна було з великою точністю виготовити еталони і взірцеві практичні міри.

Залежно від того, які фізичні величини взято за основні і які одиниці встановлено для їх вимірювання, можна утворити ті чи інші системи одиниць.

Багато держав, виходячи з одиниць, які історично склалися в них, створили свої системи одиниць, що призвело до серйозних утруднень у міжнародній торгівлі, обміні новинами в галузі науки і техніки.

Питання про створення універсальної системи одиниць обговорювалось на IX (1948), X (1954), XI (жовтень 1960) Генеральних конференціях з мір і ваги (ГКМВ). На XI ГКМВ було прийнято рішення про встановлення для міжнародних зносин практичної системи одиниць, яка дістала скорочене міжнародне найменування SI, в російській транскрипції СИ, в українській – СІ. Цю систему було уточнено на наступних XII–XV ГКМВ.

Міжнародна система одиниць складається з 7 основних одиниць, 2 додаткових і великої кількості похідних одиниць.

За основні взято такі одиниці.

Метр – довжина шляху, що проходить світло у вакуумі за 1/299 792 458 с.

Кілограм – одиниця маси – дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма.

Секунда – час, який дорівнює 9 192 631 770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133.

Ампер – сила незмінюваного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і дуже малої площі поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинив би на кожній ділянці провідника 1 м завдовжки силу взаємодії, яка дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Кельвін – одиниця температури, яка дорівнює 1/273,16 термодинамічної температури трітійної точки води.

Моль – кількість речовини системи, яка містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вузлеці-12 масою 0,012 кг.

Кандела – сила світла, що випромінюється з поверхні площею 1/600 000 м² повного випромінювання у перпендикулярному напрямку при температурі випромінювання, яка дорівнює температурі твердіння платини при тиску 101 325 Па.

Множники і приставки СІ для утворення десяткових і дольних одиниць

Множник	Приставка	Позначення приставки	Множник	Приставка	Позначення приставки
10 ¹⁸	екса	Е	10 ⁻¹	деци	д
10 ¹⁵	пета	П	10 ⁻²	санти	с
10 ¹²	тера	Т	10 ⁻³	мілі	м
10 ⁹	гіга	Г	10 ⁻⁶	мікро	мк
10 ⁶	мега	М	10 ⁻⁹	нано	н
10 ³	кіло	к	10 ⁻¹²	піко	п
10 ²	гекто	г	10 ⁻¹⁵	фемто	ф
10 ¹	дека	да	10 ⁻¹⁸	атто	а

Для утворення похідних одиниць з основних використовують визначальні рівняння зв'язку між величинами. Вважають, що числові коефіцієнти в них дорівнюють 1, а величини виражають в основних одиницях СІ. Деякі похідні одиниці, що дістали спеціальні назви, можна використати для утворення інших похідних одиниць СІ. Скорочені позначення одиниць, названих на честь учених, пишуть з великої букви.

Спеціальні найменування, присвоєні ГКМВ, обов'язкові для застосування. Так, для роботи та енергії треба застосовувати одиницю джоуль (Дж), а не ньютон-метр (Н · м), хоч 1 Н · м = 1 Дж.

Вимірювання фізичних величин

Фізика – дослідна наука, тому вміння спостерігати фізичні процеси і вимірювати різні фізичні величини набуває особливого значення.

Усі зміни, які відбуваються під час фізичних явищ, оцінюють кількісно за допомогою вимірювань.

Виміряти величину – означає порівняти її з однорідною величиною, яку умовно взято за одиницю вимірювання.

Основним завданням фізичного досліду є визначення числових значень фізичних величин і встановлення кількісних залежностей між ними. Процес виконання досліду складається з вимірювань величин і обробки результатів вимірювання. Вимірювання класифікують за ознаками.

1. *Прямі вимірювання, під час яких числове значення вимірюваної величини дістають або безпосереднім порівнянням з мірою (наприклад, довжини, маси), або за допомогою приладів, градуйованих в одиницях вимірюваної величини (наприклад, сила струму, освітленість).*

2. *Непрямі вимірювання, під час яких визначають деякі величини, зв'язані певною закономірністю з вимірюваною величиною, і за ними обчислюють вимірювану величину. Наприклад, для визначення швидкості вимірюють шлях s і час t проходження цього шляху, потім обчислюють швидкість $v = s/t$.*

Вимірювання фізичних величин принципово не можуть бути абсолютно точними. Точність результатів вимірювань залежить від точності приладів і точності методу вимірювання. Твердження, що певну довжину виміряно з точністю до 0,1 мм, означає, що виміряне значення відрізняється від справжнього менше ніж на 0,1 мм. Як правило, точність приладу визначається ціною його найменшої поділки.

У процесі всіх вимірювань, через недосконалість вимірювальних приладів, ми дістаємо лише наближені результати. Отже, результати вимірювань містять деякі похибки. Похибки вимірювань бувають трьох видів: систематичні, випадкові і промахи.

Систематичні похибки виникають в основному через несправність приладу, помилковість методу вимірювання або постійний односторонній зовнішній вплив. Уникають цих похибок старанною перевіркою приладів, удосконаленням методу вимірювання і внесенням потрібних поправок до результатів вимірювань.

Випадкові похибки зумовлені переважно тією неточністю, якою неминує супроводжуватиметься спостереження показань приладів, а також неточністю відліків, яку мимовільно може внести кожний експериментатор. Випадкові похибки однаково можливі як у бік збільшення, так і в бік зменшення значення вимірюваної величини. Уникнути їх під час вимірювань не можна. Зменшують вплив випадкових похибок на результат вимірювання повторними вимірюваннями.

Промахи (або грубі похибки) зумовлені неухважністю відліку на приладі, неправильним вмиканням приладу або іншими порушеннями умов вимірювання. Про грубу похибку в окремому вимірюванні свідчить різка відмінність його результатів від закономірності, яка позначилась у ряді вимірювань. Обчислюючи вимірювані величини, такі помилкові дані слід відкидати і виконувати повторне (контрольне) вимірювання.

Щоб оцінити похибку результату, користуються такими спрощеними методами обчислення похибок.

1. Якщо $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ – результати окремих вимірювань величини x , то середній результат дорівнює їх сумі, поділеній на кількість вимірювань:

$$N = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n}{n} \quad (1)$$

2. Різницю між результатом окремого вимірювання і середнім результатом, узятим за модулем, називають абсолютною похибкою окремого вимірювання:

$$\Delta N_i = |N_i - N| \quad (2)$$

3. Середню абсолютну похибку визначають аналогічно середньому результату:

$$\Delta N = \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \Delta N_3 + \dots + \Delta N_n}{n} \quad (3)$$

4. Відносну похибку визначають як відношення середньої абсолютної похибки до середнього результату:

$$\varepsilon = \Delta N / N.$$

5. Остаточний результат записують так:

$$X = N \pm \Delta N, \quad \varepsilon = \frac{\Delta N}{N} \cdot 100 \%$$

Такий запис означає, що значення x лежить між $N - \Delta N$ і $N + \Delta N$. Не можна вважати, що x має значення $N - \Delta N$ і $N + \Delta N$.

Слід зазначити, що за своїм фізичним змістом абсолютна похибка не може бути менша від половини ціни поділки даного приладу. Наприклад, довжину вимірюють штангенциркулем з ціною поділки 0,1 мм. У цьому разі абсолютна похибка не може бути меншою від 0,05 мм.

Якщо результат обчислюють за формулою, до якої входять знайдені вимірюваннями величини, то абсолютну і відносну похибки обчислюють за правилами диференціального числення.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що вивчає наука фізика? 2. Дайте означення матерії. 3. Які види матерії Ви знаєте? 4. Наведіть приклади відомих Вам форм руху матерії.
 5. Що є загальною мірою різних форм руху матерії? 6. Що треба розуміти під фізичною картиною світу? 7. Що означає термін "техніка"?
 8. Коли і де було збудовано першу атомну електростанцію? 9. Коли і де було запущено перший штучний супутник Землі? 10. У якому році і хто здійснив перший у світі космічний політ? 11. Які вимірювання фізичних величин є прямими? непрямыми? 12. Яку похибку вимірювань називають абсолютною? відносною?
-

Фізика і астрономія

Відомі на сьогодні чотири типи взаємодій лежать в основі всіх сил і всіх взаємодій у Всесвіті. Якщо теорії елементарних частинок і їх взаємодій є справді фундаментальними, то вони мають пояснювати явища не тільки мікро-, а й макросвіту, тому поведження зір і галактик

описуються тими самими фізичними законами, що й елементарних частинок. Будову зір і галактик пояснюють за допомогою основних законів фізики. Зоря народжується в процесі гравітаційного стискання газопилової хмари. Основним джерелом випромінюваної зоряної енергії є термоядерна реакція перетворення водню в гелій.

Особливе місце в астрономії займає питання про походження і будову Сонячної системи. Велике значення у розв'язанні цього питання мають космічні дослідження.

За допомогою космічних досліджень було встановлено, що поблизу Місяця немає істотних магнітних і радіаційних полів, у міжпланетному просторі було зареєстровано потоки заряджених частинок. Станція "Луна-3" сфотографувала і передала на Землю фототелевізійне зображення невидимого боку Місяця. Велика подія в процесі вивчення Місяця відбулася у 1969 р., коли екіпаж американських астронавтів досяг поверхні Місяця, зібрав зразки місячного ґрунту, сфотографував поверхню Місяця. Дослідження ґрунту, доставленого з району Моря Достатку автоматичною станцією "Луна-16", показали, що він містить близько 700 хімічних елементів та ізотопів, і що вік Місяця становить близько 4,6 млрд років, тобто Місяць і Земля утворились приблизно в один час.

Вивчення ґрунту Місяця, визначення його віку дуже важливі для розв'язання космогонічних проблем*. Космічні міжпланетні станції допомогли вивчити властивості навколосемного космічного простору; так було відкрито навколосемні пояси радіації, змінилось уявлення про магнітне поле Землі. Було встановлено, що виникнення полярних сьйв пов'язане з явищами, що відбуваються на Сонці.

Небесна сфера та її елементи

Неозброєним оком видно на небі велику кількість зір. Їх так багато, що, здається, не можна полічити, проте зір, які видно неозброєним оком, близько трьох тисяч.

Дивлячись на небо, неважко помітити, що зорі різні за яскравістю, або, як кажуть астрономи, за блиском.

Найяскравіші назвали зорями 1-ї зоряної величини (зоряна величина характеризує не розміри, а лише блиск зір). Зорі, які в 2,5 раза (точніше, у 2,512) слабші за блиском від зір 1-ї величини, називають зорями 2-ї зоряної величини і т. д. Найслабші за блиском із зір, які видно неозброєним оком, – це зорі 6-ї зоряної величини. Вони слабші від зір 1-ї зоряної величини у 100 разів.

Усього на небі 22 зорі 1-ї зоряної величини, але блиск їх не однаковий: одні з них трохи яскравіші від зір 1-ї величини, інші слабші. Такий само неоднаковий блиск мають зорі 2-ї і наступних величин, тому, щоб точно визначати блиск тієї чи іншої зорі, його доводиться виражати дробом.

Найяскравіша зоря північної півкулі неба Вега має блиск 0,14 зоряної величини, а найяскравіша зоря всього неба Сиріус – мінус 1,58 зоряної величини, Сонце – мінус 26,8.

Зорі розрізняють не тільки за блиском, а й за кольором.

Вони можуть бути білими, жовтими, червоними. Чим червоніше зоря, тим вона холодніша. Сонце належить до жовтих зір.

Ще в давнину спостерігачі, щоб полегшити орієнтування на небі, об'єднали близькі одну до одної зорі в сузір'я, кожне з яких характеризується своєрідним візерунком зір, що входять до нього. Тепер небо поділено на 88 сузір'їв. На рис. 1 зображено сузір'я поблизу Полярної зорі. Під сузір'ям розуміють усю ділянку неба в межах деяких установлених меж.

Зорі рухаються в світовому просторі.

Але вони лежать на величезних відстанях, і ми не помічаємо їхнього переміщення на небі. Люди з покоління в покоління бачать ті самі сузір'я – взаємне положення зір у них майже не змінюється. Багато сузір'їв до наших днів зберігають свої назви з сивої давнини: Велика Ведмедиця, Мала Ведмедиця, Ліра, Лебідь, Телець, Оріон, Великий Пес та ін.

У кожному сузір'ї яскраві зорі, як правило, позначають буквою грецького алфавіту. Наприклад, Полярну зорю – альфа Малої Ведмедиці. Найяскравіші зорі називають власними іменами: Сиріус, Вега, Альтаір та ін.

Здається, що всі небесні світила однаково віддалені від нас, хоч справжні відстані до зір різні. Наше око цю відмінність у відстанях не помічає. Тому зорі зручно розглядати умовно так, ніби вони розміщені на внутрішній поверхні кулі довільного радіуса, в центрі якої перебуває спостерігач. Під небесною сферою розуміють уявлювану кульову поверхню довільного радіуса, на яку ми проектуємо положення небесних світил. Поняттям небесної сфери користуються для кутових вимірювань на небі, для зручності міркувань про найпростіші видимі небесні явища, для різних розрахунків, наприклад визначення часу сходження і заходження світил.



Рис. 1

* Космогонія – розділ астрономії, який вивчає походження і розвиток небесних тіл та їх систем.

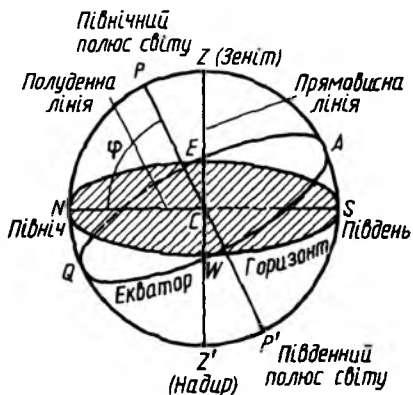


Рис. 2

Прямовисна лінія ZZ' (рис. 2), що проходить через око спостерігача (точка C), який перебуває в центрі небесної сфери, перетинає небесну сферу в точках Z – зеніт, Z' – надир (протилежна зеніту точка небесної сфери).

Зеніт – це найвища точка над головою спостерігача.

Площина, перпендикулярна до прямовисної лінії, називається горизонтальною площиною.

Математичним горизонтом називається лінія перетину небесної сфери з горизонтальною площиною, що проходить через центр небесної сфери.

Чи рухаються зорі по небозводу? Виявляється, що всі вони рухаються, і притому одночасно. У цьому легко впевнитись, спостерігаючи зоряне небо (орієнтуючись за певними предметами). Але є й така зоря, пересування якої протягом усієї ночі майже непомітне. Цю зорю назвали Полярною. Вона протягом доби описує коло малого радіуса, і її видно майже на тій самій висоті над горизонтом у північній частині неба. Зорі протягом доби описують тим більші кола, чим далі від Полярної зорі вони лежать. Вісь добового обертання небесної сфери називають віссю світу (PP'). Обертання неба навколо Землі – явище позірне. Воно пояснюється обертанням Землі. Точки перетину небесної сфери з віссю світу називають полюсами світу (точка P – Північний полюс світу, точка P' – Південний полюс світу).

Полярна зоря розміщена поблизу Північного полюса світу. Коли ми дивимось на Полярну зорю, точніше, на нерухома точку з нею – Північний полюс світу, напрям нашого погляду збігається з віссю світу. Південний полюс світу лежить у південній півкулі небесної сфери.

Площина $EAWQ$, яка перпендикулярна до осі світу PP' і проходить через центр небесної сфери, називається площиною небесного екватора, а лінія перетину її з небесною сферою – небесним екватором. Небесний екватор ділить небесну сферу на дві півкулі: північну і південну.

Вісь світу, полюси світу і небесний екватор аналогічні осі, полюсам і екватору Землі, бо згадані назви пов'язані з видимим обертанням небесної сфери, а воно є наслідком дійсного обертання земної кулі.

Площину, яка проходить через точку зеніту Z , центр C небесної сфери і полюс P світу, називають площиною небесного меридіана, а лінія перетину її з небесною сферою утворює лінію небесного меридіана.

У будь-якому місці Землі площина небесного меридіана збігається з площиною географічного меридіана цього місця.

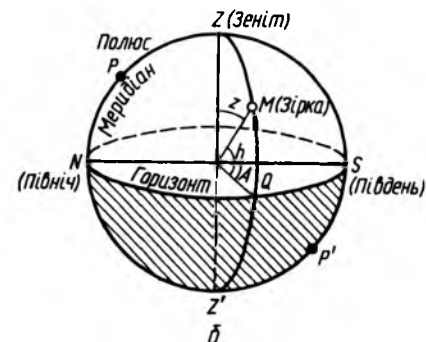


Рис. 3

Полуденна лінія NS – це лінія перетину площин меридіана і горизонту. Її названо так тому, що в полудень тіні від вертикальних предметів падають у цьому напрямі.

Небесні координати. Екваторіальна система координат

Щоб створити зоряну карту, яка зображує сузір'я на площині, треба знати координати зір. Для цього слід узяти таку систему координат, яка оберталася б разом із зоряним небом. Такою системою є екваторіальна система.

Система екваторіальних координат схожа на систему географічних координат на земній кулі.

Однією географічною координатою є географічна широта – це кутова відстань пункту від земного екватора. Кутову відстань світил від небесного екватора називають схиленням (рис. 3, а). Схилення позначають буквою δ . У північній півкулі схилення вважають додатними, у південній – від'ємними.

Іншою географічною координатою на Землі є довгота – кут між площиною меридіана певного пункту і площиною початкового меридіана. На небесній сфері другою координатою є пряме піднесення – кут між площиною півкруга, проведеного з полюса світу через світило (круга схилення), і площиною півкруга, проведеного з полюса світу через точку весняного рівнодення, що лежить на екваторі (початкового круга схилення). Пряме піднесення позначають буквою α ; його відлічують від точки весняного рівнодення* у проти руху стрілки годинника, тобто назустріч добовому обертанню неба**.

* У точці весняного рівнодення у Сонце буває 21 березня, коли тривалість дня і ночі на всій Землі однакова.

** Географічну широту і пряме піднесення зручно виражати не в градусах, а в одиницях часу. Врахувавши, що Земля робить один оберт за 24 год, дістанемо: $360^\circ - 24$ год; $1^\circ - 4$ хв; $15'' - 1$ с; $15'' - 1$ год; $15'' - 1$ хв.

Схилення і пряме піднесення (δ , α) називають екваторіальними координатами. Якщо не потрібна особлива точність, то ці координати для зір можна вважати сталими. Під час добового обертання зоряного неба обертається й точка весняного рівнодення. Тому положення зір відносно екватора і точки весняного рівнодення не залежать ні від часу доби, ні від положення спостерігача на Землі. Цю систему координат зображено на рухомій карті зоряного неба.

Горизонтальні координати

На рис. 3, б зображено видиму над горизонтом половину небесної сфери. Горизонтальними координатами зорі (точка M) будуть: висота h – кутова відстань точки M від горизонту*, азимут A – кут між небесним меридіаном і вертикальним кругом, що проходить через точку M .

Висоту і азимут виражають у градусах.

Горизонтальні координати світил безперервно змінюються з часом і залежать від положення спостерігача на Землі, оскільки відносно світового простору площина горизонту в певному пункті Землі обертається разом з нею.

Горизонтальні координати світил вимірюють для визначення часу або географічних координат різних пунктів на Землі.

Умови спостереження небесних світил. Рух Землі

Будь-яке світило, обертаючись навколо осі світу за добу, двічі перетинає меридіан. При цьому воно одного разу займає найвище положення – верхня кульмінація, іншого – найнижче положення – нижня кульмінація.

Кульмінація – це проходження світила через меридіан.

На рис. 4 зображено небесну сферу. Визначимо зенітну відстань світила в певному пункті в момент верхньої кульмінації, коли відоме його схилення. Нехай у момент верхньої кульмінації світило лежить у точці M , тоді дуга QM – це схилення δ світила, бо AQ – небесний екватор, перпендикулярний до осі світу PP' . Дуга QZ дорівнює дузі NP і дорівнює географічній широті місцевості ϕ . Очевидно, зенітна відстань, яку зображує дуга ZM , дорівнює $z = \phi - \delta$.

Якби світило кульмінувало на північ від зеніту Z (тобто якби точка M опинилася між Z і P), то $Z = \delta - \phi$. За цими рівняннями можна визначити

* Замість висоти h часто використовують зенітну відстань z , яка дорівнює $90^\circ - h$. Зенітна відстань – це кутова відстань точки M від зеніту.



Рис. 4

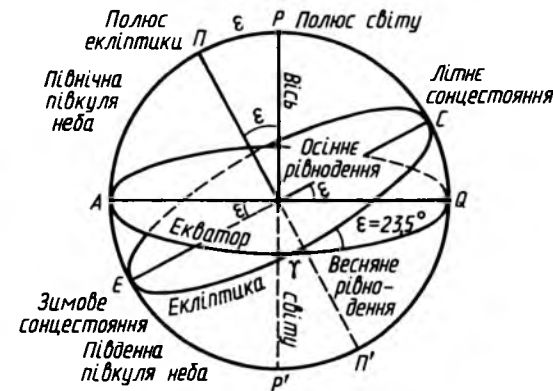


Рис. 5

зенітну відстань світила з відомим схиленням у момент верхньої кульмінації в пункті з відомою географічною широтою ϕ .

Як відомо, висота Сонця у верхній кульмінації змінюється протягом року. Найвище положення Сонце займає 22 червня. Цей день називають днем літнього сонцестояння. Він найдовший. Найнижче положення Сонце займає 22 грудня. Це день зимового сонцестояння. Він найкоротший. 21 березня і 23 вересня висота Сонця у верхній кульмінації буває середньою між висотами в літньому і зимовому сонцестоянні. День за тривалістю дорівнює ночі, тому 21 березня називають днем весняного рівнодення, а 23 вересня – днем осіннього рівнодення.

Вимірювання полуденних висот Сонця показують, що найбільше віддалення Сонця від небесного екватора на північ становить $23^\circ 27'$ (22 червня) і таке саме найбільше віддалення його на південь від екватора (22 грудня), тобто схилення Сонця змінюється від $+23^\circ 27'$ до $-23^\circ 27'$.

Сонце протягом року переміщується на небесній сфері по великому колу, площина якого нахилена до площини небесного екватора на $23^\circ 27'$ (рис. 5). Екліптикою називають велике коло небесної сфери, по якому протягом року переміщується центр Сонця.

Точки перетину екліптики з небесним екватором називають точками весняного (γ) і осіннього (Ω) рівнодення.

Дванадцять сузір'їв, через які проходить екліптика, утворюють поле зодіаку*; їх називають зодіакальними сузір'ями. Їх можна знайти на карті зоряного неба.

Річний рух Сонця по екліптиці – позірний, він спричинений обертанням Землі навколо Сонця (рис. 6).

Шлях, який описує Земля навколо Сонця, називають орбітою.

* Зодіак (грец.) – коло із зображенням тварин.

Днікарпатський національний університет
імені Василя Стефаника
код 02135206
НАУКОВА БІБЛІОТЕКА
ІНВ. № 758322

Вісь добового обертання Землі нахилена до площини екліптики на $66^{\circ}33'$, а площина екватора нахилена до площини екліптики на кут $90^{\circ} - 66^{\circ}33' = 23^{\circ}27'$. Вісь добового обертання Землі (під час руху Землі) залишається паралельною самій собі, не змінюючи нахилу до площини земної орбіти.

Оскільки ми не відчуваємо свого руху разом із Землею, нам здається, що ми нерухомі, а Сонце переміщується по екліптиці. Отже, **рух Сонця по екліптиці є відображенням руху Землі.**

Будова Сонячної системи

Сонячна система – сукупність небесних тіл – планет та їх супутників, астероїдів, комет і т. д., які обертаються навколо Сонця під дією сили його притягання (рис. 7).

Сонце – центральне тіло Сонячної системи.

Воно за масою в 750 разів перевищує масу всіх своїх супутників і являє собою величезну газову кулю, температура поверхні якої становить 6000 К.

Крім планет, схожих на Землю (Меркурій, Венера, Марс), навколо Сонця по еліптичних орбітах обертаються планети-гіганти: Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон.

Навколо Сонця обертаються і маленькі планети – астероїди. Їх близько 2000, найбільший з них – Церера – має діаметр 1025 км. Орбіти більшості астероїдів лежать між орбітами Марса і Юпітера.

Дрібніші тіла безладно носяться в світовому просторі, потрапляючи іноді й на Землю та інші планети. Це *метеори* розміром від піщинки до

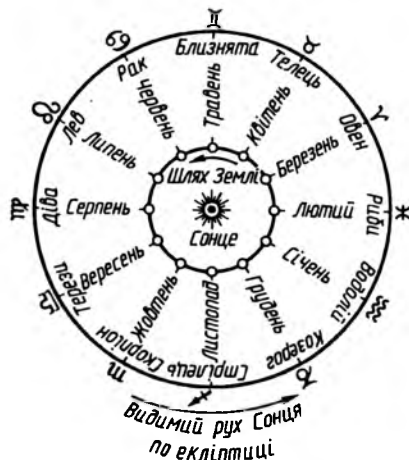


Рис. 6

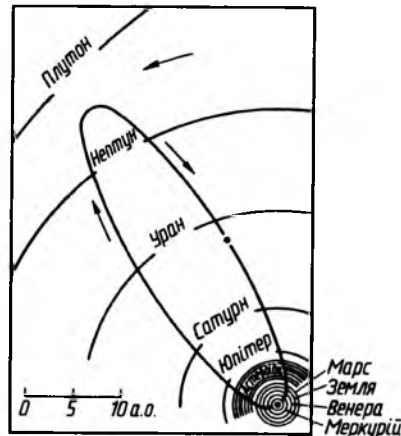


Рис. 7

дрібногo астероїда. Як правило, метеори не долітають до поверхні Землі, вони згорають у її атмосфері. Падіння безлічі метеорів можна спостерігати у вигляді “зоряного дощу” або метеорних потоків. Здебільшого це залишки комет, які розпалися, – *великих утворень з розрідженого газу* з дуже малим твердим ядром. Припускають, що комети утворюються на межі Сонячної системи. Під впливом планет-гігантів вони можуть наближатися до Сонця.

Рух планет навколо Сонця підпорядкований трьом законам Й. Кеплера.

Орбіта будь-якої планети є еліпсом, в одному з фокусів якого міститься Сонце (перший закон Кеплера).

З цього закону випливає, що відстань планет від Сонця змінюється. Найближчу точку орбіти називають *перигелієм*, а найдалішу – *афелієм*.

Орбіта Землі також еліптична. У перигелії Земля буває на початку січня, а в афелії – на початку липня.

Півсуму відстані планети від Сонця в афелії і перигелії називають *великою піввіссю орбіти планети*. Вона дорівнює середній відстані планети від Сонця. Середню відстань від Землі до Сонця, яка дорівнює приблизно 150 млн км, взято за одну астрономічну одиницю (1 а.о.).

Радіус-вектор планети за однакові проміжки часу описує рівні площі (другий закон – закон площ).

З цього закону випливає, що в перигелії швидкість планети максимальна, а в афелії – мінімальна.

Квадрати періодів обертань планет відносяться, як куби великих півосей їхніх орбіт (третій закон).

Якщо період обертання і велику піввісь орбіти однієї планети позначити відповідно T_1 і a_1 , а другої планети – T_2 і a_2 , то третій закон Кеплера можна записати формулою

$$T_1^2 / T_2^2 = a_1^3 / a_2^3.$$

Якщо відстань від Землі до Сонця взяти за одиницю і за допомогою астрономічних спостережень визначити періоди обертання планет, то, користуючись третім законом Кеплера, можна побудувати план (модель) планетної (Сонячної) системи.

Визначення відстаней до небесних тіл за допомогою кутових вимірювань

На Землі предмет, відстань до якого треба виміряти, розглядають з двох місць, звідки його видно в різних напрямках. Знаючи відстань між спостерігачами C і B (базис) і кут між напрямками, під якими вони

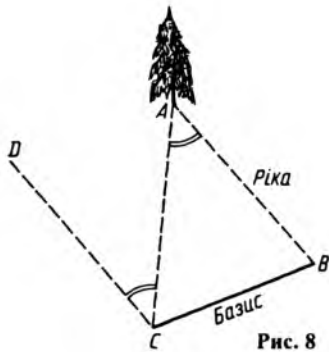


Рис. 8

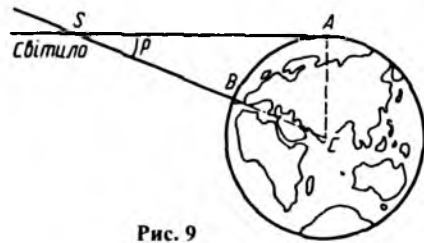


Рис. 9

бачать предмет A , легко обчислити відстань до нього (рис. 8). Це роблять за допомогою тригонометрії.

Відстань до небесних світил від Землі дуже велика. Щоб помітити відмінність у напрямках, в яких видно світило, спостерігачі повинні бути на відстані багатьох тисяч кілометрів один від одного, інакше кут між напрямками буде такий малий, що його не можна виміряти.

В основі визначення відстаней до небесних світил лежить явище паралактичного зміщення.

Паралактичним зміщенням називається зміна напрямку на предмет під час переміщення спостерігача.

Пояснимо це. Якщо дивитися на олівець, вертикально розміщений перед очима, по черзі закриваючи то одне, то інше око, буде видно “переміщення” олівця на фоні далеких предметів (стіни, вікна, двері). Чим далі від очей відсувати олівець, тим менше буде паралактичне зміщення. Чим далі одна від одної точки спостереження, тим більший базис, тим більше паралактичне зміщення. У нашому прикладі базисом є відстань між очима.

Для вимірювання відстаней до тіл Сонячної системи за базис беруть радіус Землі. Спостерігають положення світила, наприклад Місяця, на фоні далеких зір одночасно з двох обсерваторій. Відстань між ними по прямій (базис) має приблизно дорівнювати радіусу Землі і бути перпендикулярною до напрямку на світило. Якби за базис взяли радіус Землі CA , а спостерігачі були в точках A і B , то зі світила S радіус Землі було б видно під кутом p (рис. 9). Кут, під яким із світила видно радіус Землі, перпендикулярний до променя зору, називають горизонтальним паралаксом. Він дорівнює паралактичному зміщенню. На рис. 8 його зображено кутом при вершині C , а паралакс позначено кутом при вершині A . Вони дорівнюють один одному, як кути при паралельних прямих ($CD \parallel BA$ за побудовою).

Відстань $SC = D = R / \sin p$, де R – радіус Землі. Приймаючи R за одиницю, можна визначити відстань до світила в земних радіусах. Паралакс

Місяця дорівнює $57'$. Усі планети і Сонце значно далі від Землі, і їх паралакси становлять секунди. Паралакс Сонця $p_{\odot} = 8,8''$.

Для визначення відстаней навіть до найближчих зір радіус Землі – дуже малий базис, щоб виміряти кут p . У цьому разі спостереження обраної зорі ведуть з інтервалом у півроку. За цей час Земля переносить спостерігача на відстань 300 млн км. Тільки тоді вдається виміряти паралактичне зміщення зорі.

Для зручності обчислень як базис беруть велику піввісь a земної орбіти:

$$d = a / \sin p.$$

Кут p , під яким із зорі перпендикулярно до променя зору видно велику піввісь земної орбіти, називають річним паралаксом.

Відстані до зір дуже великі, і їх виражають не в кілометрах, а в парсеках, або світлових роках.

Парсек – відстань, якій відповідає річний паралакс (паралакс – секунда), що дорівнює одній кутовій секунді дуги. Оскільки $\sin 1'' = 1/206\,265$, то $d = a \cdot 206\,265 / p''$, де $a = 1$ а. о. = 149 600 000 км.

Світловий рік – відстань, яку електромагнітні хвилі проходять протягом року у вільному просторі: $1 \text{ св. рік} = 300\,000 \text{ км/с} \cdot 365,25 \cdot 86\,400 \text{ с} \approx 9,5 \cdot 10^{12} \text{ км}$. Порівнявши одиниці відстаней, дістаємо $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. року}$. Але навіть на такій величезній відстані немає жодної зорі.

Відстань до найближчої зорі α -Центавра 270 000 а. о., або $4/3$ пк.

За допомогою річного паралакса можна надійно встановити відстані до зір не далі як 100 пк, або 300 світлових років. Тепер відстань до найближчих до нас небесних тіл найточніше визначають методами радіоастрономії.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що таке небесна сфера? Для чого вводять це поняття?
2. Дайте означення основних точок і ліній небесної сфери: зеніту, полюса світу, небесного меридіана, небесного екватора, математичного горизонту.
3. Що таке екваторіальна система координат?
4. Що таке горизонтальна система координат?
5. Що називають кульмінацією?
6. Що називають екліптикою?
7. Як називають точки перетину небесного екватора з математичним горизонтом?
8. Яку з цих точок узято за початок відліку небесних координат?
9. Що називають орбітою Землі?
10. Назвіть планети, які входять до складу Сонячної системи.
11. Що являє собою Сонце?
12. Яка температура поверхні Сонця?
13. Сформулюйте закони Кеплера.
14. Яку точку орбіти планети назвали афелієм? перигелієм?
15. Що таке паралактичне зміщення?
16. Що таке горизонтальний паралакс?
17. Що таке річний паралакс?

Задачі для самостійного розв'язування

1. На якій широті зенітна відстань Полярної зорі дорівнює нулю?
2. У яких межах змінюється схилення Сонця протягом року?
3. Яка полуденна висота Сонця на широті Москви $\varphi = 55^\circ 45'$?
4. На якій широті Сонце буває в зеніті в дні рівнодень?
5. Сіріус ($\delta = -16^\circ 39'$) був у верхній кульмінації на висоті 10° . Чому дорівнює широта місця спостереження?
6. На якій висоті в Москві ($\varphi = 55^\circ 45'$) буває верхня кульмінація Веги ($\delta = +38^\circ 41'$) ?
7. У перигелії Меркурій підходить до Сонця на відстань 49,5 млн км, в афелії – на 69,7 млн км. Обчислити велику піввісь його орбіти.
8. Період обертання Венери навколо Сонця 225 діб. Використавши третій закон Кеплера, обчислити велику піввісь її орбіти.
9. Період обертання Юпітера навколо Сонця дорівнює 12 рокам. Обчислити велику піввісь його орбіти.
10. Марс далі від Сонця, ніж Земля, в 1,5 раза. Яка тривалість року на Марсі?
11. Горизонтальний паралакс Місяця становить $57''$. Визначити відстань до Місяця.
12. Горизонтальний паралакс Сонця становить $8,8''$. Визначити відстань до Сонця.

РОЗДІЛ 1 МЕХАНІКА

Термін “механіка” в науку ввів Арістотель (384–322 рр. до н. е.) і означив її так: “Під механікою розуміємо ми ту частину практичного мистецтва, яка допомагає нам розв'язувати важкі питання”. Істотний внесок у розвиток механіки належить Архімедові (бл. 287–212 рр. до н. е.), який розробив теорію важеля, додавання паралельних сил, вчення про центр ваги, заклав основи гідростатики. Одним із перших, хто прагнув збагнути зміст законів механіки, був Леонардо да Вінчі (1452–1519). Він осягнув природу інерції, розумів, що дія дорівнює протидії і спрямована проти неї. Дослідив вільне падіння і рух тіла, що кинуте горизонтально, явище удару, тертя. Дослідження Леонардо да Вінчі багато в чому випередили свій час.

Великий вплив на розвиток механіки здійснило вчення польського астронома М. Коперника (1473–1543) про геліоцентричну систему світу та відкриття німецьким астрономом Й. Кеплером (1571–1630) законів руху планет. Ці закони пізніше стали підґрунтям для відкриття І. Ньютоном (1643–1727) закону всесвітнього тяжіння. Основоположником динаміки і одним із засновників точного природознавства є Г. Галілей (1564–1642).

Саме від Г. Галілея бере початок фізика як наука. Йому людство зобов'язане двома принципами механіки, котрі відіграли велику роль у розвиткові не тільки механіки, але й усієї фізики. Це принцип відносності та принцип сталості прискорення вільного падіння. Важливі для подальшого розвитку механіки дослідження руху точки по колу, коливань фізичного маятника, законів пружного удару тіл належать голландському фізику Х. Гюйгенсу (1629–1659). Створення основ сучасного природознавства та класичної механіки завершується науковими працями видатного англійського вченого І. Ньютона. На підставі трьох законів Ньютона та закону всесвітнього тяжіння було створено механічну картину всесвіту, яка довгий час панувала в науці.

Механіка – наука, котра вивчає механічний рух і чинники, що спричиняють або змінюють цей рух. Класична механіка складається з трьох розділів: “Кінематика”, “Динаміка”, “Статика”.

* Механіка (від грец. μηχανή – машина) – наука про машини, мистецтво побудови машин.

ГЛАВА 1

КІНЕМАТИКА

§ 1. Механічний рух

Описання механічного руху

Механіка – наука про механічний рух матеріальних тіл та взаємодії між ними, що відбуваються при цьому. Під механічним рухом розуміють зміну в часі взаємного положення тіл або їхніх частин у просторі.

Наприклад, у природі – це обертання Землі навколо власної осі, рух Землі й інших планет навколо Сонця, обертання Сонячної системи навколо ядра галактики, “розбіг” галактик, тобто розширення Всесвіту. В техніці – рух автомобілів, літаків, морських та космічних кораблів, частин двигунів машин і механізмів.

Виникнення поняття “механічного руху” як просторового переміщення пов’язане з ім’ям Арістотеля. Трактат Арістотеля “Фізика” цілком присвячений вченню про рух. У ньому Арістотель писав: “Оскільки природа є початок руху і змінення, а предметом нашого дослідження є природа, то не можна залишати нез’ясованим, що таке рух: адже ж незнання руху необхідно спричиняє незнання природи”.

Розділ механіки, який вивчає способи описання рухів і зв’язок між величинами, що характеризують ці рухи, називають кінематикою. Кінематика вивчає рухи тіл без урахування чинників, що їх спричиняють.

У процесі вивчення руху матеріальних тіл для спрощення розв’язання деяких задач у механіці вводять низку абстрактних понять – фізичних моделей, які відображують ті чи інші властивості реальних тіл або систем. Ними є наступні поняття.

Матеріальна точка – тіло, що має масу, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати*.

Положення матеріальної точки в просторі визначається як положення геометричної точки. Матеріальною точкою, наприклад, вважають Землю, розглядаючи її рух навколо Сонця. В подальшому, вживаючи термін “тіло”, матимемо на увазі матеріальну точку.

Абсолютно тверде тіло – система матеріальних точок, відстань між якими в часі не змінюється. Розміри і форма абсолютно твердого тіла при різноманітних зовнішніх діях не змінюються.

Механічний рух відбувається в просторі та часі. В класичній механіці простір однорідний та ізотропний, час – однорідний.

* Тіло можна вважати матеріальною точкою в тому разі, коли воно рухається поступально або коли обертальну частину його руху в умовах даної задачі можна не враховувати.

Однорідність простору означає рівноправність усіх його точок.

Ізотропність простору означає рівноправність усіх напрямків у просторі.

Однорідність часу – рівноправність усіх моментів часу.

Для описання механічного руху потрібно вказати тіло, відносно якого розглядається рух. Відносно Сонця розглядається рух планет, відносно яких-небудь пунктів на поверхні Землі – рух літаків, потягів, автомобілів. Причому вважають, що в першому прикладі – Сонце, в другому – Земля нерухомі і є тілом відліку.

Тіло відліку – довільно вибране тіло, відносно якого визначається положення рухомої матеріальної точки.

Положення рухомої матеріальної точки в даний момент часу можна визначити, якщо вибрано систему відліку.

Система відліку – сукупність тіла відліку та пов’язаних з ним систем координат і годинника (рис. 1.1).

Механічний рух відбувається в часі, тому система відліку повинна мати годинник, який відлічує проміжки часу від довільно вибраного початкового моменту часу.

На рис. 1.1 тіло відліку O знаходиться на початку координат. Описуючи рух, найчастіше використовують прямокутну або декартову систему координат. Положення матеріальної точки M у декартовій системі координат визначається трьома координатами x , y , z або радіусом-вектором \vec{r} .

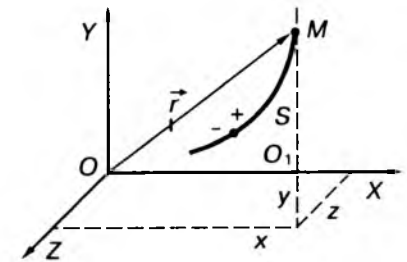


Рис. 1.1

Радіус-вектор \vec{r} – вектор, проведений з початку системи координат до даної точки. Довжина радіуса-вектора \vec{r} , тобто його модуль $|\vec{r}| = r$, визначає відстань, на якій точка M знаходиться від початку координат, а стрілка показує напрямок на цю точку.

У разі руху матеріальної точки M кінець радіуса-вектора описує в просторі деяку лінію – траєкторію.

*Траєкторія** – неперервна лінія, що її описує точка під час свого руху.

За формою траєкторії механічні рухи класифікують на прямолінійні й криволінійні.

Прямолінійний – це рух, траєкторія котрого у вибраній системі відліку є прямою лінією.

Криволінійний – це рух, траєкторія котрого у вибраній системі відліку є деякою кривою лінією.

* Траєкторія (від лат. trajectory) – стосовний до переміщення.

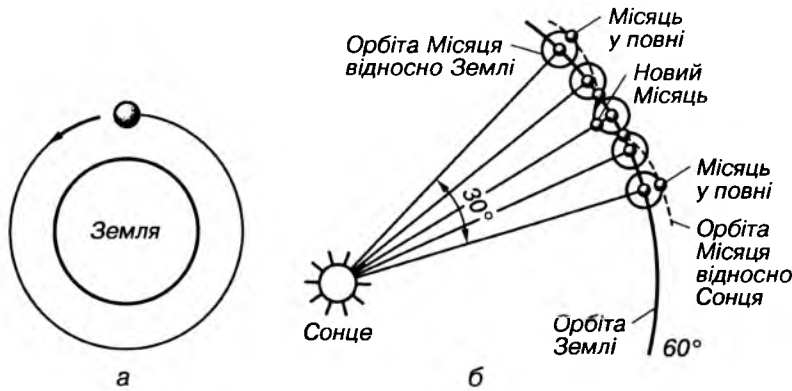


Рис. 1.2

Форма траєкторії залежить від того, в якій системі відліку розглядається рух. На рис. 1.2, *а* зображено траєкторію руху Місяця – супутника Землі – в геоцентричній системі (відносно Землі), а на рис. 1.2, *б* – у геліоцентричній системі (відносно Сонця).

Способи задання руху

Рух точки може бути заданий одним із трьох способів: векторним, координатним (або аналітичним) і натуральним.

За векторним способом положення точки відносно системи відліку визначається радіусом-вектором \mathbf{r} ; закон руху задається рівнянням $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$.

Траєкторією точки є годограф* вектора \mathbf{r} .

За координатним способом положення точки відносно системи відліку визначається трьома координатами x, y, z , а закон руху задається трьома рівняннями $x = f_1(t), y = f_2(t), z = f_3(t)$. Вилучивши з цих рівнянь час t , можна знайти траєкторію точки.

Якщо точка рухається вздовж прямої лінії, що збігається з віссю X , то закон руху має вигляд $x = f(t)$ або $x = x(t)$ (рис. 1.3).

Якщо розглядається рух на площині, то закон руху задається двома рівняннями: $x = f(t), y = f(t)$ (рис. 1.4).

Натуральний спосіб застосовується в тому випадку, коли є відомою траєкторія точки відносно вибраної системи відліку. Положення точки M визначається відстанню $S = O_1M$ від вибраного на траєкторії початку

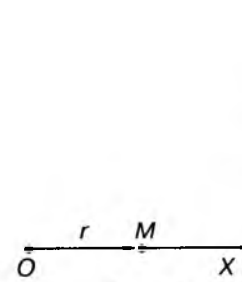


Рис. 1.3

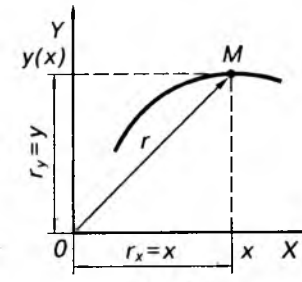


Рис. 1.4

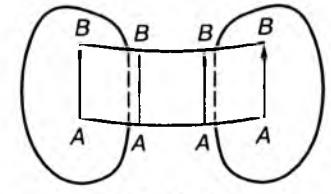


Рис. 1.5

відліку O_1 , виміряною вздовж траєкторії й взятою за відповідним законом (“+” або “-”, див. рис. 1.1). Закон руху задається рівнянням $S = f(t)$, яке описує залежність S від t . Залежність S від t може бути заданою:

графіком руху, на якому у вибраному масштабі вздовж осі абсцис відкладено час t , а вздовж осі ординат – відстань S ;

таблицею, де в одному стовпчику наводяться значення t , а в іншому – відповідні до них значення S .

Способи задання руху твердого тіла залежать від форми його руху. Найпростішими є поступальний і обертальний рухи твердого тіла.

Поступальний – це такий рух твердого тіла, коли пряма, що з'єднує дві будь-які точки тіла, переміщується, залишаючись паралельною своєму початковому положенню (рис. 1.5).

У разі поступального руху твердого тіла всі точки тіла описують однакові траєкторії. Його рух задається й вивчається так само, як і рух однієї точки. Поступально рухаються ящики письмового стола, вагони метро – електропотяги, кабіни “колеса огляду”.

Обертальний рух навколо нерухомої осі – це такий рух твердого тіла, коли всі його точки описують кола, центри яких лежать на одній прямій – осі обертання, що перпендикулярна до площин цих кіл*.

На рис. 1.6 наведено вісь обертання OO' .

У разі обертального руху твердого тіла навколо нерухомої осі його положення задається кутом повороту φ (див. рис. 1.6), а закон руху – рівнянням $\varphi = f(t)$, яке описує залежність кута повороту від часу.

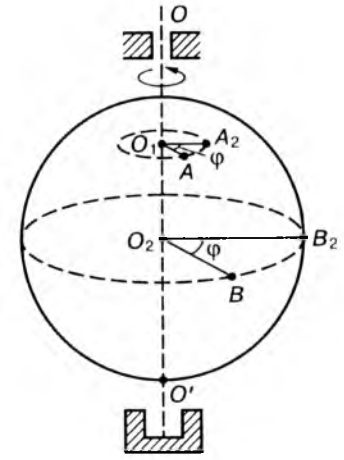


Рис. 1.6

* Годограф (від грец. ὁδός – шлях, рух, напрямок і γράφω – пишу) – у механіці крива, що є геометричним місцем кінців змінного в часі радіуса-вектора, значення котрого в різні моменти часу відкладені від спільного початку.

* Прикладами обертального руху можуть бути обертання колес велосипеда, пропелерів літака, валів двигунів і генераторів.

§ 2. Переміщення. Шлях

Вектор переміщення

Положення матеріальної точки (тіла) у вибраній системі відліку в даний момент часу визначається радіусом-вектором \mathbf{r} . Нехай точка переміщується на площині і в початковий момент часу t_0 знаходиться в положенні A , а в момент часу t – в положенні B . Ці положення точки в системі координат XOY визначаються відповідно радіусами-векторами \mathbf{r}_0 і \mathbf{r} (рис. 1.7). Вектор $\Delta\mathbf{r}$, проведений з кінця радіуса-вектора \mathbf{r}_0 (з точки A) до кінця радіуса-вектора \mathbf{r} (точка B), є переміщенням точки за проміжок часу $\Delta t = t - t_0$:

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0. \quad (1.1)$$

*Переміщення $\Delta\mathbf{r}$ – вектор, який з'єднує положення рухомої точки на початку і в кінці деякого проміжку часу**.

Вектор переміщення напрямлений вздовж хорди траєкторії точки.

Для описання руху потрібно знати радіус-вектор точки в будь-який момент часу. З рис. 1.7 бачимо, що коли є відомим радіус-вектор у початковий момент часу t_0 , тобто \mathbf{r}_0 , і є відомим переміщенням $\Delta\mathbf{r}$, то можна знайти радіус-вектор \mathbf{r} у будь-який наступний момент часу t

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \Delta\mathbf{r}. \quad (1.2)$$

Векторному рівнянню (1.2) для руху точки на площині відповідають два рівняння в координатній формі. Опустивши перпендикуляри з початку і кінця вектора переміщення $\Delta\mathbf{r}$ на осі координат X і Y , можна знайти його проекції на ці осі.

Проекції вектора переміщення – це зміна координат Δx і Δy рухомої точки (рис. 1.8). Зміна координат під час руху матеріальної точки може бути як додатною, так і від'ємною. З рис. 1.8 бачимо, що у разі руху матеріальної точки з A до B координата вздовж осі X зростає ($x > x_0$), тому зміна координати є додатною ($\Delta x = x - x_0 > 0$). Вздовж осі Y координата зменшується ($\Delta y < y_0$), зміна координати є від'ємною ($\Delta y = y - y_0 < 0$).

Знаючи, що проекції вектора переміщення дорівнюють змінам координат, маємо

$$x = x_0 + \Delta x; \quad y = y_0 + \Delta y. \quad (1.3)$$

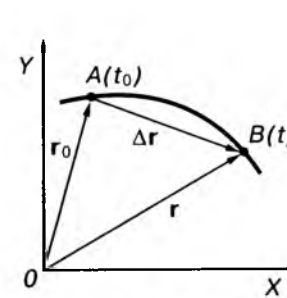


Рис. 1.7

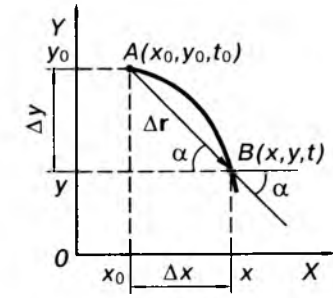


Рис. 1.8

Векторному рівнянню (1.2) для руху матеріальної точки в просторі відповідають три рівняння в координатній формі:

$$x = x_0 + \Delta x; \quad y = y_0 + \Delta y; \quad z = z_0 + \Delta z. \quad (1.4)$$

Отже, щоб знайти положення точки в просторі у будь-який момент часу (координати x, y, z), треба знати її початкове положення (координати x_0, y_0, z_0) і вміти обчислювати зміни координат точки $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ у процесі її руху.

Векторний і координатний способи описання руху взаємопов'язані та еквівалентні.

Модуль і напрям переміщення повністю визначаються його проекціями на осі ординат. Використовуючи рис. 1.8, за теоремою Піфагора визначаємо модуль вектора переміщення:

$$|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}. \quad (1.5)$$

Напрямок вектора $\Delta\mathbf{r}$ можна задати кутом α між вектором і додатним напрямом осі X . Із рис. 1.8 видно, що

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (1.6)$$

(На рис. 1.8 $\Delta x > 0$; $\Delta y < 0$.)

Додавання переміщень

Переміщення – векторна величина, тому дії з векторами переміщень виконуються за правилами векторної алгебри*.

Пояснимо це на прикладі. Поперек річки переправляється човен (рис. 1.9). Якби вода в річці була нерухомою, то човен, рухаючись вздовж осі Y , через деякий час опинився б у точці A . Переміщення вздовж осі Y – вектор \mathbf{a} . Насправді ж вода в річці тече вздовж осі X і “зносить” човен течією за той самий час у точку B . Переміщення вздовж осі X – вектор \mathbf{b} .

* Греська буква “дельта” (Δ) означає в формулах зміну, приріст, проміжок, відрізок.

* Векторна алгебра – вчення про дії над векторами – додавання, віднімання, множення.

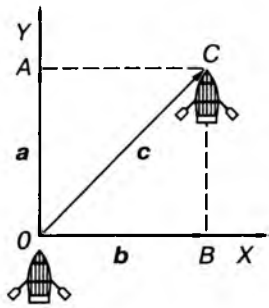


Рис. 1.9

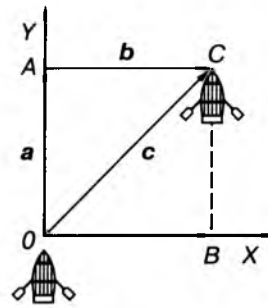


Рис. 1.10

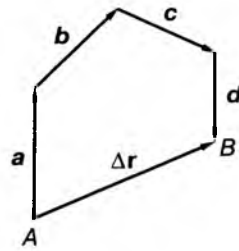


Рис. 1.11

Яким же буде справжнє переміщення човна? Щоб відповісти на це запитання, слід додати два вектори: \mathbf{a} і \mathbf{b} . Додавання векторів виконують за правилом паралелограма або трикутника (багатокутника).

Згідно з правилом паралелограма сумарний вектор \mathbf{c} є діагоналлю паралелограма, побудованого на складових векторах (\mathbf{a} і \mathbf{b}) як на сторонах; при цьому початки всіх трьох векторів (\mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c}) збігаються.

З рис. 1.9 видно, що $\mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{b}$ або $\mathbf{c} = \mathbf{b} + \mathbf{a}$, тобто результат додавання переміщень не залежить від послідовності елементів переміщень.

За правилом трикутника (рис. 1.10) потрібно з кінцем вектора \mathbf{a} сполучити початок вектора \mathbf{b} . З'єднавши початок першого вектора з кінцем другого, одержують сумарний вектор (\mathbf{c}).

Якщо додаються не два, а кілька векторів, то правило трикутника узагальнюється на правило багатокутника. Для знаходження результуючого переміщення $\mathbf{a} + \mathbf{b} + \mathbf{c} + \mathbf{d} = \Delta \mathbf{r}$ слід з'єднати початок першого переміщення (A) з кінцем останнього (B) (рис. 1.11).

Шлях

Нехай S – скалярна величина, що дорівнює довжині ділянки траєкторії, котра пройдена рухомою точкою за даний проміжок часу.

Одиниця шляху – метр (м) – є в СІ основною.

Метр – одиниця довжини, що дорівнює відстані, яку проходить світло у вакуумі за час $1/299\,792\,458$ с.

Шлях, на відміну від переміщення, є скалярною функцією часу:

$$S = f(t).$$

Шляхи, що пройдені точкою за послідовні проміжки часу, додаються алгебраїчно.

Графік залежності шляху від часу $S = f(t)$ називається графіком шляху (рис. 1.12). За графіком шляху можна визначити шлях, який пройшла

точка за певний проміжок часу. Для цього потрібно з точки (на осі часу), що відповідає кінцю проміжку, наприклад 2 с, поставити перпендикуляр до перетину з графіком (точка A). З цієї точки A опустити перпендикуляр на вісь S . Точка перетину перпендикуляра з віссю S дасть значення шляху. Згідно з графіком (див. рис. 1.12), за 2 с точка пройшла шлях 4 м.

Зверніть увагу, що в разі руху матеріальної точки шлях не може зменшуватись і не буває від'ємним, тобто $S \geq 0$.

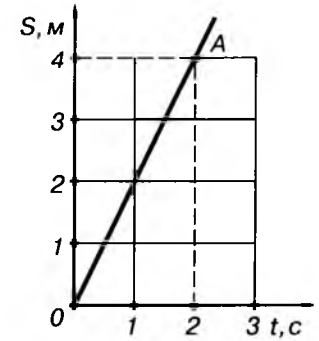


Рис. 1.12

У прямолінійному русі модуль вектора переміщення $|\Delta \mathbf{r}|$ дорівнює шляху ΔS , тобто $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta S$.

Якщо рух відбувається вздовж осі X , то, згідно з (1.5),

$$\Delta S = |\Delta x| = |x - x_0|. \quad (1.7)$$

Якщо напрям прямолінійного руху змінюється, то шлях більший за модуль вектора переміщення. Наприклад, тіло кинули з поверхні Землі вертикально вгору. Піднявшись на висоту h , тіло падає вниз. Вектор переміщення тіла дорівнює нулеві: $\Delta \mathbf{r} = 0$, а шлях $S = 2h$.

У разі криволінійного руху шлях ΔS також більший за модуль переміщення $|\Delta \mathbf{r}|$.

§ 3. Швидкість

Швидкість – одна з основних кінематичних характеристик руху точки. Позначається швидкість латинською буквою v – від першої букви латинського слова *velocitas* (швидкість).

Швидкість – величина векторна; вона характеризує напрям руху тіла і бистроту його переміщення. Говорячи про рух, наприклад, автомобіля, літака, космічного корабля, ми знаємо, що швидкість руху літака більша за швидкість автомобіля, але менша за швидкість космічного корабля. Транспортні засоби звичайно мають прилад, який показує модуль або числове значення швидкості їхнього руху (в автомобілях – спідометр). Швидкість зображують напрямленим відрізком прямої (стрілкою), довжина якого у вибраному масштабі характеризує модуль швидкості (рис. 1.13).

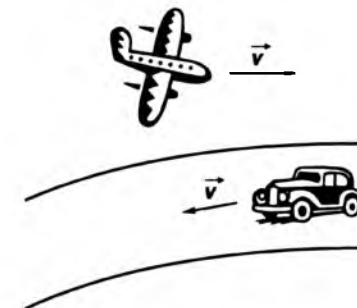


Рис. 1.13

Середня скалярна швидкість

Визначити, яке тіло рухається швидше, можна, наприклад, такими способами:

- визначити шлях, який проходять рухомі тіла за однаковий проміжок часу. Чим більший цей шлях, тим швидше рухається тіло, тим більшою є його швидкість;
- визначити час, протягом якого тіла проходять однакові шляхи. Чим менший цей час, тим швидше рухається тіло, тим більшою є його швидкість.

Отже, швидкість прямо пропорційна шляху і обернено пропорційна часу руху:

$$v_s = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1.8)$$

За формулою (1.8) обчислюють середню скалярну швидкість.

Середня скалярна швидкість – фізична величина, яка визначається відношенням шляху ΔS , пройденого тілом за проміжок часу Δt , до тривалості цього проміжку.

Середня скалярна швидкість є зручною для описання руху замкненою траєкторією або траєкторією, різні ділянки якої перетинаються.

Середня швидкість

Нехай матеріальна точка рухається траєкторією (рис. 1.14) з положення A в положення B вздовж дуги AB . Протягом проміжку часу $\Delta t = t - t_0$ точка пройде шлях ΔS , який дорівнює довжині шляху AB , і здійснить переміщення

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0.$$

Вектор середньої швидкості $\langle \mathbf{v} \rangle$ за проміжок часу Δt – це фізична величина, що дорівнює відношенню вектора переміщення точки $\Delta \mathbf{r}$ до тривалості проміжку часу Δt :

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.9)$$

Напрямок вектора середньої швидкості збігається з напрямом вектора переміщення $\Delta \mathbf{r}$ (див. рис. 1.14).

Середня швидкість є достатньо приблизною характеристикою руху. Коли автомобіль розганяється або гальмує, показання спідометра змінюються і не збігатимуться з обчисленими за формулою (1.9). Що ж саме показує спідометр?

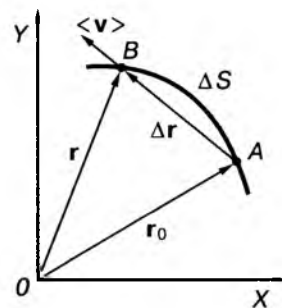


Рис. 1.14

Миттєва швидкість

Спідометр – прилад, який показує швидкість руху автомобіля “зараз”, тобто за нескінченно малий проміжок часу. Швидкість у даний момент часу ($\Delta t \rightarrow 0$) називають *миттєвою*.

Миттєва швидкість \mathbf{v} – векторна фізична величина, що дорівнює границі, до якої прямує середня швидкість $\langle \mathbf{v} \rangle$ у разі наближення проміжку часу до нуля ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \mathbf{v} \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.10)$$

Зі зменшенням проміжку часу Δt точка B розташовуватиметься все ближче й ближче до точки A , тобто $\Delta \mathbf{r}$ зменшуватиметься. Якщо Δt прямуватиме до нуля, то модуль вектора переміщення дорівнюватиме шляху $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta S$ і в граничному випадку $\Delta \mathbf{r}$ буде напрямлено вздовж дотичної до траєкторії руху матеріальної точки. Модуль миттєвої швидкості дорівнює модулю границі відношення елементарного переміщення $\Delta \mathbf{r}$ до елементарного проміжку часу $\Delta t \rightarrow 0$:

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

У математиці вираз $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t}$ позначають $\frac{dS}{dt}$ і називають похідною шляху за часом.

Модуль миттєвої швидкості дорівнює похідній шляху за часом:

$$v = \frac{dS}{dt} \quad (1.11)$$

За формулою (1.11) визначають лише числове значення швидкості.

Повне визначення швидкості задається виразом (1.10). Враховуючи, що $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$, маємо

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.12)$$

Миттєва швидкість дорівнює першій похідній радіуса-вектора рухомої точки за часом.

Вектор миттєвої швидкості напрямлений вздовж дотичної до траєкторії в напрямку руху (рис. 1.15).

Якщо матеріальна точка рухається по площині, то векторному рівнянню (1.12) відповідають два рівняння в координатній формі. Знаючи, що проекції вектора переміщення $\Delta \mathbf{r}$ (рис. 1.16) відповідно дорівнюють Δx , Δy , і враховуючи (1.10), одержимо проекції вектора швидкості \mathbf{v} на осі X , Y :

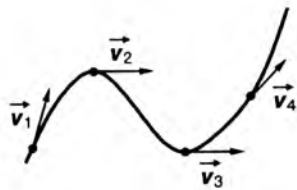


Рис. 1.15

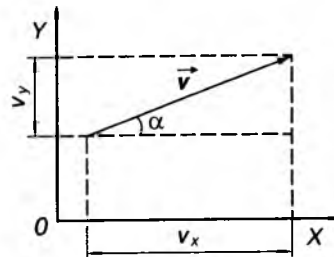


Рис. 1.16

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{dy}{dt}. \quad (1.13)$$

Модуль вектора швидкості визначають через його проекції за теоремою Піфагора

$$|v| = v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (1.14)$$

Напрямок вектора швидкості визначається кутом α . Із рис. 1.16 видно, що

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}. \quad (1.15)$$

Векторному рівнянню (1.12) для руху матеріальної точки в просторі відповідають три рівняння:

$$v_x = \frac{dx}{dt}; \quad v_y = \frac{dy}{dt}; \quad v_z = \frac{dz}{dt}. \quad (1.16)$$

Модуль вектора швидкості

$$|v| = v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \quad (1.17)$$

Деякі характерні швидкості (приблизні значення)

Об'єкт	Швидкість, м/с
Людське волосся, що росте	$5 \cdot 10^{-9}$
Дрейфуючий льодовик	$3 \cdot 10^{-6}$
Мураха	$1 \cdot 10^{-2}$
Плавець	$2 \cdot 10^0$
Спринтер	10
Звук у повітрі	$3,3 \cdot 10^2$
Молекула в атмосфері	$5 \cdot 10^2$
Місяць, що рухається навколо Землі	$1 \cdot 10^3$
Земля, що рухається по орбіті	$3 \cdot 10^4$
Сонячна система в Галактиці	$2 \cdot 10^5$
Електрон в атомі водню	$2 \cdot 10^6$
Світло у вакуумі	$3 \cdot 10^8$

Примітка. Об'єкти Всесвіту рухаються з різними швидкостями. Але (!) існує фундаментальний принцип, згідно з яким максимальна швидкість руху матеріальних об'єктів дорівнює швидкості світла у вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

§ 4. Рівномірний прямолінійний рух

Закон рівномірного прямолінійного руху

У разі прямолінійного руху траєкторією руху є пряма лінія. Описуючи такий рух, можна вважати, що тіло рухається вздовж однієї з осей координат.

Якщо рух прямолінійний, то модуль вектора переміщення дорівнює шляху. Нехай матеріальна точка рухається вздовж осі X , тоді $|dr| = dS = dx$ і швидкість обчислюється за формулою $v_x = \frac{dx}{dt}$; якщо на-

пряма вектора швидкості та додатний напрям осі X збігаються, то dx – додатна величина, dt – завжди додатна величина, отже, похідна від координати за часом (тобто швидкість) – величина додатна ($v_x > 0$).

Якщо напрям вектора швидкості протилежний додатному напрямку осі X , то $v_x = \frac{-dx}{dt}$, тобто $v_x < 0$. Знак “мінус” перед похідною говорить про те, що напрям руху – напрям швидкості – і додатний напрям осі X протилежні.

Вектор швидкості тіла, що рухається прямолінійно, не змінюється за напрямом, а модуль вектора швидкості з плином часу може як змінюватися, так і лишатися сталим. Якщо модуль швидкості тіла в часі змінюється, рух називають *нерівномірним* або *змінним*.

Рівномірний – це рух, коли тіло переміщується зі сталою за модулем швидкістю $v = \text{const}$ *

Рівномірний прямолінійний – це рух, коли тіло переміщується зі сталою за модулем і напрямом швидкістю:

$$v = \text{const}. \quad (1.18)$$

Одиниця швидкості – метр на секунду (м/с).

Метр на секунду дорівнює швидкості точки, що рухається прямолінійно і рівномірно, з якою ця точка за час 1 с переміщається на відстань 1 м.

Залежність (1.18) можна зобразити графічно. Графіком швидкості рівномірного руху є пряма лінія, котра паралельна осі часу (рис. 1.17). У момент часу 1 с, 2 с, 3 с і т. д. швидкість руху становить 30 м/с, тобто є сталою.

Якщо тіло рухається рівномірно вздовж напрямку осі X і в початковий момент часу $t_0 = 0$ знаходилось у точці з координатою x_0 , а в довільний момент часу t – у точці з координатою x , то швидкість руху дорівнює

* Const (від лат. constans) – незмінний.

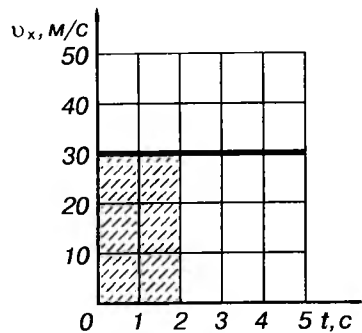


Рис. 1.17

Враховуючи, що модуль різниці координат дорівнює шляху [див. формулу (1.17)], а тіло рухається вздовж додатного напрямку осі X , тобто $|x - x_0| = x - x_0$, отримаємо

$$S = v_x t. \quad (1.20)$$

Для визначення координати рухомого тіла в будь-який момент часу треба знати початкову координату x_0 і швидкість v_x .

Якщо початок відліку вздовж осі X розташувати в початковій координаті, то $x_0 = 0$ і закон рівномірного прямолінійного руху матиме вигляд

$$x = v_x t. \quad (1.21)$$

Із рівнянь (1.19) та (1.21) бачимо, що залежність координати від часу є лінійною. Координата x з часом або зростає, або спадає залежно від того, додатною ($v > 0$) або від'ємною ($v < 0$) є швидкість руху.

За графіком залежності швидкості v_x від часу (див. рис. 1.17) можна визначити шлях S , тобто модуль різниці координат рухомого тіла $S = |\Delta x| = |x - x_0|$ у будь-який момент часу t . Шлях чисельно дорівнює площі під графіком залежності швидкості руху тіла від часу. У разі прямолінійного рівномірного руху шлях або модуль різниці координат $|\Delta x|$ чисельно дорівнює площі прямокутника, сторони якого v_x і t . Нехай $t = 2$ с, тоді $S = 30 \text{ м/с} \cdot 2 \text{ с} = 60 \text{ м}$.

Із рівняння (1.21) можна визначити швидкість руху v_x , якщо відомо координату тіла x у момент часу t , а початкова координата x_0 дорівнює нулеві:

$$v_x = \frac{x}{t}. \quad (1.22)$$

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x - x_0}{t - t_0} \text{ або, враховуючи, що}$$

$$t_0 = 0, \quad v_x = \frac{x - x_0}{t}. \text{ Звідси випливає, що}$$

$$x = x_0 + v_x t. \quad (1.19)$$

Вираз (1.19) називають законом рівномірного прямолінійного руху. З цього рівняння випливає, що

$$x - x_0 = v_x t.$$

Графік шляху рівномірного прямолінійного руху

Лінійну залежність шляху, який проходить рухоме тіло, від часу можна зобразити графічно. Якщо по осі абсцис відкладати час руху t , а по осі ординат – шлях S , то за формулою (1.20) графіком лінійної залежності шляху від часу є пряма лінія, що проходить через початок координат (при $t = 0, S = 0$) (рис. 1.18).

З'ясуємо, від чого саме залежить кут нахилу прямої до осі часу – кут α . За деякий проміжок часу t (нехай $t = 2$ с, на осі абсцис проміжок часу зображений відрізком OB) тіло пройшло шлях S ($t = 2$ с відповідає $S = 20$ м, відрізок AB). За рис. 1.18 маємо

$$\text{tg } \alpha = \frac{AB}{OB} = \frac{S}{t} = v_x,$$

$$v_x = \frac{20 \text{ м}}{2 \text{ с}} = 10 \text{ м/с}. \quad (1.23)$$

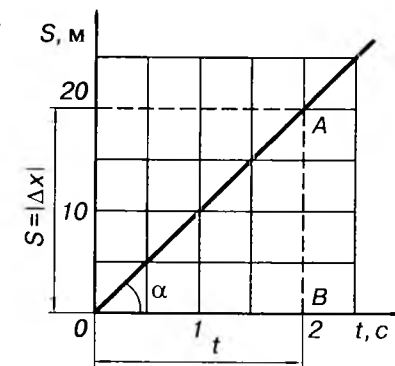


Рис. 1.18

Отже, кут нахилу прямої залежить від швидкості руху тіла. Чим більшою є швидкість руху v_x , тим більший $\text{tg } \alpha$, а отже, більший кут α ($\alpha_2 > \alpha_1$, оскільки $v_{x2} > v_{x1}$)^{*} (див. рис. 1.18). Кути відлічуються від додатного напрямку координатної осі (на рис. 1.18 – це вісь t) проти годинникової стрілки.

§ 5. Прискорення

Зміна швидкості

Реальні тіла, наприклад автомобіль, не можуть довго рухатися рівномірно і прямолінійно. Натискуванням педалі газу водій прискорює рух автомобіля, швидкість руху зростає. Натискуванням педалі гальма водій сповільнює рух автомобіля, швидкість руху зменшується. В процесі руху може змінитися не тільки модуль швидкості, а й напрям руху, тобто напрям швидкості. Для характеристики зміни швидкості в часі вводять ще одну характеристику руху – прискорення.

Прискорення (а) – векторна величина, що характеризує зміну швидкості руху матеріальної точки за модулем і напрямом.

^{*} Кути нахилу порівнюють, якщо вибрана одна й та сама система координат, тобто однаковий масштаб.



Рис. 1.19

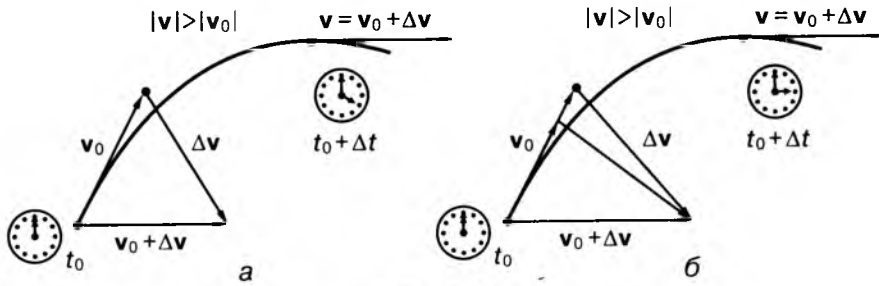


Рис. 1.20

Якщо рух прямолінійний рівномірний, то $\mathbf{v} = \text{const}$, швидкість тіла не змінюється ні за модулем, ні за напрямом, тому $\mathbf{a} = 0$.

Якщо рух прямолінійний нерівномірний, то швидкість тіла спрямлена вздовж прямої, котра відповідає траєкторії руху, тобто напрям руху не змінюється, а змінюється тільки модуль швидкості. На рис. 1.19 тіло рухається вздовж осі X .

Модуль швидкості в точці A більший за модуль швидкості в точці B :

$$|\mathbf{v}_{XA}| > |\mathbf{v}_{XB}|, \quad \Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_{XB} - \mathbf{v}_{XA}.$$

У процесі криволінійного руху завжди відбувається зміна руху за напрямом, оскільки вектор швидкості спрямлений по дотичній до траєкторії руху тіла. В часі модуль вектора швидкості може як не змінюватись (рис. 1.20, *a*), так і змінюватись (рис. 1.20, *б*). Сумістивши початок векторів \mathbf{v}_0 і \mathbf{v} , знайдемо їхню різницю $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$, тобто зміну швидкості за проміжок часу $t - t_0$.

Середнє прискорення

Середнє прискорення ($\langle \mathbf{a} \rangle$) – фізична величина, що дорівнює відношенню зміни швидкості матеріальної точки ($\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$) до тривалості проміжку часу ($\Delta t = t - t_0$), протягом якого ця зміна відбулася:

$$\langle \mathbf{a} \rangle = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}. \quad (1.24)$$

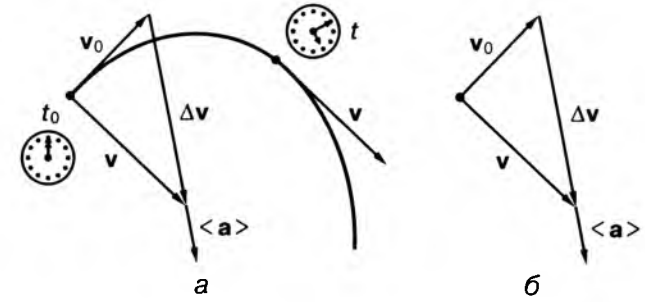


Рис. 1.21

Вектор середнього прискорення $\langle \mathbf{a} \rangle$ напрямлений так само, як вектор зміни швидкості $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$.

На рис. 1.21, *a* зображено ділянку траєкторії рухомої матеріальної точки. В момент часу t_0 швидкість точки \mathbf{v}_0 , а в момент часу t – швидкість \mathbf{v} .

У загальному випадку напрям вектора $\langle \mathbf{a} \rangle$ не збігається ні з напрямом вектора \mathbf{v}_0 , ні з напрямом вектора \mathbf{v} (рис. 1.21, *б*), вектор $\langle \mathbf{a} \rangle$ напрямлений у бік увігнутості або “всередину” траєкторії руху матеріальної точки (див. рис. 1.21, *a*).

Миттєве прискорення

Прискорення, як і швидкість, може змінюватися в часі. Прискорення матеріальної точки в даний момент часу ($\Delta t \rightarrow 0$) називають миттєвим прискоренням.

Миттєве прискорення (\mathbf{a}) – фізична величина, що дорівнює границі, до якої прямує середнє прискорення $\langle \mathbf{a} \rangle$ у разі наближення проміжку часу Δt до нуля ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \mathbf{a} \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}. \quad (1.25)$$

Враховуючи, що $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$, рівняння (1.25) набирає вигляду

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}. \quad (1.26)$$

Миттєве прискорення (\mathbf{a}) – векторна величина, що дорівнює першій похідній швидкості за часом.

Порівнюючи вирази (1.26) і (1.22), можна сказати, що прискорення – це швидкість зміни швидкості.

Тангенціальне і нормальне прискорення

У загальному випадку під час криволінійного руху вектор прискорення \mathbf{a} напрямлений всередину траєкторії під деяким кутом відносно неї (рис. 1.22). Розкладемо за правилом паралелограма вектор \mathbf{a} на дві складові. Одна складова (\mathbf{a}_τ) буде напрямлена вздовж дотичної до траєкторії руху матеріальної точки, а інша (\mathbf{a}_n) – вздовж нормалі до траєкторії, тобто перпендикулярно до дотичної в даній точці траєкторії.

Складова \mathbf{a}_n вектора прискорення \mathbf{a} , напрямлена вздовж нормалі до траєкторії в даній точці, називається *нормальним прискоренням*. Нормальне прискорення характеризує зміну вектора швидкості за напрямом у разі криволінійного руху.

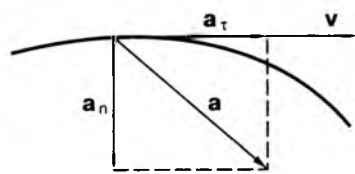


Рис. 1.22

Складова \mathbf{a}_τ вектора прискорення \mathbf{a} , напрямлена вздовж дотичної до траєкторії в даній точці, називається *тангенціальним* або *дотичним прискоренням*. Тангенціальне прискорення характеризує зміну вектора швидкості за модулем.

При прямолінійному русі швидкість тіла змінюється тільки за модулем, тобто $\mathbf{a}_n = 0$, тому $\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau$. Визначимо напрям прискорення стартуючого гоночного автомобіля на прямолінійній ділянці траєкторії (рис. 1.23). Швидкість v більша за v_0 , тобто автомобіль рухається прискорено. Тому вектор зміни швидкості $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$ напрямлений вздовж напрямку руху, отже, і вектор прискорення $\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau$ напрямлений вздовж напрямку руху (напряму швидкості)*.

Визначимо напрям прискорення автомобіля під час гальмування на прямолінійній ділянці шляху (рис. 1.24). Швидкість v менша за v_0 , тобто автомобіль рухається сповільнено, тому вектор зміни швидкості $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$ напрямлений протилежно напрямку руху, отже і вектор прискорення $\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau$ напрямлений протилежно напрямку руху (напряму швидкості).

Таким чином, вектори швидкості й прискорення – колінеарні** У разі прямолінійного прискореного руху вектор швидкості \mathbf{v} і вектор прискорення \mathbf{a} мають однаковий напрям (рівнонаправлені вектори): $\mathbf{v} \uparrow \uparrow \mathbf{a}$.

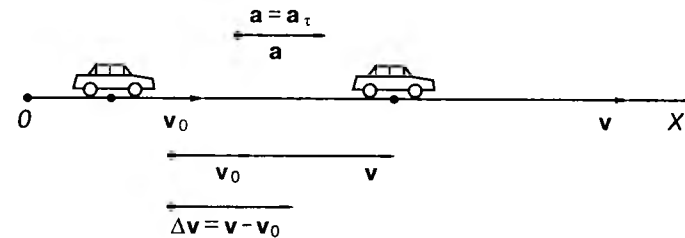


Рис. 1.23

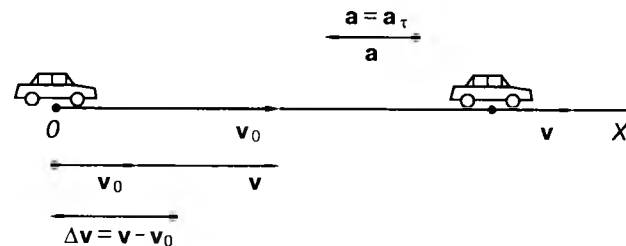


Рис. 1.24

У разі прямолінійного сповільненого руху вектор швидкості \mathbf{v} і вектор прискорення \mathbf{a} мають протилежні напрямки: $\mathbf{v} \uparrow \downarrow \mathbf{a}$.

Із рис. 1.22 видно, що $\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n$, а модулі векторів $|\mathbf{a}| = a$, $|\mathbf{a}_\tau| = a_\tau$, $|\mathbf{a}_n| = a_n$ зв'язані між собою співвідношенням

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1.27)$$

§ 6. Рівнозмінний прямолінійний рух

Рівноприскорений прямолінійний рух

Частим випадком нерівномірного прямолінійного руху є рівнозмінний рух.

Рівнозмінний рух – це рух, коли прискорення лишається сталим і за модулем, і за напрямом:

$$\mathbf{a} = \text{const}. \quad (1.28)$$

У разі рівнозмінного руху середнє прискорення $\langle \mathbf{a} \rangle$ дорівнює миттєвому прискоренню \mathbf{a} , тобто $\langle \mathbf{a} \rangle = \mathbf{a}$. Напрямо прискорення \mathbf{a} вздовж траєкторії руху матеріальної точки. Нормальне прискорення дорівнює нулю: $\mathbf{a}_n = 0$. Рівнозмінний рух може бути або рівноприскореним, або рівносповільненим.

* Напряму руху визначає напрям вектора швидкості.

** Колінеарними називають вектори, що лежать на паралельних або одній і тій самій прямій.

Рівноприскорений прямолінійний рух – це рух, коли прискорення є сталим за модулем і напрямом, а вектори швидкості та прискорення є рівнонаправленими:

$$\mathbf{a} = \text{const} \quad \mathbf{v} \uparrow \uparrow \mathbf{a}, \quad |\mathbf{a}| > 0.$$

Одиниця прискорення – метр за секунду в квадраті ($\text{м}/\text{с}^2$ або $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$).

Метр за секунду в квадраті дорівнює прискоренню тіла, що рухається прямолінійно і прискорено, коли за час 1 с швидкість точки змінюється на 1 м/с.

Враховуючи, що $\langle \mathbf{a} \rangle = \mathbf{a}$, можна записати

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t},$$

де $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$, $\Delta t = t - t_0$.

Отже,

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_0}{t - t_0}. \quad (1.29)$$

Якщо в момент початку відліку часу ($t_0 = 0$) відомо початкову швидкість \mathbf{v}_0 , то можна визначити швидкість \mathbf{v} у довільний момент часу t .

Із формули (1.29) випливає, що $\mathbf{a} = \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_0}{t}$ або $a = \frac{v - v_0}{t}$; звідси

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a}t \quad \text{або} \quad v = v_0 + at. \quad (1.30)$$

Якщо напрям руху сумістити з віссю X , то рівнянню (1.30) відповідатиме формула для проекції швидкості на цю координатну вісь

$$v_x = v_{0x} + at.$$

У разі рівноприскореного прямолінійного руху залежність швидкості руху матеріальної точки від часу є лінійною. Якщо початкова швидкість руху дорівнює нулю ($v_0 = 0$), то рівняння (1.30) має вигляд

$$\mathbf{v}_x = \mathbf{a}t \quad (1.31)$$

і відповідно

$$v = at.$$

Швидкість тіла, що рухається рівноприскорено прямолінійно, зростає в часі.

Графіком залежності швидкості від часу (1.31) є пряма, що проходить через початок координат ($t_0 = 0$, $v_0 = 0$). Кут нахилу прямої залежить від прискорення руху тіла: чим більше прискорення, тим більший кут нахилу (рис. 1.25):

$$a_2 > a_1 \quad \text{і} \quad \alpha_2 > \alpha_1.$$

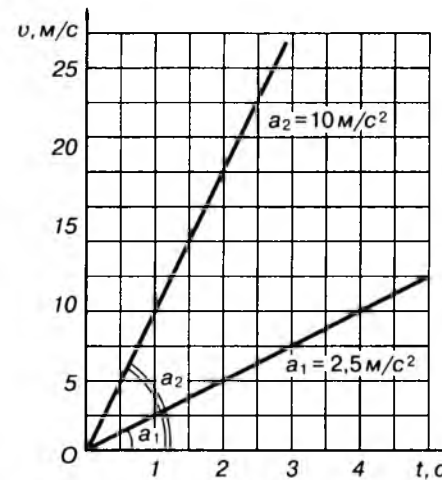


Рис. 1.25

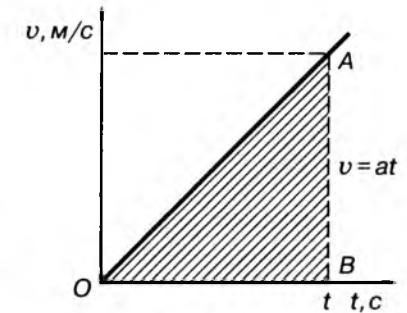


Рис. 1.26

Враховуючи, що модуль різниці координат рухомого тіла $|x - x_0| = x - x_0$ чисельно дорівнює площі під графіком залежності швидкості руху тіла від часу (див. рис. 1.17), визначимо різницю координат або шлях за умови, що в початковий момент часу ($t_0 = 0$) початкова швидкість дорівнює нулю: $v_0 = 0$. Різниця координат Δx рухомого тіла в момент часу t (рис. 1.26) чисельно дорівнює площі прямокутного трикутника OAB , катетами якого є час руху t і швидкість у цей момент часу $v = at$.

Площа цього трикутника дорівнює $\frac{AB \cdot OB}{2} = \frac{at^2}{2}$. Отже, різниця координат Δx у момент часу t дорівнюватиме

$$x - x_0 = \frac{at^2}{2} \quad \text{або} \quad \Delta x = \frac{at^2}{2}. \quad (1.32)$$

Враховуючи, що під час прямолінійного руху зміна координати рухомого тіла $\Delta x = x - x_0$ дорівнює шляхові $x - x_0 = S$, маємо

$$S = \frac{at^2}{2}. \quad (1.33)$$

Якщо початкова координата рухомого тіла $x_0 = 0$, то координата тіла в момент часу t , згідно з (1.32),

$$x = \frac{at^2}{2}. \quad (1.34)$$

Графіком функції $x = \frac{at^2}{2}$ є права частина параболи з вершиною в точці O , віссю параболи є вісь ординат (рис. 1.27). Гілки параболи напрямле-

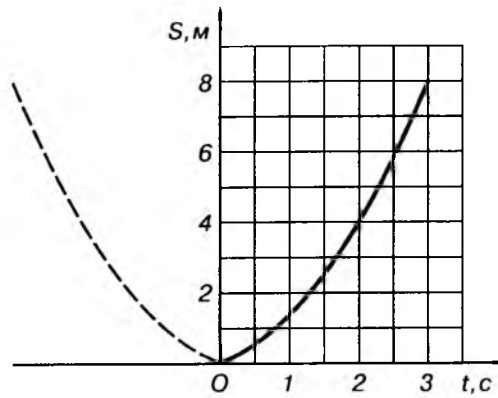


Рис. 1.27

ні ввєрх, оскїльки $a > 0$. Парабола має двї гїлки, проте лїва гїлка параболї не має фізичного змїсту, тому що рух тїла почався в момент часу $t_0 = 0$, при цьому $x_0 = 0$ і $v_0 = 0$. У початковий момент часу $t_0 = 0$ тїло перебувало в станї спокою, оскїлька початкова швїдкїсть дорївнювала нулю.

Якщо початкова швїдкїсть руху вїдмїнна вїд нуля, тобто $v_0 \neq 0$, то залежнїсть швїдкостї вїд часу визначається рївнянням (1.30), а графіком цїєї залежностї є пряма лїнія, котра починається на осї ординат ($t_0 = 0$) з точки v_0 (рис. 1.28).

На рис. 1.28 початкова швїдкїсть рївноприскореного руху $v_0 = 4$ м/с. Використовуючи формулу $a = \frac{v - v_0}{t} = \text{const}$, визначимо прискорення рухомого тїла.

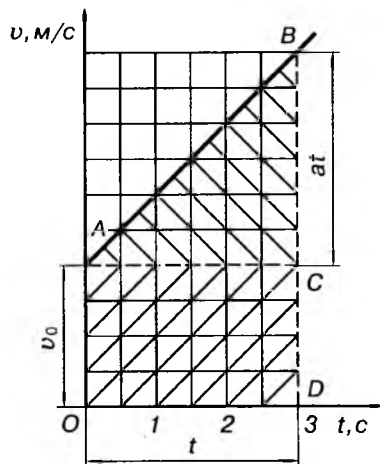


Рис. 1.28

За графіком визначимо швїдкїсть для будь-якого моменту часу, наприклад для $t = 3$ с, $v = 10$ м/с, тоді $a = \frac{10 - 4}{3} = 2$ м/с².

Рїзниця координат Δx рухомого тїла в момент часу t (наприклад, $t = 3$ с) (див. рис. 1.28) чисельно дорївнює площї трапеції $OABD$. Площа трапеції $OABD$ дорївнює сумї площ прямокутника $OACD$ і прямокутного трикутника ABC . Сторонами прямокутника є $OA = v_0$ та $OD = t$, його площа дорївнює $OA \cdot OD = v_0 t$.

Катетами прямокутного трикутника є $BC = at$ та $AC = t$, його площа дорївнює

$$\frac{BC \cdot AC}{2} = \frac{at^2}{2}.$$

Отже, площа трапеції або Δx дорївнює

$$\Delta x = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Враховуючи, що $\Delta x = x - x_0$, отримаємо

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.35)$$

Формула (1.35) виражає закон рївноприскореного прямолїнійного руху.

Нехай S пїд час рївноприскореного прямолїнійного руху дорївнює рїзницї координат $S = \Delta x = x - x_0$ і тому, як впливає з (1.35),

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (1.36)$$

Інколи, розв'язуючи задачу, потрібно виразити шлях через початкову і кїнцеву рїзницю, виключивши з розгляду час. Для цього розв'яжемо рївняння (1.30) $v = v_0 + at$ вїдносно часу t :

$$t = \frac{v - v_0}{a}.$$

Пїдставимо t у рївняння (1.36) і дїстанемо

$$S = v_0 \left(\frac{v - v_0}{a} \right) + \frac{a}{2} \left(\frac{v - v_0}{a} \right)^2 = \frac{v^2 - v_0^2}{2a};$$

отже,

$$S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}. \quad (1.37)$$

Рївносповїльнений прямолїнійний рух

Рївносповїльнений прямолїнійний рух – це рух, коли прискорення є сталим за модулем і напрямом, а вектори швїдкостї і прискорення протилежно напрямленї:

$$\mathbf{a} = \text{const}; \quad \mathbf{v} \updownarrow \mathbf{a}, \quad |\mathbf{a}| < 0.$$

У разї рївносповїльненого руху, як і рївноприскореного прямолїнійного руху, середнє прискорення дорївнює миттєвому: $\langle \mathbf{a} \rangle = \mathbf{a}$.

Зверніть увагу, що під час рівносповільненого руху прискорення є від'ємним, тому що вектори швидкості та прискорення протилежно напрямлені. За додатний напрям беруть напрям руху, тобто напрям швидкості. Коли розглядають рух вздовж осі X , то додатний напрям осі X і напрям швидкості збігаються.

Векторне рівняння (1.30) у проекції на вісь X матиме вигляд

$$v = v_0 - at. \quad (1.38)$$

Швидкість тіла під час рівносповільненого руху в часі лінійно зменшується.

Рівносповільнений рух триває до зупинення ($v = 0$). Із рівняння (1.38) можна визначити час цього руху: $0 = v_0 - at$, звідки $t = \frac{v_0}{a}$.

Отже, під час рівносповільненого прямолінійного руху швидкість у початковий момент часу ($t = 0$) дорівнює початковій швидкості: $v = v_0$, а в момент часу $t = \frac{v_0}{a}$ швидкість тіла $v = 0$.

Графіком залежності швидкості від часу (1.38) є пряма, що проходить через координати $(0, v_0)$ та $(\frac{v_0}{a}, 0)$. На рис. 1.29 зображено графік рівносповільненого прямолінійного руху, початкова швидкість якого $v_0 = 10$ м/с, час руху 5 с, модуль прискорення $a = \frac{v_0}{t} = \frac{10}{5} = 2$ м/с².

За графіком, наведеним на рис. 1.29, можна знайти різницю координат або шлях, який пройде тіло до зупинення. Для цього визначимо площу прямокутного трикутника OAB :

$$\frac{OA \cdot OB}{2} = \frac{v_0^2}{2a}.$$

Отже,

$$S = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{10^2}{2 \cdot 2} = 25 \text{ м}.$$

На рис. 1.30 зображено графіки прямолінійних рівносповільнених рухів з різними прискореннями. З рисунку видно, що тіла, які мають однакову швидкість, рухатимуться до зупинення різний час. Чим більшим є модуль прискорення під час рівносповільненого руху, тим швидше зміниться швидкість і тим раніше тіло зупиниться. Через 1 с після початку руху перше тіло матиме швидкість 5 м/с, друге – 8 м/с. Перше тіло зупиниться через 2 с, друге – через 5 с.

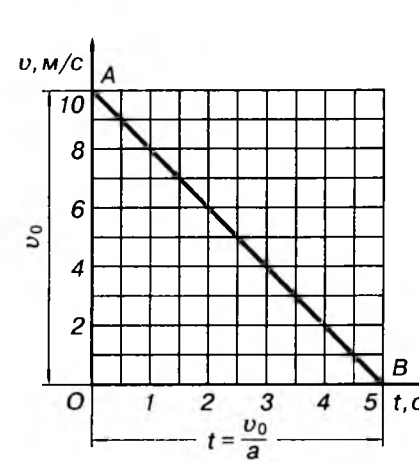


Рис. 1.29

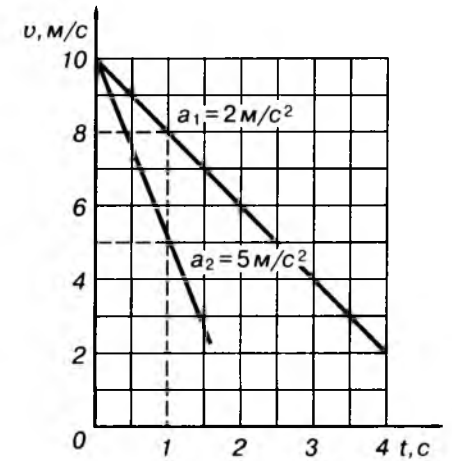


Рис. 1.30

Закон прямолінійного рівносповільненого руху можна отримати з виразу (1.35), враховуючи, що під час цього руху прискорення від'ємне:

$$x = x_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2}. \quad (1.39)$$

Шлях, який проходить тіло під час рівносповільненого руху, дорівнює

$$S = v_0 t - \frac{at^2}{2}. \quad (1.40)$$

§ 7. Вільне падіння

Досліди Галілея

Вивчення вільного падіння тіл видатним італійським фізиком і астрономом, одним із засновників точного природознавства Г. Галілеєм (1564–1642) стало початком фізики як експериментальної науки.

Під час падіння будь-якого тіла на Землю зі стану спокою його швидкість збільшується, тобто тіло рухається прискорено. Із спостереження за падінням різних тіл (наприклад, пташиного пера і каменю) можна зробити висновок, що чим легшим є тіло, тим менше його прискорення. Дійсно, перо падає в повітрі значно повільніше, ніж камінь. Але Г. Галілей висуває гіпотезу про те, що вільнопадаючі тіла (або ті, що скочуються по похилій площині) одержуватимуть рівні прирости швидкості в рівні проміжки часу, тобто рухатимуться з постійним для всіх тіл прискоренням. Іншими словами, якби не було опору повітря, всі тіла на Землю падали б однаково.

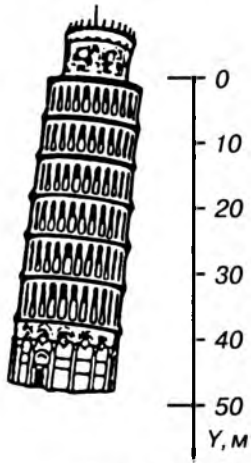


Рис. 1.31

Для перевірки свого припущення Галілей проводить серію дослідів. Найбільш відомими є досліди зі спостереження падіння куль з Пізанської башти (рис. 1.31). Скинуті з похилої Пізанської башти чавунна та дерев'яна кулі однакових розмірів упали на землю майже одночасно. Г. Галілей пояснив різницю в часі падіння куль опором повітря. Він повторював і варіював досліди, вивчав падіння тіл і в лабораторних умовах, по похилому жолобу. Оскільки Галілей мав потребу в годиннику для вимірювання малих інтервалів часу, він винайшов для цього водяний годинник. За його допомогою він міг порівнювати різні часові інтервали з точністю 0,1 с. Вивчаючи рух дерев'яних та зроблених зі слонової кістки куль по похилому жолобу, кут нахилу якого можна було змінювати,

Г. Галілей установив, що відстань, котру проходить куля по жолобу, пропорційна квадрату часу руху: $x \sim t^2$. Більше того, він показав, що це слушно для всіх кутів нахилу жолоба, для яких він зміг виконати виміри, отже, і для кута 90° . На підставі дослідів він робить висновок, що вільнопадаюче тіло підлягає законові $x \sim t^2$. Вивчаючи й описуючи ці досліди, Г. Галілей вводить у фізику нове поняття – *прискорення*. Г. Галілей – один із основоположників класичної механіки – перший звернувся до фізичного досліду і надав йому правильні математичні описи.

Пізніше було створено вакуумні насоси, і досліди Галілея багаторазово повторювалися. Щоб виключити дію сили опору повітря зі скляної трубки, в якій розміщували різні предмети, відкачували повітря. Тоді предмети, що в ній були, наприклад пушинка та дробинка, падали в одному темпі, тобто синхронно. Сучасна техніка дозволяє перевірити гіпотезу Галілея з більшою точністю, використовуючи, наприклад, стробоскопічне освітлення.

Із рис. 1.32 (шкала наведена в сантиметрах) видно, що дві кульки різної маси падають синхронно. Ця стробоскопічна фотографія отримана при відчиненому затворі камери і спалахах світла, що періодично повторювалися з часовим інтервалом $1/40$ с.

Із вимірювань, зроблених за допомогою такої апаратури, випливає, що тіла падають з прискоренням 980 см/с^2 .

Прискорення вільного падіння (g) – це прискорення, з яким падають всі тіла на Землю незалежно від їхньої маси за відсутності сил опору повітря.

* Стробоскопічний ефект – зорова ілюзія, котра виникає, якщо спостереження будь-якого предмета здійснюється не неперервно, а протягом окремих малих інтервалів часу, що періодично йдуть один за одним (окремі кадри). На цьому ефекті засноване сприйняття руху в кінематографі та телебаченні.

Якщо тіло вільно падає з невеликої висоти h від поверхні Землі ($h \ll R_3$, де R_3 – радіус Землі), воно рухається зі сталим прискоренням $|g| = 9,8 \text{ м/с}^2$, напрямленим вертикально вниз.

Прискорення вільного падіння залежить від широти місцевості φ та висоти над рівнем моря. Розв'язуючи задачі, для простоти обчислень іноді вважають, що $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Вільне падіння

Вільне падіння тіла з висоти h є аналогічним рівноприскореному руху вздовж осі Y , додатний напрям якої збігається з напрямом вектора g . Враховуючи, що $g = \text{const}$, рівняння руху матиме вигляд [див. вираз (1.35)]

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}. \quad (1.41)$$

Швидкість вільнопадаючого тіла змінюється за законом [див. формулу (1.30)]

$$v = v_0 + gt. \quad (1.42)$$

Якщо в момент часу $t_0 = 0$ напрями векторів v_0 і g збігалися, то в проекції на вісь Y

$$v_y = v_{0y} + gt. \quad (1.42a)$$

Вільне падіння без початкової швидкості ($v_0 = 0$) є аналогічним рівноприскореному руху, що відбувається вздовж осі Y , додатний напрям якої збігається з напрямом вектора g , а початок відліку O ($t_0 = 0$; $y_0 = 0$) знаходиться у верхній точці траєкторії вільнопадаючого тіла. Закон руху вздовж осі Y у такому разі має вигляд

$$y = \frac{gt^2}{2}, \quad (1.43)$$

а залежність швидкості руху тіла вздовж осі Y від часу

$$v = gt, \quad (1.44)$$

або

$$v_y = gt. \quad (1.44a)$$

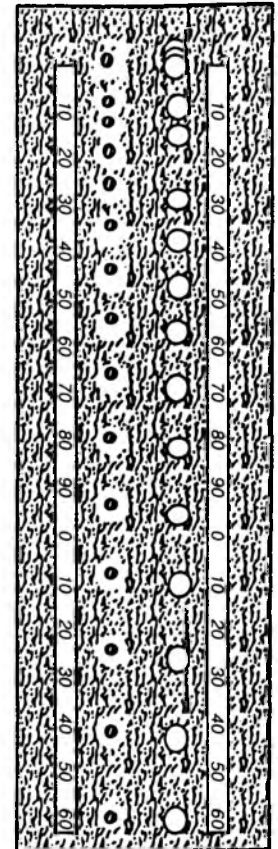


Рис. 1.32

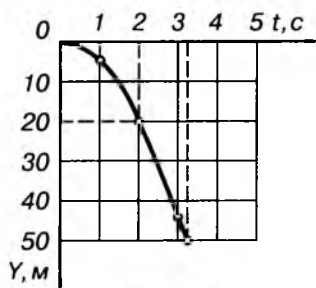


Рис. 1.33

Графік функції $y = \frac{gt^2}{2}$ є частиною параболи з вершиною в точці O ; віссю параболи є вісь ординат (для простоти розрахунку братимемо $g = 10,0 \text{ м/с}^2$, рис. 1.33). За графіком можна визначити час падіння тіла з певної висоти. Наприклад, якщо будь-яке тіло падає з висоти 20 м, то час падіння тіла (див. рис. 1.33) на Землю становить близько 2 с (якщо $g = 10 \text{ м/с}^2$).

Час падіння тіла на Землю з висоти h можна визначити, якщо в формулу (1.43) підставити $y = h$:

$$h = \frac{gt^2}{2},$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \quad (1.45)$$

звідки

Графіком функції $v_y = gt$ є пряма, що проходить через початок координат. Для вільного падіння з певної висоти h фізичний зміст має лише відрізок прямої в інтервалі часу від $t_0 = 0$ до $t = t_n$, де t_n – час падіння тіла на Землю. У розглянутому випадку ($h = 20 \text{ м}$) тіло через 2 с впаде на Землю зі швидкістю 20 м/с (рис. 1.34).

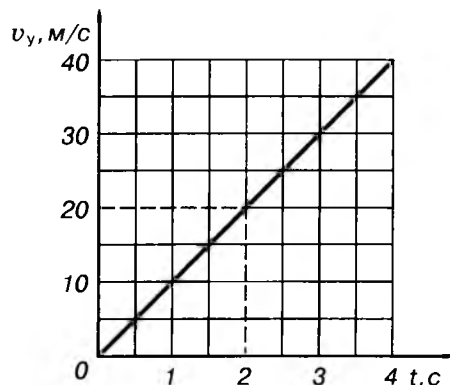


Рис. 1.34

§ 8. Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту

Траєкторія руху

Якщо тілу надати початкову швидкість v_0 під кутом α до горизонту, то його рух буде криволінійним. Цей рух можна розглядати в площині XOY як результат додавання двох прямолінійних рухів – рівно-

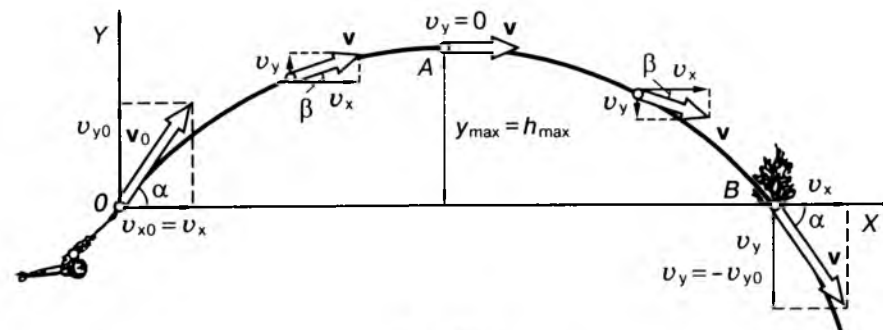


Рис. 1.35

мірного руху вздовж осі X до рівнозмінного руху вздовж осі Y з прискоренням g (рис. 1.35). Подібні траєкторії мають артилерійські снаряди, футбольні м'ячі, списи, що летять.

Визначимо траєкторію руху, нехтуючи силами опору повітря, кривиною поверхні Землі та її обертанням навколо власної осі.

У вибраній системі відліку для початкового моменту часу $t_0 = 0$

$$x_0 = 0; \quad y_0 = 0;$$

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha; \quad v_{0y} = v_0 \sin \alpha.$$

Закон рівномірного руху вздовж осі X має вигляд

$$x = x_0 + v_{0x}t.$$

З урахуванням початкових умов

$$x = (v_0 \cos \alpha)t. \quad (1.46)$$

Закон рівнозмінного руху вздовж осі Y має вигляд

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2},$$

або з урахуванням початкових умов

$$y = (v_0 \sin \alpha)t - \frac{gt^2}{2}. \quad (1.47)$$

Отже, маємо систему двох рівнянь:

$$x = (v_0 \cos \alpha)t; \quad y = (v_0 \sin \alpha)t - \frac{gt^2}{2}.$$

Щоб визначити траєкторію руху, слід з рівнянь виключити час. Виразимо час з першого рівняння:

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$$

і підставимо в друге рівняння:

$$y = \frac{xv_0 \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha} - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}.$$

Скорочуючи v_0 у першому доданку та враховуючи, що $\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$, одержуємо траєкторію руху тіла, кинутого під кутом α до горизонту:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2. \quad (1.48)$$

Графіком одержаної квадратичної залежності (1.48) є парабола, що проходить через початок координат. Гілки параболи напрямлені вниз, оскільки коефіцієнт $\left(-\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}\right)$ при x^2 від'ємний, а вершина параболи знаходиться в найвищій точці підйому тіла (на рис. 1.35 точка A).

Найбільша висота підйому

Найбільшу висоту підйому $h_{\max} = y_{\max}$ можна визначити з рівняння (1.47), якщо буде відомим час руху від точки O до A , тобто час підйому.

У процесі руху тіла від точки O до A швидкість тіла змінюється. Рух вздовж осі Y буде рівносповільненим: $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$. У найвищій точці підйому вектор швидкості \mathbf{v} паралельний осі X (див. рис. 1.35), тому проекція \mathbf{v} на вісь Y дорівнює нулю:

$$v_0 \sin \alpha - gt_{\text{під}} = 0.$$

Отже, час підйому

$$t_{\text{під}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}. \quad (1.49)$$

Підставивши відшуканий час підйому в рівняння (1.47), дістанемо

$$y_{\max} = v_0 \sin \alpha \frac{v_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2,$$

$$y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} - \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Таким чином,

$$h_{\max} = y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (1.50)$$

Кут α змінюється в межах $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$. Найбільша висота підйому пропорційна квадрату початкової швидкості і є максимальною, коли кут кидання $\alpha = \frac{\pi}{2}$, оскільки $\sin \frac{\pi}{2} = 1$. У цьому разі тіло рухається прямолінійно вертикально вгору і висота підйому, як випливає з (1.50),

$$h = \frac{v_0^2}{2g}. \quad (1.51)$$

Дальність польоту

Дальність польоту визначається координатою падіння тіла на поверхню Землі, тобто координатою точки B (див. рис. 1.35).

Координату точки B визначимо з рівняння (1.46), підставивши в нього час польоту від точки A до точки B .

Оскільки парабола є симетричною відносно вершини (точки A), то час підйому дорівнює часу падіння, тобто час польоту t дорівнює подвоєному часу підйому $t_{\text{під}}$:

$$t = 2t_{\text{під}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}. \quad (1.52)$$

Підставивши (1.52) в рівняння (1.46), маємо

$$x_{\max} = v_0 \cos \alpha \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Враховуючи, що $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$, одержимо

$$x_{\max} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}. \quad (1.53)$$

Як видно з формули (1.53), дальність польоту при даній початковій швидкості v_0 буде найбільшою, коли $\sin 2\alpha = 1$, або $2\alpha = \frac{\pi}{2}$, $\alpha = \frac{\pi}{4}$ (рис. 1.36).

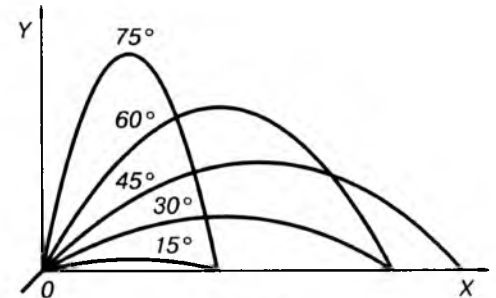


Рис. 1.36

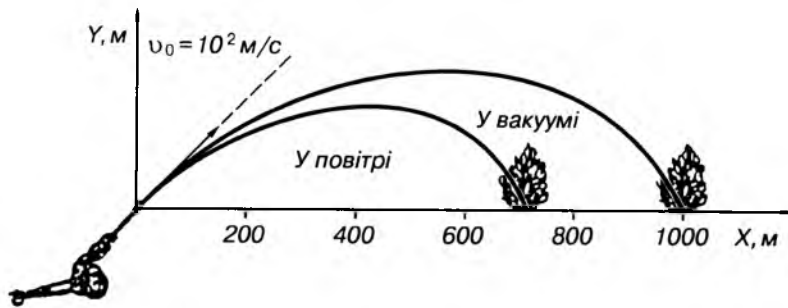


Рис. 1.37

Якщо опором повітря знехтувати, то максимальна дальність польоту тіла буде при куті кидання 45° до горизонту.

Реальний рух тіл у повітрі відбувається за траєкторією, що відрізняється від параболічної; тіло рухається несиметричною – балістичною – кривою. Ця крива в своїй висхідній гілці крутіша за параболу. На рис. 1.37 наведені траєкторії руху: ідеальна (у вакуумі) та реальна (в повітрі). Траєкторія змінюється тому, що на рухоме тіло діє опір повітря, котрий залежить як від форми тіла, так і від швидкості його руху. Чим більшою є швидкість тіла, тим сильніше реальна траєкторія руху відрізняється від параболі. Як показують досліди, найбільша дальність польоту в повітрі снарядів досягається при кутах, дещо менших за 45° .

Описом руху тіл в атмосфері з урахуванням опору повітря займається балістика.

§ 9. Рівномірний рух колом

Рух колом як періодичний рух

Рух колом є найпростішим прикладом періодичного руху.

Періодичний рух – це рух, який повторюється через певний проміжок часу. Наприклад, обертання Землі навколо власної осі, обертання Землі навколо Сонця. Характеристикою періодичного руху є період.

Період T – мінімальний проміжок часу, через який рух повторюється, тобто час одного оберту.

Одиниця періоду – секунда (с).

Знаючи період обертання, можна визначити частоту обертання.

Частота обертання ν – величина, що показує число обертів в одиницю часу:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (1.54)$$

Одиниця частоти – секунда в мінус першому степені (с^{-1}).

Одна с^{-1} дорівнює частоті рівномірного обертання, з якою за час 1 с тіло здійснює один повний оберт.

Період обертання Землі навколо власної осі – одна доба, тобто 24 години:

$$T = 1 \text{ доба} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ с.}$$

Внаслідок того, що Земля обертається навколо власної осі, відбувається зміна часу доби: ранок – день – вечір – ніч. Навколо власної осі обертаються Місяць, Сонце і планети.

Періоди обертання планет навколо осі

Небесне тіло	Період обертання T планет навколо осі, діб	Небесне тіло	Період обертання T планет навколо осі, діб
Сонце	25,4	Земля	1
Меркурій	58,6	Марс	1,03
Венера	243	Місяць	27,3

Період обертання Землі навколо Сонця – 1 рік:

$$T = 1 \text{ рік} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с.}$$

Внаслідок того, що Земля обертається навколо Сонця, відбувається зміна часу року: весна – літо – осінь – зима. Періоди обертання планет Сонячної системи навколо Сонця такі.

Періоди обертання планет навколо Сонця

Планети	Період обертання, рік	Планети	Період обертання, рік
Меркурій	0,24	Сатурн	29,46
Венера	0,615	Уран	84,02
Земля	1	Нептун	164,79
Марс	1,88	Плутон	247,70
Юпітер	11,86		

Землю, що рухається навколо Сонця, можна розглядати як матеріальну точку, оскільки радіус Землі ($R_{\oplus} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$) набагато менший за середню відстань від Землі до Сонця. Середня відстань від Землі до Сонця називається однією астрономічною одиницею (1 а.о.).

$$1 \text{ а.о.} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м.}$$

Траєкторія Землі навкруг Сонця – еліпс, але фокуси еліпса близько розташовані один до одного, тому можна вважати, що Земля навколо Сонця рухається колом радіуса $R = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$. За один оберт, тобто за час, що дорівнює періоду $T = 1 \text{ рік} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$, Земля проходить шлях, який дорівнює довжині кола $S = 2\pi R$, рухаючись із середньою швидкістю $\langle v \rangle$:

$$\langle v \rangle = \frac{S}{T} = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{11}}{3,16 \cdot 10^7} \approx 2,9 \cdot 10^4 \text{ м/с.}$$

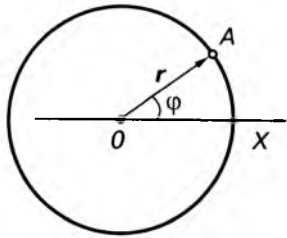


Рис. 1.38

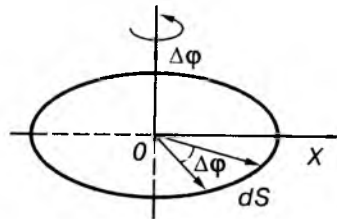


Рис. 1.39

Швидкість руху тіла колом називають *лінійною швидкістю*.

Радіус кола, яким рухається тіло, є величиною сталою: $r = \text{const}$. Проведемо координатну вісь X через центр кола O (рис. 1.38). Центр кола O – початок координат. Положення точки A на колі в будь-який момент часу точно визначається кутом φ між додатним напрямом осі X і радіусом-вектором \mathbf{r} , проведеним з початку координат до рухомої точки. Кут φ відлічується від додатного напрямку осі X до радіуса-вектора \mathbf{r} проти годинникової стрілки. Кути виражають у радіанах. Кут 360° відповідає 2π радіан.

У разі, коли радіус-вектор \mathbf{r} повертає на кут $\varphi = 2\pi$ рад, точка проходить шлях S , що дорівнює довжині кола $S = 2\pi r$; коли радіус-вектор \mathbf{r} повертає на кут $\Delta\varphi$, точка проходить шлях, що дорівнює довжині дуги ΔS . Із пропорції $2\pi : 2\pi r = \Delta\varphi : \Delta S$ визначимо ΔS :

$$\Delta S = \frac{2\pi r \cdot \Delta\varphi}{2\pi} = r \cdot \Delta\varphi. \quad (1.55)$$

Лінійний шлях ΔS дорівнює добутку модуля радіуса-вектора $|\mathbf{r}|$ точки на його кут повороту $\Delta\varphi$. Кут φ змінюється в межах $0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

Елементарні повороти радіуса-вектора \mathbf{r} можна розглядати як вектори; вони позначаються $\Delta\varphi$. Модуль вектора $|\Delta\varphi|$ дорівнює куту повороту, а його напрям збігається з напрямом поступального руху вістря гвинта, головка якого обертається в напрямку руху точки колом, тобто визначається за правилом правого гвинта (рис. 1.39).

Вектор, напрям якого зв'язують з напрямом обертання, називається *псевдовектором*. У механіці це – кутова швидкість, кутове прискорення.

Рівномірний рух точки колом

Рівномірний рух колом – це такий рух, коли точка рухається із сталою за модулем лінійною швидкістю:

$$|\mathbf{v}| = \text{const}.$$

У разі рівномірного руху колом за однакові проміжки часу:

- точка проходить однакові за довжиною дуги кола;
- радіус-вектор точки повертає на однакові кути.

Напрямок і швидкість повороту радіуса-вектора рухомої колом точки характеризує кутова швидкість.

Кутова швидкість ω – векторна величина, що дорівнює відношенню кута повороту радіуса-вектора $\Delta\varphi$ до проміжку часу Δt , за який цей поворот відбувся:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad (1.56)$$

звідки

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t. \quad (1.57)$$

Одиниця кутової швидкості – радіан на секунду (рад/с).

Радіан на секунду дорівнює кутовій швидкості рівномірно обертової точки, радіус-вектор якої за час 1 с повертається на кут 1 рад.

Модуль кутової швидкості можна виразити через період обертання T . За час, що дорівнює періоду ($\Delta t = T$), радіус-вектор точки повертається на кут 2π ($\Delta\varphi = 2\pi$).

Згідно з формулою (1.56)

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (1.58)$$

Застосовуючи співвідношення (1.54) і (1.58), виразимо кутову швидкість через частоту обертання:

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (1.59)$$

Між модулем лінійної швидкості v точки, що обертається колом, і модулем її кутової швидкості ω існує зв'язок. За проміжок часу Δt точка проходить шлях $\Delta S = v \Delta t$, а радіус-вектор повертається на кут $\Delta\varphi = \omega \Delta t$. Підставляючи знайдені величини в рівняння (1.55), одержуємо

$$v \Delta t = r \omega \Delta t,$$

або

$$v = \omega r. \quad (1.60)$$

Модуль лінійної швидкості точки, що рухається колом, дорівнює добутку модуля кутової швидкості на радіус кола. З формули (1.60) випливає, що чим більшим є радіус кола, тим більша лінійна швидкість. Лінійна швидкість обертання Землі навколо власної осі є максимальною в точках екватора, а мінімальною (нульовою) – на полюсах.

Доцентрове прискорення

У разі рівномірного обертання модуль лінійної швидкості – стала величина, отже, тангенціальне або дотичне прискорення \mathbf{a}_τ дорівнює нулю: $\mathbf{a}_\tau = 0$. Змінення вектора швидкості \mathbf{v} за напрямом характеризує нормальне або доцентрове прискорення \mathbf{a}_n .

Вектор швидкості \mathbf{v} у будь-якій точці кола напрямлений вздовж дотичної до неї. Розглянемо положення рухомої точки в двох точках на колі (M_0 і M) у близькі моменти часу t і $t + \Delta t$ (рис. 1.40). За проміжок часу Δt радіус-вектор повернеться на кут $\Delta\varphi$, точка переміститься на Δr , швидкість зміниться на Δv . Модуль зміни швидкості $|\Delta v|$ дорівнює стороні AB трикутника M_0AB , побудованого на векторах швидкостей як на сторонах.

Рівнобедрені трикутники M_0OM і AM_0B подібні, оскільки $\angle M_0OM = \angle AM_0B = \Delta\alpha$ як кути із взаємно перпендикулярними сторонами. З подібності трикутників випливає, що

$$\frac{\Delta v}{\Delta r} = \frac{v}{r},$$

звідки

$$\Delta v = \frac{v}{r} \Delta r.$$

За означенням, миттєве прискорення $a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$.

Враховуючи вираз, отриманий для Δv , дістанемо

$$a_n = \frac{v}{r} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t}.$$

Оскільки $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = v$, то

доцентрове прискорення

$$a_n = \frac{v^2}{r}. \quad (1.61)$$

Вектор \mathbf{a}_n напрямлений, як і вектор Δv , за радіусом до центра кола O , тому що при $\Delta t \rightarrow 0$, $\Delta\varphi \rightarrow 0$ і $\angle M_0AB = \angle M_0BA = \frac{\pi - \Delta\varphi}{2} \rightarrow \frac{\pi}{2}$. Отже, у разі рівномірного руху матеріаль-

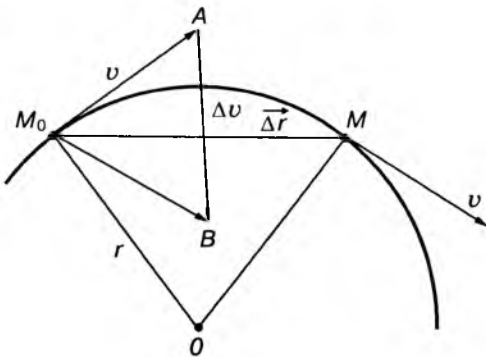


Рис. 1.40

ної точки колом її прискорення напрямлене перпендикулярно до швидкості, за радіусом до центра кола, і тому його називають *нормальним* або *доцентровим*.

Враховуючи зв'язок між лінійною та кутовою швидкістю (1.60) і формулу (1.61), дістанемо

$$a_n = \omega^2 r. \quad (1.62)$$

§ 10. Рівнозмінний рух колом

Миттєва кутова швидкість

Рівномірний рух точки колом – це окремий випадок. Частіше спостерігається обертальний рух, коли кутова швидкість з плином часу змінюється. Такий рух характеризується середньою кутовою швидкістю $\langle \omega \rangle$.

Середня кутова швидкість руху точки колом навкруг заданого центра $\langle \omega \rangle$ – це вектор, модуль якого дорівнює відношенню кута повороту $\Delta\varphi$ радіуса-вектора \mathbf{r} точки за проміжок часу Δt до тривалості цього проміжку:

$$|\langle \omega \rangle| = \langle \omega \rangle = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.63)$$

Напрямок вектора $\langle \omega \rangle$ визначається за правилом правого гвинта. Якщо змінити напрям обертання тіла, то зміниться і напрям вектора кутової швидкості.

Середня кутова швидкість є приблизною характеристикою обертального руху.

Миттєва кутова швидкість ω – фізична величина, модуль якої дорівнює границі, до якої прямує модуль середньої кутової швидкості при наближенні проміжку часу до нуля ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \omega \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (1.64)$$

Миттєву кутову швидкість називають просто кутовою швидкістю.

Модуль кутової швидкості дорівнює похідній від кута повороту радіуса-вектора обертаної точки за часом. Вектор кутової швидкості ω збігається за напрямом з вектором середньої кутової швидкості $\langle \omega \rangle$.

У разі рівномірного обертання точки миттєва кутова швидкість дорівнює середній кутовій швидкості: $\omega = \langle \omega \rangle = \text{const}$.

Миттєва лінійна швидкість обертаної точки [див. формулу (1.21)] з урахуванням (1.55)

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r \Delta\varphi}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{d\varphi}{dt} = r\omega.$$

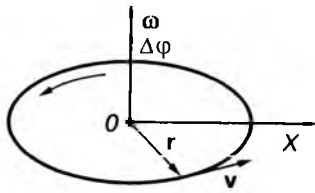


Рис. 1.41

Отже,

$$v = r\omega. \quad (1.65)$$

Співвідношення (1.65) пов'язує модулі миттєвих лінійної та кутової швидкостей обертової точки.

Вектор миттєвої лінійної швидкості дорівнює векторному добутку векторів ω і r (рис. 1.41):

$$v = [\omega r]. \quad (1.66)$$

Модуль векторного добутку дорівнює

$$v = \omega r \sin(\omega r).$$

Як бачимо з рис. 1.41, кут між векторами ω і r дорівнює $\frac{\pi}{2}$, тому $\sin(\omega r) = 1$, тобто отриманий вираз збігається з виразом (1.60).

Кутове прискорення

Кутове прискорення (ϵ) – векторна величина, що характеризує швидкість змінення кутової швидкості.

У разі рівномірного обертання $\omega = \text{const}$, тобто кутова швидкість не змінюється, тому $\epsilon = 0$.

У разі нерівномірного обертального руху матеріальної точки кутова швидкість її ω у часі змінюється.

Середнє кутове прискорення $\langle \epsilon \rangle$ – фізична величина, яка дорівнює відношенню зміни кутової швидкості ($\Delta\omega = \omega - \omega_0$) до тривалості проміжку часу ($\Delta t = t - t_0$), протягом якого ця зміна відбулася:

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\omega - \omega_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (1.67)$$

Миттєве кутове прискорення ϵ – фізична величина, що дорівнює границі, до якої прямує середнє кутове прискорення $\langle \epsilon \rangle$ при наближенні проміжку часу Δt до нуля ($\Delta t \rightarrow 0$):

$$\epsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \epsilon \rangle = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.68)$$

Кутове прискорення ϵ – векторна величина, яка дорівнює першій похідній кутової швидкості за часом. Отже, кутове прискорення – це швидкість змінення кутової швидкості.

Якщо в обертальному русі тіла $\epsilon = \text{const}$, то такий рух називають *рівномірним обертанням*.

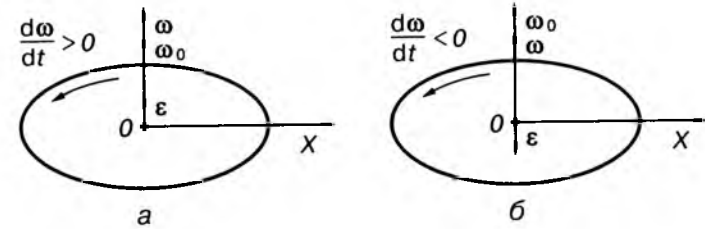


Рис. 1.42

Якщо $\epsilon = \frac{d\omega}{dt} > 0$, кутова швидкість зростає – рух *рівноприскорений* (рис. 1.42, а).

Якщо $\epsilon = \frac{d\omega}{dt} < 0$, кутова швидкість зменшується – рух *рівносповільнений* (рис. 1.42, б).

Коли тіло обертається навколо нерухомої точки, напрям вектора ω зберігається. Вектор ϵ збігається за напрямом з вектором ω у разі прискореного обертання ($\epsilon > 0$) і протилежний йому за напрямом у разі сповільненого обертання ($\epsilon < 0$) (див. рис. 1.42, а, б).

Одиниця кутового прискорення – радіан на секунду в квадраті ($\text{рад}/\text{с}^2$).

Радіан на секунду в квадраті дорівнює кутовому прискоренню рівноприскорено обертової матеріальної точки, при якому за час 1 с кутова швидкість точки змінюється на 1 рад/с.

Із зміною кутової швидкості змінюється і її лінійна швидкість. Зміна лінійної швидкості за напрямом характеризує нормальне прискорення, яке [див. формулу (1.62)] залежить від кутової швидкості і не залежить від кутового прискорення.

Зміна величини лінійної швидкості характеризує тангенціальне прискорення:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}$$

або, враховуючи, що $v = \omega r$, дістанемо

$$a_\tau = r\epsilon. \quad (1.69)$$

Співвідношення (1.69) зв'язує модулі миттєвого тангенціального і кутового прискорень обертової точки. Модуль тангенціального прискорення точки, що рухається колом, дорівнює добутку модуля кутового прискорення на радіус кола. З формули (1.69) випливає, що чим більший радіус кола, тим більше тангенціальне прискорення.

При рівноприскореному обертанні кутова швидкість у довільний момент часу t , як випливає з рівняння (1.69), визначається за формулою

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon(t - t_0). \quad (1.70)$$

Якщо при $t_0 = 0$ початкова кутова швидкість тіла ω_0 , то рівняння (1.70) має вигляд

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t. \quad (1.71)$$

Якщо при $t_0 = 0$ початкова кутова швидкість $\omega_0 = 0$, то

$$\omega = \varepsilon t. \quad (1.72)$$

Короткі висновки

- Кінематика – розділ механіки, який вивчає рух тіл без урахування чинників, що призводять до нього.
- Механічний рух – змінення взаємного положення тіл або їх частин у просторі протягом часу.
Механічний рух відбувається в просторі та часі. Просторово-часовий опис руху можливий тільки тоді, коли вибрано певну систему відліку.
- Система відліку – сукупність тіла відліку, пов'язаної з ним системи координат та синхронізованих між собою годинників.
Для описування механічного руху найбільш зручною є інерціальна система відліку, оскільки в ній закони механіки мають найпростіший вигляд.
У класичній механіці просторові та часу приписують абсолютний характер; лінійні масштаби і проміжки часу залишаються незмінними у разі переходу від однієї системи відліку до іншої, тобто не залежать від вибору системи відліку.
- Матеріальна точка – тіло, розмірами якого в даній задачі можна знехтувати. За матеріальну точку, наприклад, вважають Землю, розглядаючи її рух навколо Сонця.
- Тверде тіло – система матеріальних точок, відстань між якими не змінюється в процесі руху.
- Положення рухомої точки M (або тіла) звичайно розглядається в декартовій (прямокутній) системі координат. У даний момент часу воно визначається трьома просторовими координатами (x, y, z) або радіусом-вектором \mathbf{r} , проведеним з початку системи координат до точки M (див. рис. 1.1).
- Траєкторія – лінія, що описується в просторі рухомою матеріальною точкою (або тілом). За формою траєкторії механічний рух класифікується як прямолінійний і криволінійний. Траєкторія даного механічного руху в різних системах відліку може мати різну форму.
- Довжина шляху S – сума довжин усіх ділянок траєкторій, що пройдені матеріальною точкою за розглядуваний проміжок часу. Довжина шляху – величина скалярна.
Довжина шляху вимірюється в метрах (м).
- Переміщення $\Delta \mathbf{r}$ – вектор, проведений з початкового в кінцеве положення рухомої матеріальної точки.

Рух тіла поступальний, якщо будь-яка пряма, що сполучає дві будь-які точки тіла, залишається в процесі руху паралельною самій собі.

- Прямолінійний рух – рух, траєкторія якого в даній системі відліку є прямою лінією.
У прямолінійному русі вектор переміщення збігається з відповідною ділянкою траєкторії і модуль переміщення $|\Delta \mathbf{r}|$ дорівнює пройденому шляху ΔS :

$$|\Delta \mathbf{r}| = \Delta S.$$

- Середня швидкість $\langle v \rangle$ на ділянці траєкторії ΔS дорівнює відношенню довжини цієї ділянки до часу Δt , за який пройдено цю ділянку:

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Середня швидкість залежить від вибору ділянки траєкторії. За значенням середньої швидкості на певній ділянці не можна визначити переміщення тіла за весь час руху.

- Миттєва швидкість \mathbf{v} – векторна величина, що дорівнює першій похідній за часом від радіуса-вектора розглядуваної матеріальної точки:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}.$$

Вектор швидкості завжди напрямлений вздовж дотичної до траєкторії руху.

- Рівномірний рух – рух, коли швидкість лишається сталою за модулем і напрямом, тобто $\mathbf{v} = \text{const}$:

$$x = x_0 + vt; \quad S = vt.$$

- Прискорення \mathbf{a} – векторна величина, що дорівнює першій похідній за часом від швидкості розглядуваної матеріальної точки:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}.$$

Прискорення \mathbf{a} має дві взаємно перпендикулярні складові: \mathbf{a}_τ – тангенціальне або дотичне прискорення, \mathbf{a}_n – нормальне або доцентрове прискорення.

Тангенціальне прискорення \mathbf{a}_τ напрямлене вздовж дотичної до траєкторії руху, визначає швидкість змінення модуля швидкості. Модуль тангенціального прискорення дорівнює похідній за часом від модуля швидкості:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}.$$

Нормальне прискорення \mathbf{a}_n характеризує змінення швидкості за напрямом і напрямлене за нормаллю до траєкторії до центру її кривини. Модуль нормального прискорення залежить від швидкості точки і радіуса R кривини траєкторії:

$$a_n = \frac{v^2}{R}.$$

- Рівнозмінний рух – рух зі сталим прискоренням:

$$a = \text{const};$$

$$x = x_0 + v_0 t \pm \frac{at^2}{2}; \quad S = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}; \quad v = v_0 \pm at.$$

Якщо $a > 0$, то рух рівноприскорений.

Якщо $a < 0$, то рух рівносповільнений.

Окремим випадком рівноприскореного прямолінійного руху є вільне падіння тіл з висоти h з прискоренням g (прискорення вільного падіння):

$$v = v_0 + gt; \quad h = v_0 t + \frac{gt^2}{2}.$$

- Прискорення вільного падіння – прискорення, з яким падають усі тіла на Землю незалежно від їх маси за відсутності сил опору повітря.
- В обертальному русі твердого тіла всі його точки описують кола, центри яких лежать на одній прямій – осі обертання.
- Кутове переміщення $d\varphi$ – кут повороту радіуса-вектора за час dt . Точки, що знаходяться на різній відстані r від осі обертання, за однакової проміжки часу проходять різні шляхи:

$$dS = r d\varphi.$$

- Кутова швидкість ω – векторна величина, модуль якої дорівнює першій похідній за часом від кута повороту радіуса-вектора:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Вектор ω напрямлений вздовж осі обертання, його напрям визначають за правилом правого гвинта.

Обертальний рух є рівномірним, якщо $\omega = \text{const}$.

- Період обертання T – час одного повного повороту тіла навкруг осі обертання.

Одиниця періоду – секунда (с).

Частота ν – число обертів, яке здійснює тіло за одиницю часу:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

За один період кут повороту радіуса-вектора точки дорівнює 2π рад, тому $2\pi = \omega T$, звідки

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

- Кутове прискорення ε – векторна величина, модуль якої дорівнює першій похідній за часом від кутової швидкості:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}.$$

Вектор кутового прискорення напрямлений вздовж осі обертання.

У прискореному обертанні напрями векторів ε і ω збігаються, у сповільненому – мають протилежні напрями.

В обертальному русі всі точки твердого тіла в даний момент часу мають однакову кутову швидкість і однакове кутове прискорення.

Лінійні характеристики – переміщення, швидкість, прискорення – різні для різних точок твердого тіла.

Лінійні та кутові характеристики пов'язані між собою співвідношеннями

$$\Delta S = r \cdot \Delta\varphi; \quad v = r\omega; \quad a_t = r\varepsilon.$$

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Який рух називається механічним? 2. Яке тіло можна вважати матеріальною точкою? 3. Чим відрізняються поняття “система відліку” і “система координат”? 4. Що таке траєкторія руху? 5. Які способи задання руху Вам відомі? 6. Що таке вектор переміщення? 7. У якому русі шлях, пройдений тілом, дорівнює модулю вектора переміщення? 8. Що характеризує швидкість руху тіла? 9. Що таке вектор миттєвої швидкості? Як він напрямлений? 10. Який рух називають рівномірним прямолінійним? 11. Що являє собою графік рівномірного прямолінійного руху? 12. Що характеризує прискорення? 13. Сформулюйте визначення миттєвого прискорення. 14. Що характеризує тангенціальне і нормальне прискорення? Як вони напрямлені? 15. Який прямолінійний рух називається рівнозмінним; рівноприскореним; рівносповільненим? 16. Як визначається графічно переміщення тіла для рівноприскореного та рівносповільненого рухів? 17. Наведіть поняття прискорення вільного падіння. 18. Чим відрізняється падіння тіл у повітрі від падіння їх у вакуумі? 19. Запишіть закон вільного падіння тіла з висоти h без початкової швидкості ($v_0 = 0$), з початковою швидкістю v_0 . 20. Якою траєкторією рухається тіло, кинуте під кутом до горизонту? 21. При якому куті кидання дальність польоту за відсутності опору повітря максимальна? 22. Як впливає сила опору повітря на дальність польоту снарядів? 23. Який рух називається періодичним? 24. Що таке період руху? 25. Дайте визначення кутової швидкості. 26. Чому рівномірний рух колом є прискореним? 27. Чому дорівнює доцентрове прискорення і куди воно напрямлене? 28. Який зв'язок існує між лінійною та кутовою швидкостями, між тангенціальним і кутовим прискореннями?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Із пунктів O та A , відстань між якими 240 м, водночас почали рухатися назустріч один одному два тіла. Перше тіло рухалося зі сталою швидкістю 20 м/с, друге – зі сталою швидкістю 40 м/с. Через який проміжок часу і на якій відстані від пункту O ці тіла зустрінуться? Задачу розв'язати графічним способом.

Дано: $v_1 = 20$ м/с; $s_{01} = 0$ м; $v_2 = 40$ м/с; $s_{02} = 240$ м.

Знайти: t , x .

Розв'язання. 1. Сумістимо початок координат з пунктом O , тоді $x_{01} = 0$; $x_{02} = 120$ м.

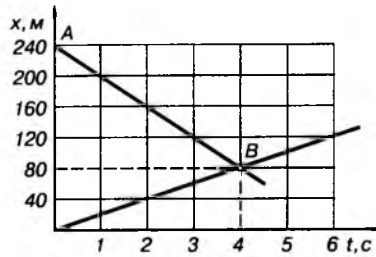


Рис. 1.43

2. Координати тіл змінюються за законом

$$x_1 = v_1 t, \quad x_2 = x_{02} - v_2 t.$$

3. Побудуємо графіки залежностей координат тіл від часу (рис. 1.43).

4. Точка перетину графіків B має координати $x = 80$ м; $t = 4$ с.

Відповідь: $t = 4$ с, $s = 80$ м.

Задача 2. Ліфт, піднімаючись рівноприскорено, протягом 2 с досягає швидкості 5 м/с, з якою продовжує підйом протягом 3 с. За наступні 4 с рівносповільненого руху ліфт зупиняється. Визначте висоту підйому ліфта. Задачу розв'яжіть графічним способом.

Дано: $v_0 = 0$; $t_1 = 2$ с; $v_1 = 5$ м/с; $t_2 = 3$ с; $v_2 = 5$ м/с; $t_3 = 4$ с; $v_3 = 0$.

Знайти: H .

Розв'язання. Побудуємо графік швидкості руху ліфта (рис. 1.44). Висота підйому ліфта чисельно дорівнює площі трапеції $OABC$:

$$OC = t_1 + t_2 + t_3, \quad AB = t_2, \quad AD = v_1 = v_2.$$

Тоді

$$H = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_2}{2} v_1 = \frac{t_1 + 2t_2 + t_3}{2} v_1.$$

Обчислення:

$$H = \frac{2 \text{ с} + 2 \cdot 3 \text{ с} + 4 \text{ с}}{2} \cdot 5 \text{ м/с} = 30 \text{ м}.$$

Відповідь: $H = 30$ м.

Задача 3. Рушаючи з місця, локомотив починає рухатися прямолінійно, і проходить першу ділянку шляху 500 м з прискоренням a_1 , а наступну ділянку шляху 500 м з прискоренням a_2 . При цьому на першій ділянці шляху його швидкість зростає на 10 м/с, а на другій ділянці – на 5 м/с. Що більше: a_1 чи a_2 ?

Дано: $S = S_1 = S_2 = 500$ м; $v_{01} = 0$; $v_1 = 10$ м/с; $v_2 = 15$ м/с.

Знайти: a_1, a_2 .

Розв'язання. Нехай додатний напрям осі X збігається з напрямом руху локомотива. В початковий момент часу $t_0 = 0$ локомотив знаходиться в початку координат $x_0 = 0$ (рис. 1.45).

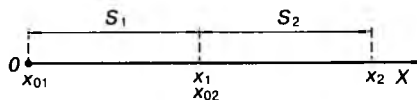


Рис. 1.45

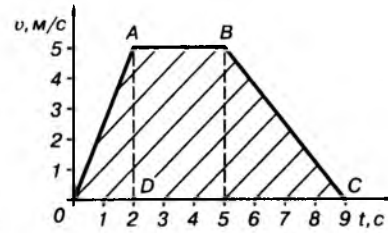


Рис. 1.44

Запишемо рівняння руху та формули швидкості для першої і другої ділянок руху локомотива в проєкціях на вісь X :

$$I \begin{cases} x_1 = x_{01} + v_{01} t_1 + \frac{a_1 t_1^2}{2}; \\ v_1 = v_{01} + a_1 t_1; \end{cases} \quad II \begin{cases} x_2 = x_{02} + v_{02} t_2 + \frac{a_2 t_2^2}{2}; \\ v_2 = v_{02} + a_2 t_2. \end{cases}$$

Враховуючи, що $x_{01} = 0$; $x_1 - x_{01} = S$; $v_{01} = 0$, перша система рівнянь набуває вигляду

$$I \begin{cases} S = \frac{a_1 t_1^2}{2}; \\ v_1 = a_1 t_1. \end{cases} \quad (1)$$

Враховуючи, що $x_{02} = x_1$; $x_2 - x_1 = S$; $v_{02} = v_1$, друга система рівнянь набирає вигляду

$$II \begin{cases} S = v_1 t_2 + \frac{a_2 t_2^2}{2}; \\ v_2 = v_1 + a_2 t_2. \end{cases} \quad (3)$$

Щоб визначити a_1 , виразимо t_1 з рівняння (2) і підставимо в рівняння (1):

$$t_1 = \frac{v_1}{a_1}; \quad S = \frac{a_1 v_1^2}{2 a_1^2} = \frac{v_1^2}{2 a_1},$$

звідки $a_1 = \frac{v_1^2}{2S}$.

Щоб визначити a_2 , виразимо t_2 з рівняння (4) і підставимо в рівняння (3):

$$t_2 = \frac{v_2 - v_1}{a_2}; \quad S = \frac{v_1(v_2 - v_1)}{a_2} + \frac{a_2(v_2 - v_1)^2}{2 a_2^2} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 a_2},$$

звідки

$$a_2 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2S}.$$

Обчислення:

$$a_1 = \frac{(10 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 500 \text{ м}} = 0,1 \text{ м/с}^2, \quad a_2 = \frac{(15 \text{ м/с})^2 - (10 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 500 \text{ м}} = 0,13 \text{ м/с}^2.$$

Відповідь: $a_2 > a_1$.

Задача 4. Два тіла кинуті вертикально вгору з однаковою початковою швидкістю $v_0 = 20$ м/с з інтервалом часу 1 с. Визначити швидкість руху другого тіла відносно першого. Чому дорівнює відстань між тілами через 2 с після кидання першого тіла?

Дано: $v_{0y} = 20$ м/с; $\Delta t = 1$ с; $t = 2$ с.

Знайти: $v_y = v_{2y} - v_{1y}$; S .

Розв'язання. Спрямуємо вісь Y вертикально вгору, початок координат O розташуємо на поверхні Землі в точці кидання тіл. Вектор прискорення вільного падіння g напрямлений протилежно напрямку осі Y (рис. 1.46).

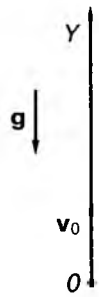


Рис. 1.46

1. Швидкість руху тіл змінюється за законом $v_1 = v_0 + gt$,
 $v_2 = v_0 + g(t - \Delta t)$.

У проекціях на вісь Y

$$\begin{cases} v_{1y} = v_{0y} - gt; \\ v_{2y} = v_{0y} - g(t - \Delta t); \end{cases}$$

$$v_y = v_{2y} - v_{1y} = v_{0y} - gt - v_{0y} + gt + g\Delta t = g\Delta t;$$

$$v_y = 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 1 \text{ с} = 9,8 \text{ м/с}.$$

2. Рівняння руху тіл у проекції на вісь Y мають вигляд

$$\begin{cases} y_1 = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}; \\ y_2 = v_{0y}(t - \Delta t) - \frac{g(t - \Delta t)^2}{2}. \end{cases}$$

Відстань між тілами S дорівнює різниці координат: $S = y_1 - y_2 = \Delta y$;

$$S = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2} - v_{0y}(t - \Delta t) + \frac{g(t - \Delta t)^2}{2} = v_{0y}\Delta t + \frac{g\Delta t^2}{2} - g\Delta t t.$$

Обчислення:

$$S = 20 \text{ м/с} \cdot 1 \text{ с} + \frac{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 4 \text{ с}^2}{2} - 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 1 \text{ с} \cdot 2 \text{ с} = 5,3 \text{ м}.$$

Відповідь: $v_y = 9,8 \text{ м/с}$; $S = 5,3 \text{ м}$.

Задача 5. Чому дорівнює лінійна і кутова швидкості обертання точок поверхні Землі, що знаходяться на екваторі, припускаючи, що вісь обертання Землі проходить через полюси? Земля робить один оберт навколо своєї осі за 24 год.

Дано: $T = 24 \text{ год} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ с}$; $R_{\oplus} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$.

Знайти: v , ω .

Розв'язання. Припустивши обертання Землі навколо своєї осі рівномірним, визначаємо кутову швидкість за формулою (1.58), а лінійну швидкість – за формулою (1.60):

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad v = \omega R_{\oplus}.$$

Обчислення:

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \text{ рад}}{8,64 \cdot 10^4 \text{ с}} = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с};$$

$$v = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с} \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м} = 467,2 \text{ м/с}.$$

Відповідь: $\omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$; $v = 467,2 \text{ м/с}$.

Задача 6. Колесо велосипеда, діаметр якого 80 см, обертається зі сталим кутовим прискоренням $2,5 \text{ рад/с}^2$. Через який проміжок часу від початку руху швидкість велосипеда дорівнювала 5 м/с ?

Дано: $D = 2r = 80 \text{ см} = 0,8 \text{ м}$; $r = 0,4 \text{ м}$; $\varepsilon = 2,5 \text{ рад/с}^2$, $v = 5 \text{ м/с}$.

Знайти: t .

Розв'язання. Лінійна і кутова швидкості пов'язані між собою [див. формулу (1.60)]:

$$v = \omega r.$$

Кутова швидкість за умови $t_0 = 0$, $\omega_0 = 0$ визначається за формулою (1.72):

$$\omega = \varepsilon t.$$

Отже,

$$v = \varepsilon r t,$$

звідки визначимо t :

$$t = \frac{v}{\varepsilon r}.$$

Обчислення:

$$t = \frac{5 \text{ м/с}}{2,5 \text{ рад/с}^2 \cdot 0,4 \text{ м}} = 5 \text{ с}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. На рис. 1.47 зображено траєкторію руху матеріальної точки. Визначити, на яких ділянках траєкторії: а) рух прямолінійний, криволінійний; б) змінився напрям руху точки; в) модуль вектора переміщення дорівнює шляху; г) модуль вектора переміщення менший за шлях; д) модуль вектора переміщення дорівнює нулю.

2. Швидкість розповсюдження радіохвиль (швидкість світла в вакуумі) дорівнює $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Хто раніше почує голос соліста, що співає перед мікрофоном у Москві: радіослухачі, які сидять на відстані 60 м від нього, або слухачі, які знаходяться на відстані 6000 м? Швидкість звуку в повітрі взяти рівною 340 м/с .

3. Середня шляхова швидкість руху Землі навколо Сонця дорівнює 30 км/с . Яку відстань при цьому русі проходить Земля за добу? за рік?

4. Пішохід за хвилину робить 90 кроків. Визначити середню швидкість руху пішохода (у км/год), беручи довжину кроку 60 см .

5. Автомобіль пройшов відстань від A до B із середньою швидкістю 36 км/год , а назад – із середньою швидкістю 54 км/год . Якою є середня швидкість рейсу?

6. Швидкісний ліфт підіймається рівномірно зі швидкістю 3 м/с . Визначте час, протягом якого ліфт без зупинки піднімається до висоти 50 м (15-й поверх). Задачу розв'язати графічно.

7. Два автомобілі рухаються назустріч один одному. Один – прискорено на схід, інший – сповільнено на захід. Як напрямлені прискорення автомобілів?

8. Тіло рухається вздовж осі X рівноприскорено з початковою швидкістю v_0 . Наприкінці четвертої се-

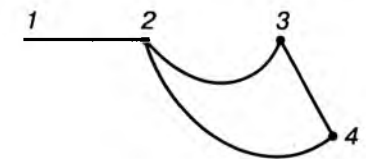


Рис. 1.47

кунди швидкість тіла $v = 3v_0$; за цей час тіло пройшло шлях 32 м. Визначте прискорення тіла.

9. Вздовж осі X з однієї точки одночасно починають рухатися два тіла. Перше тіло рухається рівномірно зі швидкістю 20 м/с, друге – рівноприскорено з прискоренням $0,5 \text{ м/с}^2$, початкова швидкість другого тіла дорівнює нулю. Через який час друге тіло дожене перше?

10. У верхнього кінця трубки, що розташована вертикально, знаходяться дробинки і пробки. Яке з цих тіл у разі одночасного старту першим досягне нижнього кінця трубки, якщо з неї відкачено повітря?

11. Тіло зі стану спокою вільно падає на Землю протягом 4 с. З якої висоти воно падає і яку швидкість матиме в момент приземлення?

12. Камінь вільно падає в шахту з водою. Через 6 с чуто сплеск води. Визначити глибину шахти, якщо швидкість звуку 330 м/с.

13. Два тіла вільно падають, одне – з висоти 20 м, а інше – з висоти 80 м. З якою швидкістю приземляться тіла? Визначити час падіння.

14. З вертольота, що знаходиться на висоті 200 м, скинуто вантаж. Через який час вантаж впаде на землю, якщо вертоліт:

а) нерухомий;

б) опускається зі швидкістю 4 м/с;

в) піднімається зі швидкістю 4 м/с?

15. Хлопець кидає м'ячі один за одним догори, кожний наступний у той момент, коли попередній знаходиться в найвищій точці. Скільки м'ячів у секунду кидає хлопець, якщо м'ячі піднімаються на висоту 1,23 м?

16. В якій точці траєкторії (див. рис. 1.35) тіло в стані польоту мало найменшу швидкість?

17. Під яким кутом до горизонту кинуте тіло, якщо дальність польоту в чотири рази більша за максимальну висоту підйому? Опором повітря знехтувати.

18. Чому дорівнює кутова швидкість обертання точок земної поверхні на широті Санкт-Петербурга ($\varphi = 60^\circ$)?

19. Визначити лінійну швидкість точок, що лежать на земній поверхні на широті Москви ($\varphi = 56^\circ$).

20. Скільки обертів у секунду роблять колеса вантажного автомобіля діаметром 1,5 м при швидкості руху 72 км/год?

21. До мотузки завдовжки 0,5 м прив'язаний камінь. При обертанні каменя у вертикальній площині мотузка обривається в той момент, коли швидкість каменя була напрямлена вертикально вгору. На яку висоту підніметься камінь, якщо його обертали, роблячи 3 об/с?

22. Період обертання штучного супутника Землі дорівнює 1,5 год. Припустивши, що середня висота його над поверхнею Землі 320 км, а орбіта є круговою, визначте лінійну швидкість і доцентрове прискорення супутника. Радіус Землі – 6400 км.

23. Колесо автомобіля, обертаючись рівносповільнено, за час 3 хв змінило частоту обертання від 240 хв^{-1} до 60 хв^{-1} . Визначте кутове прискорення колеса.

ГЛАВА 2

ЗАКони МЕХАНІКИ НЬЮТОНА

§ 11. Перший закон Ньютона

Динаміка

Динаміка* – розділ механіки, присвячений вивченню руху матеріальних тіл під дією прикладених до них сил.

У динаміці розглядаються два типи задач.

- Задачі першого типу полягають у тому, щоб, знаючи закони руху тіла, визначити діючі на нього сили. Класичним прикладом розв'язання такої задачі стало відкриття Ньютоном закону Всесвітнього тяготіння. Знаючи встановлені Й. Кеплером закони руху планет, Ньютон показав, що цей рух відбувається під дією сили, обернено пропорційної квадрату відстані між планетою та Сонцем.

- Задачі другого типу в динаміці є основними і полягають в тому, щоб, знаючи початкове положення і початкову швидкість тіла, за діючими на тіло силами визначити закон його руху.

Рух і спокій

На перший погляд, найприроднішим станом тіла є стан спокою. В спокої знаходяться камені-валуни, розташовані обабіч дороги, меблі в кімнаті, будови на поверхні Землі. Але! Всі ці тіла рухаються разом із Землею навколо Сонця.

Рух обіймає собою всі зміни і процеси, що відбуваються у Всесвіті. Рухаються зоряні системи – галактики, зірки, планети. І на Землі скрізь бачимо рух: тече вода в річках, небом “пливуть” хмари і летять літаки, по Землі рухаються автомобілі. Рухаються невидимі молекули та атоми.

Рух є спосіб існування матерії.

Основною характеристикою руху є швидкість. Чи може рухоме тіло саме по собі змінити швидкість свого руху? Що є причиною змінення швидкості руху тіла? Відповіді на ці запитання є очевидними, вони впливають із безпосередніх спостережень. Щоб змінити швидкість руху тіла, потрібне діяння на нього інших тіл.

У Всесвіті практично неможливо знайти тіл, які б не зазнавали зовнішніх діянь. Проте якщо зовнішні діяння є, але вони компенсовані (зрівноважені), то при розв'язуванні деяких задач тіло може вважатися вільним.

* Динаміка – від грец. *dinamikós* – сильний, *dýnamis* – сила.

Вільним тілом називають тіло, на яке не діють інші тіла (або поля).

Якщо тіло є вільним, то швидкість його руху не змінюється. Наприклад, шафа, що стоїть у кімнаті, ніколи сама по собі не почне рухатися по кімнаті. Якщо тіло знаходиться в спокої, то його швидкість є сталою і дорівнює нулеві, тобто $v = 0 = \text{const}$. Щоб змінити швидкість тіла, яке знаходиться в спокої, потрібне діяння на нього інших тіл.

Найпростішим видом руху тіла є рівномірний прямолінійний рух, в якому швидкість – величина стала. У стані спокою швидкість теж величина стала і дорівнює нулеві. Отже, спокій – окремий випадок прямолінійного рівномірного руху.

Перший закон Ньютона – закон інерції

Спостереження за рухом тіл і розмірковування про характер цих рухів дозволили І. Ньютону сформулювати знамениті закони руху, які він виклав у праці “Математичні початки натуральної філософії” (книжку було видано в 1687 р.).

В основі праці “Математичні початки”, як і в праці Евкліда “Початки”, лежать декілька аксіом, що не потребують доведення, – законів (основних положень), які являють собою узагальнення багатовікового досвіду, підсумки всьому зробленому за попередні тисячоліття в ученні про найпростіші форми руху матерії.

Перший закон Ньютона говорить:

будь-яка матеріальна точка (тіло) зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху до того часу, поки зовнішні діяння з боку інших тіл не змінять цього стану.

Перший закон Ньютона виконується в системах відліку, котрі називаються “інерціальні”, і встановлює факт існування інерціальних систем відліку.

Інерціальні – це системи відліку, в яких вільне тіло рухається прямолінійно і рівномірно.

Для опису механічних рухів на Землі інерціальну систему відліку зв’язують із Землею (геоцентрична система відліку). Більш строго перший закон Ньютона виконується в геліоцентричній системі відліку. Початок відліку координат цієї системи суміщують з центром Сонця, а координатні осі проводять у напрямі нерухомих зірок.

Питання про те, чи є вибрана система відліку інерціальною, вирішується експериментально. Якщо в межах точності вимірювань у даній системі відліку перший закон Ньютона виконується, то вона може вважатися інерціальною.

Рівномірний і прямолінійний рух вільного тіла в інерціальній системі відліку називають рухом за інерцією. Рухаючись за інерцією, вільне тіло не змінює швидкість ні за модулем, ні за напрямом: $v = \text{const}$.

Експериментальні підтвердження закону інерції

Неодноразово можна спостерігати, що в разі різкого гальмування водієм автобуса чи тролейбуса пасажир, що знаходиться в ньому, нахилиється вперед, продовжуючи рух за інерцією. Коли автобус різко рушає з місця, пасажир відхитнеться назад.

За інерцією злітає грязь з автомобільних чи велосипедних колес, які обертаються.

Зі свого життєвого досвіду кожен знає, як важко швидко зупинитися людині, що біжить, якщо не схопитися руками за яке-небудь нерухоме тіло – стовп, дерево; за інерцією продовжує свій рух спринтер або лижник, пробігши певну дистанцію.

Іноді зайцю щастить врятуватися від переслідуючого його вовка, якщо він зможе стрибнути вбік.

За інерцією рухається Місяць навколо Землі, планети – навколо Сонця.

§ 12. Сила

Сили в механіці

Сила F – це векторна фізична величина, яка є мірою механічного діяння на тіло з боку інших тіл або полів.

Це діяння проявляється у зміні швидкості рухомого тіла або зміні форми і розмірів тіла.

Сила, як і будь-яка векторна величина, вважається заданою, якщо відомі її модуль, напрям у просторі і, крім того, точка прикладення. *Пряма, вздовж якої напрямлена сила, називається лінією дії сили.*

Поняття сили завжди стосується двох тіл (або тіла і поля). При діянні одного тіла на інше відбувається їхня взаємодія або в разі стикання, або на відстані за допомогою поля.

Фізична природа взаємодій може бути різною. На цей час відомо чотири типи фундаментальних взаємодій: гравітаційна, електромагнітна, сильна, слабка.

У механіці розглядаються гравітаційні сили, або сили тяжіння, та різновиди електромагнітних сил – сила пружності і сила тертя. Сили, що розглядаються в механіці, залежать або від відстані між тілами чи частинами одного і того самого тіла, або від відносних швидкостей руху тіл.

Принцип незалежності дії сил

Принцип незалежності дії сил або принцип суперпозиції (накладення) сил формулюється так.

Якщо на матеріальну точку (тіло) одночасно діють кілька сил, то кожна з сил діє незалежно від інших сил.

Цей принцип є слушним для сил різної фізичної природи.

Система кількох сил, одночасно діючих на матеріальну точку, може бути замінена рівнодієюною силою, що дорівнює їх геометричній сумі:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2. \quad (2.1)$$

У загальному випадку, для визначення рівнодіючої сили застосовують правило багатокутника. Найчастіше доводиться знаходити рівнодіючу двох сил. У цьому разі зручніше застосовувати правило паралелограма: рівнодіюча сила \mathbf{F} дорівнює діагоналі паралелограма, сторонами якого є дві сили \mathbf{F}_1 і \mathbf{F}_2 , що додаються (рис. 2.1).

Сили \mathbf{F}_1 і \mathbf{F}_2 , сума яких дорівнює вектору \mathbf{F} , називаються складовими вектора сили \mathbf{F} .

Якщо відомі модулі сил $|\mathbf{F}_1|$ і $|\mathbf{F}_2|$ та кут α між ними, то можна визначити модуль рівнодіючої сили. За теоремою косинусів маємо

$$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 - 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2|\cos(180^\circ - \alpha).$$

Враховуючи, що $\cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha$, дістанемо

$$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 + 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2|\cos \alpha. \quad (2.2)$$

Модуль рівнодіючої залежить не тільки від модулів складових сил, але й від косинуса кута (α) між ними.

• Якщо $\alpha = 0$, то $\cos \alpha = 1$. Сили є співнапрямленими, $|\mathbf{F}_1 \uparrow \uparrow \mathbf{F}_2|$:

$$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 + 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2| \text{ або } |\mathbf{F}|^2 = (|\mathbf{F}_1| + |\mathbf{F}_2|)^2,$$

отже,

$$|\mathbf{F}| = |\mathbf{F}_1| + |\mathbf{F}_2|.$$

Модуль результуючої сили дорівнює сумі модулів складових сил. Сила \mathbf{F} співнапрямлена з силами \mathbf{F}_1 і \mathbf{F}_2 .

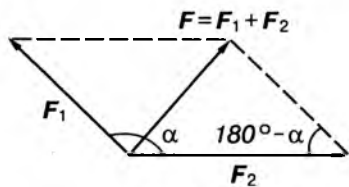


Рис. 2.1

• Якщо $\alpha = \pi$, $\cos \alpha = -1$. Сили \mathbf{F}_1 і \mathbf{F}_2 напрямлені протилежно, $\mathbf{F}_1 \uparrow \downarrow \mathbf{F}_2$:

$$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 - 2|\mathbf{F}_1||\mathbf{F}_2|$$

або

$$|\mathbf{F}|^2 = (|\mathbf{F}_1| - |\mathbf{F}_2|)^2, \quad |\mathbf{F}| = ||\mathbf{F}_1| - |\mathbf{F}_2||.$$

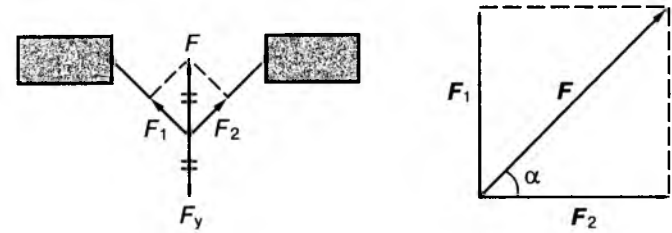


Рис. 2.2

Рис. 2.3

Модуль результуючої сили дорівнює різниці модулів складових сил. Напрямок вектора \mathbf{F} збігається з напрямком сили, модуль якої більший.

• Якщо $|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2|$, тобто сили однакові за модулем і протилежно напрямлені, то результуюча сила \mathbf{F} дорівнюватиме нулю. В такому разі система сил називатиметься *зрівноваженою*.

Систему сил, діючих на матеріальну точку, можна зрівноважити, якщо до точки прикласти силу, що протилежно напрямлена результуючій і однакова з нею за модулем (рис. 2.2). Ця сила називається *зрівноважувальною* (\mathbf{F}_y).

• Якщо $\alpha = \frac{\pi}{2}$, $\cos \alpha = 0$. Сили \mathbf{F}_1 і \mathbf{F}_2 перпендикулярні, $\mathbf{F}_1 \perp \mathbf{F}_2$:

$$|\mathbf{F}|^2 = |\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2 \text{ або } |\mathbf{F}| = \sqrt{|\mathbf{F}_1|^2 + |\mathbf{F}_2|^2}.$$

Модуль результуючої сили $|\mathbf{F}|$ визначається за теоремою Піфагора.

Напрямок сили \mathbf{F} можна задати кутом α (рис. 2.3): $\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\mathbf{F}_1|}{|\mathbf{F}_2|}$.

Розкладання сили на складові

Під час розв'язання деяких фізичних задач виникає потреба у розкладанні вектора сили \mathbf{F} на складові. Частіше зустрічаються задачі про розкладання вектора сили \mathbf{F} на дві складові, що лежать в одній площині. Ці задачі мають однозначний розв'язок у двох випадках.

Випадок 1. Відомо одну зі складових вектора \mathbf{F} . На рис. 2.4, а зображено вектор сили \mathbf{F} і його складову \mathbf{F}_1 у певному масштабі. Для знаходження другої складової застосовуємо правило трикутника. Позначимо на площині довільну точку O (рис. 2.4, б) і відкладемо від цієї точки вектор $OA = \mathbf{F}_1$ і $OB = \mathbf{F}$. Вектор $AB = \mathbf{F}_2$, напрямлений від кінця складової \mathbf{F}_1 до кінця вектора \mathbf{F} , буде другою складовою вектора \mathbf{F} :

$$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = \mathbf{F}.$$

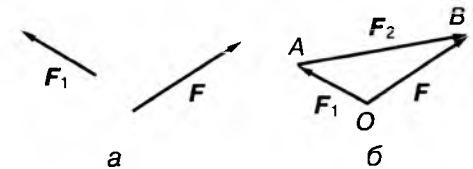


Рис. 2.4

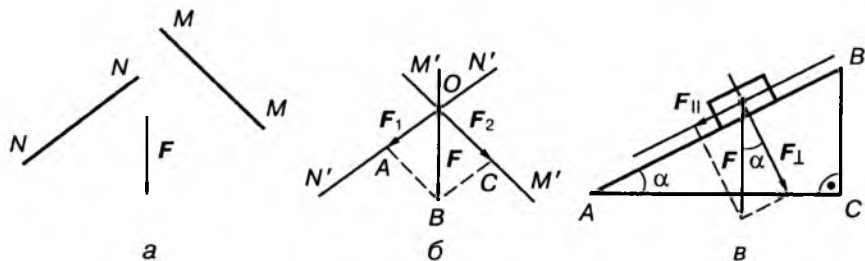


Рис. 2.5

Випадок 2. Відомо напрями обох складових вектора F . На рис. 2.5, а це лінії NN і MM . Позначимо на площині довільну точку O (рис. 2.5, б) і відкладемо від цієї точки вектор $OB = F$. Проведемо через точку O прямі $N'O' \parallel NN$ та $M'M' \parallel MM$. У прийнятому масштабі, застосувавши правило паралелограма, визначають складові $OA = F_1$ і $OC = F_2$ як сторони паралелограма, діагоналю якого є $OB = F$. Наприклад, на тіло, що знаходиться на похилій площині ABC з кутом нахилу α (рис. 2.5, в), діє сила F , напрямлена перпендикулярно до AC ($F \perp AC$). Складові цієї сили, напрямлені паралельно AB (F_{\parallel}) і перпендикулярно до AB (F_{\perp}), визначаємо за правилом паралелограма (рис. 2.5, в): $F_{\parallel} = F \sin \alpha$; $F_{\perp} = F \cos \alpha$.

§ 13. Маса

Маса – міра інертності

Всі тіла володіють інертністю.

Інертність – це властивість тіла зберігати стан спокою або стан прямолінійного рівномірного руху, коли діючі на нього сили відсутні або взаємно зрівноважені.

Внаслідок інертності тіла зберігають свою швидкість за відсутності взаємодії з іншими тілами.

Припустимо, на колії стоять два однакових вагони. Один із них порожній, інший – навантажений. Який з вагонів “легше” вивести зі стану спокою, тобто змінити його швидкість? Зрозуміло, порожній.

Порожній і навантажений вагони рухаються з однаковою швидкістю. Який з цих вагонів “важче” зупинити, тобто змінити його швидкість? Зрозуміло, навантажений. Отже, інертність навантаженого вагона більша за інертність порожнього, тому що маса навантаженого вагона більша за масу порожнього.

*Маса** – це фізична величина, яка є мірою інертності тіла при його поступальному русі.

Маса – величина скалярна. Одиниця маси – кілограм (кг).

Кілограм – це маса еталона, відлитого зі сплаву платини та іридію (90 % Pt, 10 % Ir) у вигляді циліндра (міжнародний прототип кілограма), висота якого – 39 мм – дорівнює його діаметру. Еталон зберігається в Міжнародному бюро мір і вагів (м. Севр, поблизу Парижа). Всі країни мають точні копії цього еталона.

У класичній механіці (або механіці Ньютона), тобто коли швидкість макротіл v набагато менша за швидкість світла у вакуумі ($v \ll c$), вважається:

маса тіла не залежить від швидкості його руху;

маса – величина адитивна, тобто маса тіла дорівнює сумі мас усіх частинок (або матеріальних точок), із яких воно складається. Якщо, наприклад, три тіла масою m_1 , m_2 , m_3 з'єднати разом, то маса об'єднаного тіла m дорівнюватиме сумі мас: $m = m_1 + m_2 + m_3$. Якщо тіло розділити на частини (наприклад, розірвався снаряд), то сума мас частин (осколків) дорівнюватиме масі тіла до розділення (масі снаряда).

Найважливіша властивість маси – її збереження. **Маса замкненої системи тіл лишається незмінною при будь-яких процесах, що відбуваються в системі.**

Центр мас

Для поступального руху тіла зручно ввести таке поняття, як центр мас або центр інерції.

Центр мас – це точка, в якій може вважатися зосередженою маса тіла при його поступальному русі.

Точки тіла, що рухається поступально, мають однакову швидкість і описують паралельні одна одній траєкторії. Тому можна розглядати поступальний рух не всього тіла, а однієї точки – його центра мас, тобто матеріальної точки, в якій наче зосереджена вся маса тіла.

Очевидно, що центр мас однорідних симетричних тіл збігається з центром симетрії O (рис. 2.6, а). Центр мас однорідної кулі збігається з її центром. Центр мас однорідного стрижня знаходиться в його середині.

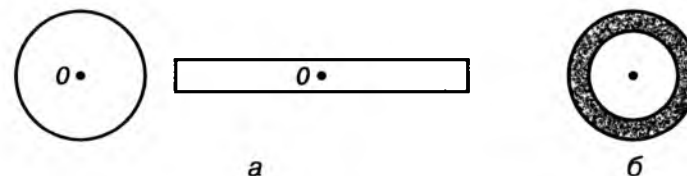


Рис. 2.6

* Маса (від лат. massa) – брила, грудка.

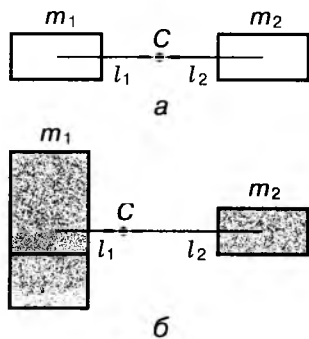


Рис. 2.7

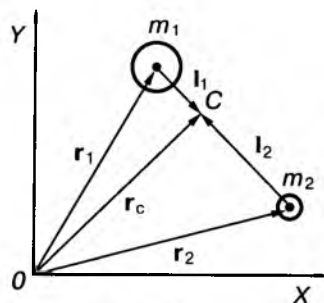


Рис. 2.8

Центр мас тіла може знаходитися й поза тілом (наприклад, центр мас однорідного обода чи кільця, рис. 2.6, б).

Як визначити положення центра мас довільного тіла? Розглянемо найпростішу систему, що складається з двох матеріальних точок масами m_1 і m_2 .

- Якщо $m_1 = m_2$, то центр мас лежить на середині відрізка прямої, яка з'єднує ці точки (рис. 2.7, а): $|l_1| = |l_2|$.

- Якщо $m_1 \neq m_2$, $m_1 > m_2$, то центр мас лежить на відрізку прямої, що з'єднує ці точки, і знаходиться в точці, розташованій ближче до m_1 (рис. 2.7, б). Відстані l_1 і l_2 від відповідних матеріальних точок до центра мас обернено пропорційні масам цих точок:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{l_2}{l_1} \text{ або } m_1 l_1 = m_2 l_2. \quad (2.3)$$

Формула (2.3) аналогічна правилу важеля, яке було відомим ще Аристотелю. Це правило застосовував і Архімед у різних підймальних механізмах.

Застосовуючи формулу (2.3), можна визначити центр мас двох тіл, які нерозривно зв'язані одне з одним, наприклад, подвійних зірок або системи Земля–Місяць, якщо відомо масу тіл та відстань між ними.

Визначимо положення центра мас матеріальних точок масами m_1 і m_2 відносно початку відліку (рис. 2.8).

Положення точок 1, 2 і центра мас C визначаються векторами \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 і \mathbf{r}_c . На рис. 2.8 l_1 і l_2 – вектори, проведені з матеріальних точок до центра мас.

Із рис. 2.8 видно, що

$$\mathbf{r}_c = \mathbf{r}_1 + l_1, \quad \mathbf{r}_c = \mathbf{r}_2 + l_2.$$

Помножимо перше рівняння на m_1 , а друге на m_2 , дістанемо

$$m_1 \mathbf{r}_c = m_1 \mathbf{r}_1 + m_1 l_1, \quad m_2 \mathbf{r}_c = m_2 \mathbf{r}_2 + m_2 l_2.$$

Додавши ці рівняння, матимемо

$$\mathbf{r}_c (m_1 + m_2) = m_1 \mathbf{r}_1 + m_1 l_1 + m_2 \mathbf{r}_2 + m_2 l_2.$$

Із формули (2.3) випливає, що $m_1 l_1 = -m_2 l_2$, тому

$$\mathbf{r}_c (m_1 + m_2) = m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2.$$

Отже, положення центра мас системи, яка складається з двох матеріальних точок, визначається радіусом-вектором

$$\mathbf{r}_c = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2}{m_1 + m_2}. \quad (2.4)$$

Якщо система складається з n матеріальних точок, маса i -ї матеріальної точки m_i , а її радіус-вектор \mathbf{r}_i , то положення центра мас такої системи обчислюється за формулою

$$\mathbf{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (2.5)$$

Координати центра мас:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}; \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}; \quad z_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (2.6)$$

§ 14. Імпульс

Імпульс матеріальної точки

Механічний стан матеріальної точки в даній системі відліку визначають координати x , y , z (або радіус-вектор \mathbf{r}) та її швидкість \mathbf{v}_1 . Якщо одна з величин змінюється, то матеріальна точка переходить в інший механічний стан.

Функцією механічного стану матеріальної точки є фізична величина, котра називається імпульсом.

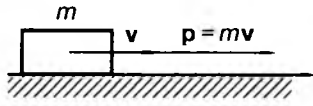


Рис. 2.9

Імпульс* матеріальної точки (p) – векторна величина, яка дорівнює добутку маси (m_i) точки на швидкість (v_i) її руху:

$$p_i = m_i v_i. \quad (2.7)$$

Одиниця імпульсу – кілограм-метр на секунду ($\text{кг} \cdot \text{м/с}$).

Кілограм-метр на секунду дорівнює імпульсу матеріальної точки масою 1 кг, що рухається зі швидкістю 1 м/с.

Оскільки маса завжди є додатною ($m > 0$), то вектори швидкості й імпульсу є співнапрямленими: $v \uparrow \uparrow p$ (рис. 2.9).

Кожному механічному стану даної матеріальної точки у вибраній системі відліку відповідає певний імпульс. Імпульс не залежить ні від процесу, внаслідок якого матеріальна точка опинилась у даному механічному стані, ні від попередніх або наступних її механічних станів.

У подальшому вивченні фізики ми переконаємось, що імпульс – це одна з найважливіших фізичних величин-характеристик руху матеріальних тіл.

Імпульс тіла

Будь-яке тіло можна подати як систему матеріальних точок.

Імпульс p тіла, що складається з n матеріальних точок, дорівнює векторній сумі імпульсів усіх точок системи:

$$p = \sum_{i=1}^n p_i = \sum_{i=1}^n m_i v_i. \quad (2.8)$$

У разі поступального руху всі матеріальні точки, в тому числі й центр мас системи, рухаються з однаковою швидкістю v_c . Сумарна маса точок системи дорівнює масі тіла $\sum_{i=1}^n m_i$. Вектори імпульсів усіх матеріальних

точок співнапрямлені.

Імпульс тіла (p) – векторна величина, яка дорівнює добутку маси (m) тіла на швидкість (v_c) поступального руху центра мас:

$$p = m v_c. \quad (2.9)$$

Якщо матеріальна точка або тіло рухаються поступально за інерцією ($v = \text{const}$), то їх імпульси не змінюються, тобто лишаються сталими ($p = \text{const}$).

* Імпульс (від лат. impulsus) – поштовх, удар.

§ 15. Другий закон Ньютона

Досліди з визначення

залежності прискорення від сили та маси

Другий закон Ньютона встановлює залежність рухомого тіла від маси тіла і сили, що діє на нього. Для з'ясування цієї залежності проводять такі досліди.

Беруть легкопересувний візок, такий, щоб маса візка (m_b) була набагато меншою за масу вантажу на ньому ($m_b \ll m$), і вважають, що $m_b + m \approx m$ (рис. 2.10). Далі, при русі візка по шкалі, визначають шлях, який проходить візок за певні проміжки часу Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, причому $\Delta t = \text{const}$. Константа може бути будь-якою, але в усіх дослідах однаковою, наприклад, $\Delta t = 2 \text{ с}$.

У першій серії дослідів з'ясовують залежність прискорення від діючої на тіло сили; при цьому маса системи лишається сталою ($m = \text{const}$), а сила F змінюється.

У другій серії дослідів з'ясовують залежність прискорення від маси системи; при цьому діюча сила є сталою ($F = \text{const}$), а маса m змінюється.

Прискорення і сила

Перед тим як дослідним шляхом визначити залежність прискорення тіла від діючої на нього сили, потрібно знати характер руху тіла. Спостереження за рухом тіл показують, що чим більшою є сила, яка діє на тіло, тим швидше змінюється швидкість тіла, тобто виникає прискорення. Якщо на тіло діє стала сила, то яким буде прискорення тіла: сталим чи змінним?

Щоб відповісти на це запитання, за формулами кінематики визначимо відстані, які проходить тіло за проміжки часу Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, тобто S_1 , S_2 , S_3 у разі рівноприскореного руху.

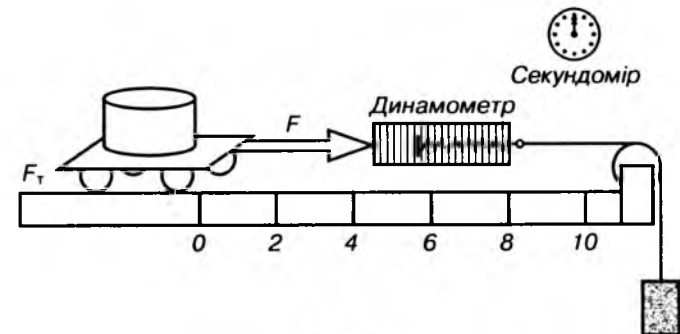


Рис. 2.10

Якщо тіло починає рух зі стану спокою ($v_0 = 0$) і прискорення стало ($a = \text{const}$), то

$$S_1 = \frac{a(\Delta t)^2}{2}; \quad S_2 = \frac{a(2\Delta t)^2}{2}; \quad S_3 = \frac{a(3\Delta t)^2}{2}. \quad (2.10)$$

Отже, $\frac{S_2}{S_1} = 4$; $\frac{S_3}{S_1} = 9$.

Як видно з отриманих співвідношень, відстань, яку проходить тіло при рівноприскореному русі за проміжок часу $2\Delta t$, учетверо більша, а за проміжок часу $3\Delta t$ – удев'ятеро більша, ніж за проміжок часу Δt .

Чисельні досліди, що проводилися зі збільшуваним ступенем точності вимірювання відстаней S_1, S_2, S_3 , які проходило тіло сталої маси під дією сталої сили за проміжки часу $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$, підтвердили ці співвідношення. Отже, тіло під дією сталої сили рухається рівноприскорено, тобто при $F = \text{const}$ $a = \text{const}$. Вектори сили і прискорення співнапрямлені: $F \uparrow \uparrow a$.

Для з'ясування залежності модуля прискорення тіла від модуля діючої сили визначають відстані, які проходить тіло за проміжок часу Δt , якщо на тіло діють по чергово сталі сили $F, 2F, 3F$ і т. д. З дослідів випливає, що під дією сили $2F$ відстань, яку проходить тіло за проміжок часу Δt , удвічі більша, ніж під дією сили F : Якщо силу збільшити втричі ($3F$), то за проміжок часу Δt тіло проходить відстань утричі більшу, ніж під дією сили F . Отже, в скільки разів збільшується сила, в стільки ж разів збільшується відстань. Наприклад, взявши для дослідів $\Delta t = \text{const} = 2$ с та порівнявши результати їх і дані, отримані з формул (2.10), бачимо, що із збільшенням сили вдвічі прискорення збільшується також удвічі, оскільки відстань збільшується удвічі. Якщо силу збільшити втричі, то й прискорення збільшиться втричі, тобто між прискоренням і силою існує прямо пропорційна залежність $a \sim F$.

Прискорення рухомого тіла прямо пропорційне силі, яка діє на нього.

Прискорення і маса

На візку з вантажем у цій серії дослідів діє стала сила $F = \text{const}$; отже, він має рухатися зі сталим прискоренням, прямо пропорційним силі (див. рис. 2.10). Візок завантажують, розміщуючи на ньому послідовно вантаж масою $m, 2m, 3m$, і визначають відстані, котрі проходить візок за проміжок часу Δt ($\Delta t = \text{const}$) під дією сталої сили F . Досліди показують, що коли маса візка $2m, 3m$, то відстані, які проходить візок за проміжок

часу Δt , відповідно вдвічі і втричі менші, ніж при масі візка m . Отже, між прискоренням і масою існує обернено пропорційна залежність $a \sim \frac{1}{m}$.

Прискорення рухомого тіла обернено пропорційне його масі.

Другий закон Ньютона

Різні сили, що діють на одне й те саме тіло, надають йому різних прискорень. Як показують досліди, прискорення тіла пропорційне діючій на нього силі:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{a_1}{a_2}.$$

У разі дії однакових сил на різні тіла прискорення тіл обернено пропорційне їх масам:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}.$$

Другий закон Ньютона говорить: **прискорення тіла в інерціальній системі відліку прямо пропорційне діючій на тіло силі та обернено пропорційне масі тіла:**

$$a = \frac{F}{m}. \quad (2.11)$$

Вектори прискорення a та сили F співнапрямлені: $a \uparrow \uparrow F$.

У такій формі другий закон Ньютона є слушним для поступального руху незмінного за масою тіла скінченних розмірів; при цьому всі точки тіла рухаються з однаковим прискоренням.

Для розв'язання задач динаміки другий закон Ньютона часто записують у вигляді

$$F = ma. \quad (2.12)$$

Сила, що діє на тіло, дорівнює добуткові маси тіла на його прискорення.

Одиниця сили – ньютон (Н).

Ньютон дорівнює силі, яка надає масі 1 кг прискорення 1 м/с^2 в напрямку дії сили: $1 \text{ Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$.

Якщо на тіло діє кілька сил, то за формулою закону Ньютона (2.11) під силою F слід розуміти рівнодійну всіх цих сил. Такий висновок випливає з принципу незалежності дії сил.

В окремому випадку, коли всі сили, що діють на тіло, напрямлені вздовж однієї прямої, їх рівнодійна, а отже, й прискорення напрямлені вздовж тієї ж самої прямої, і тому рівняння основного закону механіки можна записати в скалярній формі:

$$F = ma, \quad (2.13)$$

де рівнодійна сила F є алгебричною сумою всіх сил, які діють на тіло. При цьому, якщо напрям сили F збігається з напрямом швидкості руху v , то $F \uparrow \uparrow v$; отже, $F > 0$ і $a > 0$. Це означає, що під дією такої сили тіло рухатиметься прискорено.

Якщо вектори сили і швидкості руху напрямлені протилежно ($F \uparrow \downarrow v$), то $F < 0$ і $a < 0$. Під дією такої сили тіло рухається рівносповільнено, наприклад, під дією сили тертя.

Якщо рівнодійна всіх сил, діючих на тіло, дорівнює нулю ($F = 0$), то прискорення тіла дорівнює нулю ($a = 0$), тобто швидкість руху тіла є сталою: $v = \text{const}$ – рух прямолінійний і рівномірний.

Доцентрова сила

Сила або рівнодійна кількох сил, яка забезпечує рух матеріальної точки або тіла колом, називається доцентровою силою $F_{\text{дц}}$. Роль доцентрової сили виконують реально існуючі в природі сили або їх рівнодійні.

Доцентрова сила завжди напрямлена до центра кривини траєкторії. Якщо на тіло масою m діє доцентрова сила (рис. 2.11), то воно рухається з доцентровим або нормальним прискоренням ($a_{\text{дц}} = a_n$), модуль якого дорівнює $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{R}$.

Прискорення $a_{\text{дц}}$, набуте тілом масою m від дії на нього доцентрової сили $F_{\text{дц}}$, визначається згідно з другим законом Ньютона: $a_{\text{дц}} = \frac{F_{\text{дц}}}{m}$, звідки $F_{\text{дц}} = ma_{\text{дц}}$. Враховуючи, що прискорення $a_{\text{дц}}$ за напрямом збігається з силою $F_{\text{дц}}$, модуль доцентрової сили

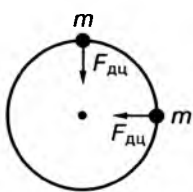


Рис. 2.11

$$F_{\text{дц}} = \frac{mv^2}{R}. \quad (2.14)$$

* Зверніть увагу! Доцентрових сил у природі не існує.

§ 16. Основний закон класичної динаміки

В основній праці І. Ньютона “Математичні початки натуральної філософії” викладено закони механіки, котрі пізніше отримали назву законів Ньютона. В цій праці другий закон має дещо інше формулювання, ніж наведене в § 15:

зміна імпульсу тіла пропорційна прикладеній до нього силі і відбувається за напрямом тієї прямої, вздовж якої ця сила діє.

Математично цей закон можна записати так:

$$\Delta(mv) = F\Delta t \text{ або } \Delta p = F\Delta t, \quad (2.15)$$

де $p = mv$ – імпульс тіла.

Добуток сили F на час її дії Δt , тобто $F\Delta t$, називають імпульсом сили.

Одиниця імпульсу сили – ньютон-секунда (Н·с).

Ньютон-секунда дорівнює імпульсу сили, яка дорівнює 1 Н і діє протягом 1 с.

Другий закон Ньютона можна сформулювати і так.

Імпульс сили, яка діє на тіло, дорівнює зміні імпульсу тіла.

Формулу (2.15) можна дістати так. Згідно з формулою (2.11) $a = \frac{F}{m}$,

але прискорення тіла $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$; тоді формула (2.11) набирає вигляду

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F}{m} \text{ або } m\Delta v = F\Delta t.$$

Враховуючи, що в класичній механіці маса є величиною сталою, її можна внести під знак дельта: $\Delta(mv) = F\Delta t$ або $\Delta p = F\Delta t$.

Формула (2.15) є більш узагальненою формулою другого закону Ньютона, ніж формула (2.11), тому що є слушною як для рухомих тіл сталої, так і змінної маси. Цю формулу можна застосовувати, якщо:

- маса поступально рухомого тіла **змінюється в часі**. Наприклад, маса ракети в польоті зменшується з плином часу, тобто є величиною змінною;

- тіло рухається зі швидкістю, порівнянною зі швидкістю світла у вакуумі. **Маса залежить від швидкості руху тіла.**

З формули (2.15) знайдемо силу

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}.$$

Звідси видно, що сила, яка діє на тіло, дорівнює зміні імпульсу тіла за одиницю часу. Отже, зміна імпульсу тіла, а отже й швидкості, не може відбуватися миттєво.

Якщо $\Delta t = 0$, то $F \rightarrow \infty$ (за умови $m = \text{const}$). Аналогічний висновок дістанемо, проаналізувавши формулу $m\Delta v = F\Delta t$. Тут $m = \text{const} \neq 0$, $F = \text{const} \neq 0$. Якщо $\Delta v \neq 0$, то і $\Delta t \neq 0$.

У разі дії на тіло сили швидкість руху змінюється поступово і тим повільніше, чим більша його маса, яка є мірою інертності тіла.

§ 17. Третій закон Ньютона

Сили дії та протидії

Поняття “сила” завжди стосується двох тіл. Сила виникає, коли взаємодіють два тіла. В процесі взаємодії матеріальні точки або тіла є рівноправними.

На рівність сил при взаємодії тіл указував ще голландський фізик Х. Гюйгенс. Цього висновку він дійшов, вивчаючи зіткнення тіл.

Рівноправність взаємодіючих матеріальних точок або тіл відбиває третій закон Ньютона.

Ньютон сформулював цей закон так: “Будь-якій дії завжди перешкоджає рівна і протилежна протидія” (рис. 2.12). В наш час третій закон Ньютона гласить:

сили взаємодії двох тіл в інерціальній системі відліку рівні за модулем, протилежні за напрямом і діють вздовж прямої, що з'єднує ці тіла:

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}.$$

Одну з цих сил, наприклад \mathbf{F}_{12} , називають силою дії, іншу (\mathbf{F}_{21}) – силою протидії (див. рис. 2.12). Сила дії та сила протидії завжди діють парами і є силами однієї природи, оскільки виникають у процесі взаємодії тіл. Ці сили прикладені до різних тіл і не можуть зрівноважувати одна одну.

Сили \mathbf{F}_{12} і \mathbf{F}_{21} , що прикладені до різних матеріальних точок, можуть взаємно врівноважуватися тільки тоді, коли обидві матеріальні точки належать одному і тому самому твердому тілу. В цьому разі сили \mathbf{F}_{12} і \mathbf{F}_{21} є внутрішніми силами взаємодії матеріальних точок тіла. Застосовуючи другий і третій закони Ньютона до всіх точок твердого тіла, можна показати, що сума всіх внутрішніх сил взаємодії матеріальних точок твердого тіла дорівнює нулю, оскільки кожній силі дії відповідає рівна за модулем і протилежна за напрямом сила протидії.

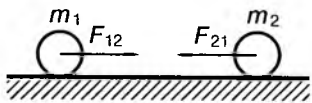


Рис. 2.12

Застосування третього закону Ньютона

Розглянемо взаємодію двох тіл (A і B). Наприклад, людина, стоячи в човні, підтягає інший човен за допомогою мотузки (рис. 2.13). Згідно з третім законом Ньютона

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}. \quad (2.16)$$

Якщо на тіло діє сила, то відповідно до другого закону Ньютона тіло під дією цієї сили набуває прискорення і співвідношення (2.16) можна переписати у вигляді $m_A a_A = -m_B a_B$. Знак “мінус” у цій

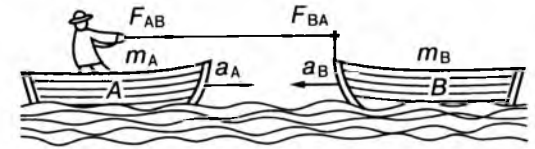


Рис. 2.13

формулі показує, що прискорення тіл A і B протилежно напрямлені: $\mathbf{a}_A \downarrow \mathbf{a}_B$. За третім законом Ньютона модулі цих сил однакові, отже, $m_A a_A = m_B a_B$. Визначимо відношення модулів прискорень взаємодіючих тіл:

$$\frac{a_A}{a_B} = \frac{m_B}{m_A}.$$

Прискорення, набуті тілами при взаємодії, обернено пропорційні масам взаємодіючих тіл. Чим більша маса тіла, тим менше його прискорення.

Знайдемо відношення прискорень Землі a_{\oplus} і космічного корабля a при його запусканні. Сучасні космічні кораблі багаторазового використання мають масу порядку $m = 2 \cdot 10^6$ кг. Маса Землі $M_{\oplus} = 6 \cdot 10^{24}$ кг, тоді

$$\frac{a_{\oplus}}{a} = \frac{m}{M_{\oplus}}; \quad \frac{a_{\oplus}}{a} = \frac{2 \cdot 10^6 \text{ кг}}{6 \cdot 10^{24} \text{ кг}} \approx 6,6 \cdot 10^{-19}.$$

Три закони Ньютона описують рух майже всіх матеріальних об'єктів, які оточують нас: від молекул газів до планет Сонячної системи.

§ 18. Закон всесвітнього тяжіння

Геліоцентрична система світу

Геоцентричний світогляд, або вчення Аристотеля – Птолемея (II ст. н. е.), що існував майже 2 тис. років, спирався на довгий загальнолюдський досвід. Люди щоденно спостерігали схід і захід Сонця, добовий рух зірок і не підозрювали, що Земля не покоїться, а з величезною швидкістю рухається в світовому просторі.

У 1543 р. було видано книжку польського астронома М. Коперника (1473–1543) “Про обертання небесних сфер”, в якій він обґрунтував геліоцентричну систему світу. Ця наукова праця стала вирішальним, фундаментальним внеском у наукову революцію, докорінно змінила погляд на природу. Вчення Коперника спростувало геоцентричне вчення Птолемея.

Книжка М. Коперника поставила перед наукою низку важливих проблем, зокрема перед астрономією – перевірити відповідність нової теорії фактам. Треба було уточнити дані спостережень за рухом планет і з’ясувати, чи відповідають ці дані моделі Коперника.

Геліоцентрична система світу потребувала й фізичного обґрунтування. Слід було з’ясувати, що “пов’язує” планети з Сонцем, Землю – з Місяцем. Які фізичні причини руху взагалі і руху планет зокрема? Отже, завдяки великому відкриттю Коперника з’явилась наукова програма, виконання якої зумовило виникнення експериментального і математичного природознавства і класичної механіки, або механіки Ньютона.

Й. Кеплер (1571–1630) – активний прибічник геліоцентричного вчення – привів систему М. Коперника у відповідність з останніми даними астрономії. Використовуючи результати спостережень Т. Браге та свої власні, Кеплер відкрив закони руху планет (три закони Кеплера).

Вирішальний крок у боротьбі за геліоцентричну систему і новий світогляд зробив Г. Галілей. Він обґрунтував систему М. Коперника фізично в головному своєму творі “Діалог про дві системи світу – Птолемея і Коперника”.

Фундаментальний внесок у фізичне обґрунтування геліоцентричної системи світу належить І. Ньютону. Із законів Й. Кеплера І. Ньютон довів існування сили, направленої до Сонця, яка обернено пропорційна квадрату відстані планет від Сонця. Він відкрив існування в природі сили, яка обумовлює тяжіння тіл – Сонця до Землі, тяжіння Землі, як і інших планет, до Сонця. Свої висновки І. Ньютон підтверджує розрахунками, користуючись астрономічними і геодезичними даними та формулою доцентрового прискорення, отриманою Х. Гюйгенсом.

Сила всесвітнього тяжіння

Усі тіла під впливом притягання до Землі падають поблизу її поверхні зі сталим прискоренням. Г. Галілей показав, що це прискорення – прискорення вільного падіння ($g=9,8\text{ м/с}^2=980\text{ см/с}^2$) – не залежить від маси тіла.

Ньютонові було 23 роки, коли через епідемію чуми йому довелося покинути Кембрідж і оселитися в селі. За існуючою легендою, якимось побачив-

ши в садочку падаюче яблуко, Ньютон замислився, чи діє земне тяжіння на Місяць так само, як і на яблуко. Ньютон був першим, хто спочатку припустив, а потім строго довів, що причиною падіння яблука на Землю, руху Місяця навколо Землі і планет навколо Сонця є дія сили тяжіння. Ця сила – сила притягання – діє між двома будь-якими тілами у Всесвіті.

У своїх міркуваннях І. Ньютон виходив з наступного.

Тіла, що вільно падають у поверхні Землі ($R_{\oplus}=6,4\cdot 10^6\text{ м}$), мають прискорення вільного падіння $g=980\text{ см/с}^2$. З астрономічних спостережень було відомо, що Місяць віддалений від Землі на відстань $R=60R_{\oplus}$. Прискорення a , яке надається Місяцю силою притягання до Землі, на цій відстані має бути меншим, ніж g , у R^2 разів, тобто в 60^2 разів, і становити $a=\frac{g}{60^2}=\frac{980\text{ см/с}^2}{60^2}=0,27\text{ см/с}^2$.

Прискорення Місяця a направлене до Землі і має дорівнювати доцентровому прискоренню Місяця при русі його навколо Землі коловою орбітою: $a=a_n$. Період обертання Місяця навколо Землі становить $T=27,32\text{ доби}=2,36\cdot 10^6\text{ с}$. Місяць рухається навколо Землі колом радіуса $R=60R_{\oplus}=3,84\cdot 10^{10}\text{ см}$. Доцентрове (нормальне) прискорення Місяця, що спричинюється силою притягання Землі, a_n можна вирахувати за кінематичною формулою

$$a_n = \frac{v^2}{R},$$

де v – швидкість руху Місяця орбітою; $v = \frac{2\pi R}{T}$. Тоді

$$a_n = \frac{4\pi^2}{T^2} R, \quad a_n = \frac{4 \cdot 3,14^2}{(2,36 \cdot 10^6\text{ с})^2} \cdot 3,84 \cdot 10^{10}\text{ см} = 0,27\text{ см/с}^2.$$

Числові значення прискорень збіглися ($a=a_n$), отже, на Місяць, як і на тіла, що вільно падають у поверхні Землі, діє сила тяжіння Землі, і ця сила є обернено пропорційною квадрату відстані r між взаємодіючими тілами: $F \sim \frac{1}{r^2}$.

Тіла, що знаходяться поблизу поверхні Землі, падають зі сталим прискоренням g , отже, на них діє сила притягання F , яка є прямо пропорційною масі тіла: $F=mg$, тому для всіх тіл

$$\frac{F}{m} = g = \text{const}.$$

Вільно падаюче тіло і Земля взаємодіють. Згідно з третім законом Ньютона на Землю, як і на тіло, має діяти така ж сама сила притягання, прямо

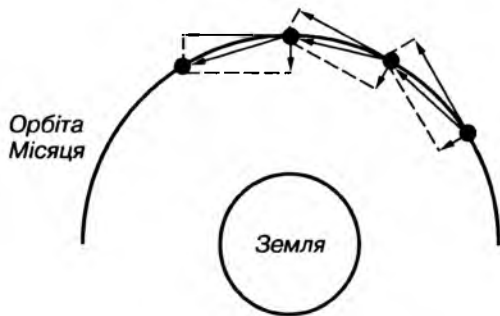


Рис. 2.14

пропорційна масі Землі M_{\oplus} . Тому сила тяжіння прямо пропорційна як масі тіла (m), так і масі Землі (M_{\oplus}). Отже, сила притягання прямо пропорційна добутку мас взаємодіючих тіл:

$$F \sim m \cdot M.$$

Таким чином, І. Ньютон вважав, що рух Місяця навколо Землі, рух планет навколо Сонця – це вільне падіння, яке то-

читься мільярди років. Причиною такого руху є сила всесвітнього тяжіння. Але чому планети не падають на Сонце, а Місяць не падає на Землю?

Місяць не падає на Землю, а планети – на Сонце тому, що вони рухаються за інерцією. Якби на Місяць не діяла сила притягання Землі, то Місяць, рухаючись за інерцією вздовж прямої лінії, умчав би в безодню космічного простору. Якби припинився рух Місяця за інерцією, він впав би на Землю. Падіння продовжувалося б, як вирахував І. Ньютон, чотири доби дев'ятнадцять годин п'ятдесят чотири хвилини п'ятдесят сім секунд. Вільне падіння і рух за інерцією відбуваються одночасно, тому Місяць рухається за кривою, що близька до кола (рис. 2.14).

Закон всесвітнього тяжіння

Відкриття закону всесвітнього тяжіння пов'язане з розв'язанням задач динаміки першого типу. Ньютону були відомі закони руху планет навколо Сонця – закони Кеплера. За відомими кінематичними законами руху планет Ньютон визначив силу всесвітнього тяжіння і установив закон всесвітнього тяжіння.

Закон всесвітнього тяжіння є фундаментальним законом природи.

Будь-які дві матеріальні точки взаємодіють з силою, пропорційною добутку їх мас і обернено пропорційною квадрату віддалі між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}. \quad (2.17)$$

Коефіцієнт пропорційності G називається гравітаційною сталою, яка визначається експериментально.

Уперше гравітаційну сталу було визначено в 1798 р. англійським вченим Г. К. Кавендішем. Наступні вимірювання лише уточнювали її значення.

Гравітаційна стала дорівнює модулю сили притягання двох тіл масою по 1 кг кожне, які знаходяться на віддалі 1 м одне від одного:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2) \text{ або } G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2.$$

Гравітаційні сили, сили притягання напрямлені вздовж прямої, яка з'єднує взаємодіючі точки, а тому є **центральною силою**.

Закон всесвітнього тяжіння є слушним не тільки для матеріальних точок, але й для:

- тіл довільної форми, розміри яких малі у порівнянні з відстанями між їх центрами мас;
- тіл із сферично-симетричним розподілом мас. У цих випадках r – відстань між центрами мас взаємодіючих тіл.

Якщо тіло масою m знаходиться над поверхнею Землі на висоті h , то на нього діє сила земного тяжіння, яка визначається за формулою

$$F = G \frac{m M_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}, \quad (2.18)$$

де M_{\oplus} , R_{\oplus} – маса і радіус Землі.

Перевірка закону всесвітнього тяжіння в умовах Землі та за допомогою чисельних астрономічних спостережень підтвердила його загальний характер.

Перші прямі вимірювання гравітаційної сталої були виконані Г. Кавендішем приблизно через сто років після відкриття Ньютона. Основу установки становила чутлива крутильна вага (рис. 2.15). На кінцях коромисла ваги було укріплено кульки невеликої маси $m_1 = m_2$ і за кутом закрученості нитки, яка підтримувала коромисло, вимірювалась сила притягання кульок до масивних нерухомих куль M . Якщо величини мас та їх розташування відомі, то із співвідношення (2.17) можна обчислити значення константи G .

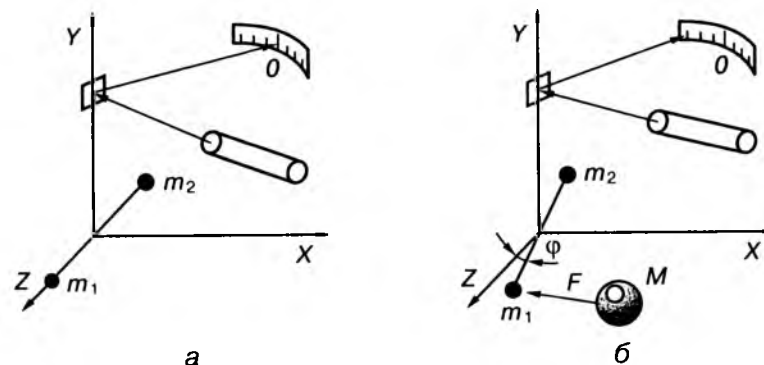


Рис. 2.15

Г. Кавендіш знайшов, що $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$. Зазначимо, що при цьому йому довелося виміряти сили розміром $10^{-8} - 10^{-9} \text{ Н}$. У звичайних умовах на тіла з боку навколишнього середовища завжди діють набагато більші за величиною сили: повітряні потоки, тертя, електричні та магнітні поля тощо. Виміряти на цьому тлі слабке притягання тіл одне до одного з експериментальною технікою XVIII ст. було вельми непросто. У такому сенсі дослід Г. Кавендіша – один з найтонших і блискучих експериментів того часу. Наукове значення цього експерименту важко переоцінити. Вимірювання G перетворило закон тяжіння з якісного співвідношення на потужний розрахунковий інструмент. Кавендіш за результатами свого експерименту вперше обчислив, застосовуючи співвідношення (2.17), середню густину Землі. Як він сам сказав: “Я зважив Землю!”

Завдяки закону всесвітнього тяжіння були відкриті восьма та дев’ята планети Сонячної системи – Нептун (1846 р.) і Плутон (1930 р.).

Сьома планета Сонячної системи – Уран – відкрита англійським астрономом В. Гершелем у 1781 р. Таблицю положень семи планет Сонячної системи було складено на багато років наперед. Через майже 60 років при перевірці даних цієї таблиці виявилось, що табличні і фактичні дані не збігаються. Було зроблено припущення, що розбіжність даних пов’язана з дією на Уран невідомої планети, яка знаходиться від Сонця далі, ніж Уран. Користуючись законом всесвітнього тяжіння і знаючи про розбіжність даних, англійський вчений Дж.-К. Адамс і французький вчений У. Левер’є обчислили положення цієї планети. Левер’є про результати обчислень повідомив німецького астронома Й.-Г. Галле. Під час першого ж спостереження увечері 23 вересня 1846 р. Й.-Г. Галле відкрив ще одну планету Сонячної системи, яку назвали Нептун. Аналогічно було відкрито й дев’яту – найменшу планету Сонячної системи Плутон. Відкриття сталося 14 березня 1930 р.

Закон всесвітнього тяжіння дозволяє обчислювати масу планет і їх супутників, пояснювати явища припливів і відпливів, описувати рухи в зоряних скупченнях – галактиках.

Поширивши цей закон на весь Всесвіт у цілому, І. Ньютон продемонстрував геніальність інтуїції вченого, оскільки співвідношення (2.17) було отримане на підставі закономірностей, слухних у межах однієї Сонячної системи. Тільки в наш час спостереження за далекими зорями і зоряними системами підтвердили загальну слушність і універсальність закону всесвітнього тяжіння.

§ 19. Гравітаційне поле

Гравітаційна взаємодія

Гравітаційна взаємодія – це взаємне притягання матеріальних тіл, яке спостерігається в будь-якому середовищі та вакуумі.

Гравітаційна взаємодія властива всім тілам Всесвіту. Проявляється ця взаємодія у вигляді сил всесвітнього тяжіння, які залежать тільки від розміщення тіл одне відносно одного. Гравітаційна взаємодія є далекодією, тобто її радіус дії вважається нескінченно великим. Із чотирьох типів фундаментальних взаємодій інтенсивність гравітаційної взаємодії найменша, проте вона відіграє важливу роль у Всесвіті тому, що сили тяжіння забезпечують існування планет, планетних систем – Сонячної системи, зірок, зоряних систем та інших об’єктів Всесвіту.

Рух тіл у гравітаційному полі Землі

Гравітаційне поле – це форма матерії, за допомогою якої здійснюється гравітаційна взаємодія.

Гравітаційне поле Землі – це область Всесвіту, в якій сили притягання, що діють на матеріальні об’єкти з боку Землі, більші за сили притягання, що діють з боку інших космічних тіл.

Траєкторія руху тіл у гравітаційному полі Землі залежить від початкових умов.

Якщо початкова швидкість v_0 тіла, піднятого на висоту h над поверхнею Землі, напрямлена перпендикулярно до осі X , тобто за лінією дії гравітаційної сили (рис. 2.16)

$$F = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2},$$

то, згідно з другим законом Ньютона, ця сила надає тілу прискорення a , напрямлене, як і сила F , до центра Землі:

$$ma = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2},$$

звідки

$$a = G \frac{M_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}.$$

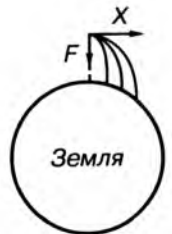


Рис. 2.16

Поблизу поверхні Землі ($h \ll R_{\oplus}$) прискорення a дорівнює прискоренню вільного падіння g :

$$a = G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}; \quad a = g = \text{const}.$$

Тіла, що знаходяться в гравітаційному полі Землі, поблизу її поверхні рівноприскорено рухаються за прямою до її центру (вільно падають) з прискоренням вільного падіння

$$g = G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}. \quad (2.19)$$

При будь-яких $h \ll R_{\oplus}$ прискорення є функцією $r = R + h$:

$$g = G \frac{M_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}; \quad g = G \frac{M_{\oplus}}{r^2}. \quad (2.20)$$

Із формул (2.19) і (2.20) випливає, що прискорення вільного падіння не залежить від маси падаючого тіла – m , а визначається масою Землі M_{\oplus} – масою тіла, яке створює гравітаційне поле (джерела поля), та взаємним розміщенням взаємодіючих тіл.

Прискорення вільного падіння тіл на Місяці $g = 1,6 \text{ м/с}^2$. Поблизу поверхні планет їх гравітаційне прискорення залежить, як впливає з формули (2.19), від їх маси та радіуса.

Нижче наведено значення гравітаційних прискорень планет Сонячної системи поблизу їх поверхні.

Гравітаційні прискорення планет

Планета	$g, \text{ м/с}^2$	Планета	$g, \text{ м/с}^2$
Меркурій	3,7	Сатурн	12
Венера	8,9	Уран	11
Марс	3,7	Нептун	12
Юпітер	26	Плутон	2

Підставивши формулу (2.20) в (2.18), визначимо силу тяжіння

$$F = mg. \quad (2.21)$$

Якщо початкова швидкість v_0 тіла, піднятого на висоту h над поверхнею Землі, напрямлена горизонтально, тобто вздовж осі X , то рух тіла буде складним. Він складатиметься з двох незалежних рухів: вільного падіння та прямолінійного і рівномірного зі швидкістю $v_0 = \text{const}$ вздовж осі X . Траєкторія руху – крива лінія (див. рис. 2.16). Чим більше v_0 , тим далі від місця “кидання” приземляється тіло. При певній швидкості $v_0 = v_1$ тіло не повертається на Землю. Швидкість v_1 називається першою космічною швидкістю.

Перша космічна швидкість v_1 – це мінімальна швидкість, яку треба надати тілу, щоб воно перетворилося на супутник Землі і рухалося колом, площина якого проходить через центр Землі.

Коли супутник Землі рухається колом радіуса $R_{\oplus} + h$, на нього діє гравітаційна сила

$$F = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}.$$

Ця сила надає супутникові нормальне – доцентрове прискорення

$$a_n = \frac{v_1^2}{R_{\oplus} + h}.$$

За другим законом Ньютона

$$m \frac{v_1^2}{R_{\oplus} + h} = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}.$$

Скоротивши обидві частини рівності на $\frac{m}{R_{\oplus} + h}$, дістанемо

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus} + h}}.$$

Якщо супутник запускається з Землі ($h = 0$), то перша космічна швидкість

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_{\oplus}}{R}}.$$

Згідно з (2.19) $g = G \frac{M_{\oplus}}{R^2}$,

тому

$$v_1 = \sqrt{gR}, \quad (2.22)$$

$$v_1 = \sqrt{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} \approx \approx 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} \approx 7,9 \text{ км/с}.$$

Якщо швидкість запуску більша за першу космічну ($v > v_1$), але менша за другу космічну, то траєкторія руху є еліпсом, один з фокусів якого збігається з центром Землі (рис. 2.17).

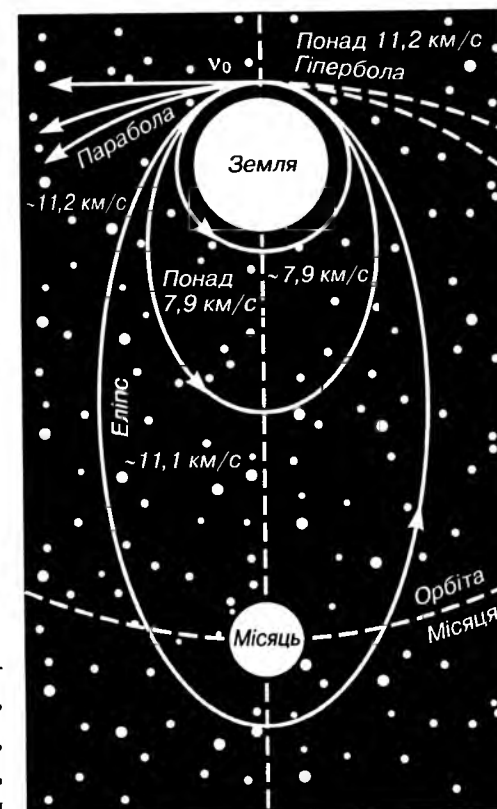


Рис. 2.17

Планети – супутники Сонця. Вони рухаються еліптичними орбітами; в одному з фокусів еліпса знаходиться Сонце. Орбіти планет лежать приблизно в одній площині.

§ 20. Сила тяжіння. Вага

Прискорення вільного падіння і сила тяжіння

Вимірювання прискорення вільного падіння в різних точках земної поверхні показують, що його числове значення й напрям залежать від широти місцевості. Максимального значення прискорення вільного падіння набуває на полюсах – $g_{\max} \approx 9,83 \text{ м/с}^2$, мінімального значення – $g_{\min} \approx 9,78 \text{ м/с}^2$ – на екваторі. Крім того, прискорення вільного падіння в усіх точках земної поверхні, крім полюсів і екватора, не напрямлене точно до центра Землі. Це пов'язано з тим, що:

- Земля має форму геоїда, а не кулі, тобто “сплюснута” біля полюсів;
- Земля обертається навколо своєї осі.

Розглянемо тіло, що знаходиться в довільній точці B поверхні Землі.

У точці B , яка знаходиться на широті φ , на нерухомій відносно Землі підставці лежить тіло (рис. 2.18). На це тіло діють дві сили: сила притягання F_G і сила реакції земної поверхні

(або сила реакції опори) N , напрям якої визначається не тільки силою притягання, але також обертанням Землі. Рівнодійна F цих двох сил забезпечує рух тіла колом з центром O' при добовому обертальному русі Землі навколо осі.

Сила тяжіння $F_{\text{тяж}}$ – сила, що діє на тіло внаслідок його земного тяжіння, рівна за модулем силі реакції N , але напрямлена протилежно їй.

Сила тяжіння дорівнює добутковій маси тіла на прискорення вільного падіння і прикладена ця сила до тіла:

$$F_{\text{тяж}} = mg. \quad (2.23)$$

З рис. 2.17 видно, що сили F_G і $F_{\text{тяж}}$ збігаються за напрямом, якщо точка B знаходиться на полюсі або екваторі. Якщо точка B знаходиться на одному з полюсів, то вона не бере участі в добовому обертальному русі Землі. Точки земної поверхні, які лежать на екваторі, рухаються колом, радіус якого максимальний і дорівнює радіусу Землі.

Вага тіла. Невагомість

Вага тіла P – сила, з якою тіло внаслідок притягання до Землі діє на опору або підвіс, які утримують його від вільного падіння.

Вага тіла прикладена не до тіла, а до опори чи підвісу.

Вага тіла чисельно дорівнює діючій на тіло силі тяжіння тільки в тому разі, коли опора чи підвіс знаходяться в спокої відносно Землі або в стані рівномірного прямолінійного руху, тобто $a = 0$. Якщо ж підвіс або опора рухаються з прискоренням, то вага тіла може бути як більшою, так і меншою за силу тяжіння.

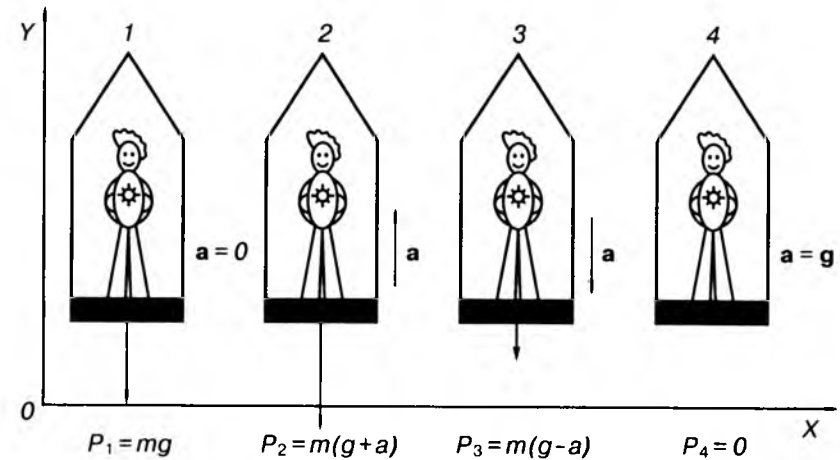


Рис. 2.19

Нехай, наприклад, хлопчик масою m знаходиться в ліфті (рис. 2.19). На нього діють напрямлена вертикально вниз сила тяжіння mg і напрямлена вертикально вгору сила реакції опори N (на рисунку не показані). Якщо ліфт підіймається з прискоренням a (випадок 2), то рівняння руху дитини в проекції на вісь OY $N_2 - mg = ma$, звідки $N_2 = m(g + a)$.

За третім законом Ньютона з такою самою за значенням силою $|P_2| = |N_2|$ тіло давить на підлогу ліфта. Іншими словами, вага дитини в системі відліку “ліфт” дорівнює $P_2 = m(g + a)$, тобто є більшою за силу тяжіння. В цьому разі хлопчик перебуває в стані перевантаження. (Великі перевантаження зазнають космонавти під час старту і посадки космічних кораблів.)

Якщо ліфт опускається з прискоренням $-a$ (випадок 3), то рівняння руху дитини $N_3 - mg = -ma$, звідки $N_3 = m(g - a)$. Дитина давить на підлогу з силою $|P_3| = |N_3|$, тобто її вага в системі “ліфт” менша за силу тяжіння. При вільному падінні ліфта ($a = g$) вага дитини дорівнює нулеві. У цьому разі вона знаходиться в стані невагомості.

Невагомість – це стан, у якому тіло рухається під дією тільки сили тяжіння.

В усіх розглядуваних випадках сила тяжіння $F_{\text{тяж}} = mg$.

У стані невагомості знаходяться всі предмети в космічному кораблі-спутнику, коли припиняється робота двигуна і на корабель діє тільки сила притягання до Землі. Не можна говорити про вагу Місяця, Землі та інших планет Сонячної системи. Космічні об'єкти характеризуються масою.

§ 21. Способи вимірювання маси тіла

У законах І. Ньютона маса тіла є мірою його інертності. В законі всесвітнього тяжіння маса характеризує ще одну властивість тіл – їх здатність взаємодіяти з іншими тілами. У цих випадках маса виступає як міра гравітації, або міра тяжіння, і її називають гравітаційною масою.

Схематично все викладене у цьому параграфі показано на рис. 2.20.

У сучасній фізиці з високим ступенем точності встановлена тотожність значень інертної та гравітаційної мас даного тіла. Експериментальна перевірка рівності інертної та гравітаційної мас була проведена в 1896 р. угорським фізиком Етвешем; точність вимірювань становила 10^{-9} . Радянський фізик Брагинський у 1971 р. виконав вимірювання з точністю 10^{-12} .

Найбільш загальний спосіб вимірювання маси тіл – за їх інертністю.

Якщо тіло невідомої маси (m_x) взаємодіє з тілом, масу якого умовно взято за одиницю (еталон маси m_e), то внаслідок взаємодії тіла набудуть

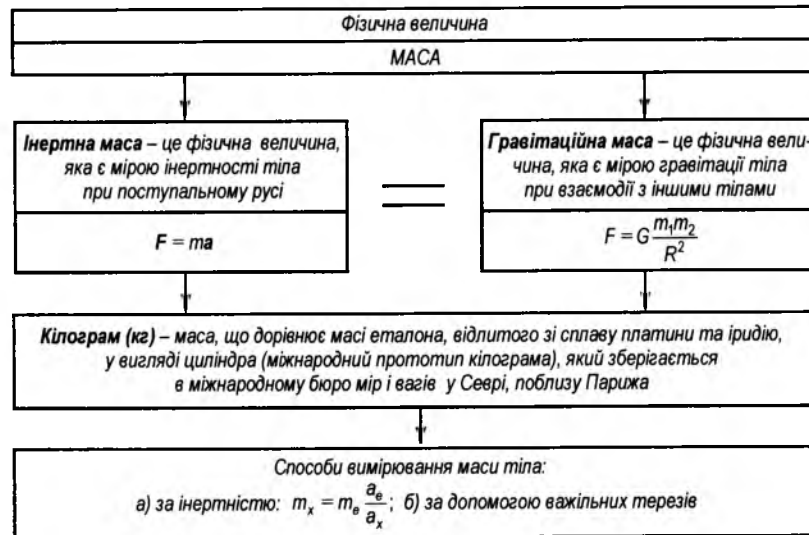


Рис. 2.20

прискорення a_x і a_e . Вимірявши прискорення a_x невідомої маси та прискорення a_e еталона маси, зі співвідношень $\frac{a_e}{a_x} = \frac{m_x}{m_e}$ дістанемо

$$m_x = m_e \frac{a_e}{a_x}.$$

Цей спосіб вимірювання маси ґрунтується на одночасному застосуванні другого та третього законів Ньютона.

На практиці й у фізичних експериментах масу вимірюють за допомогою важільних терезів.

Рівнораменні важільні терези знаходяться в рівновазі за умови (рис. 2.21) $m_e g = m_x g$, звідки випливає $m_e = m_x$, оскільки прискорення вільного падіння в місцях знаходження обох сил однакове.

Цей спосіб вимірювання маси тіл ґрунтується на застосуванні закону всесвітнього тяжіння, другого та третього законів Ньютона, умови рівноваги тіла, яке має вісь обертання.

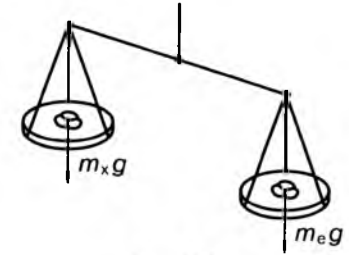


Рис. 2.21

§ 22. Сили в механіці

Сила тертя

Сила тертя – це сила, яка виникає при стиканні поверхонь тіл і перешкоджає їх відносному переміщенню в площині дотику.

Розрізняють сили тертя спокою $F_{\text{т,сп}}$, сили тертя ковзання $F_{\text{т,ковз}}$, сили тертя кочення $F_{\text{т,коч}}$. Для одних і тих самих поверхонь $F_{\text{т,сп}} > F_{\text{т,ковз}} > F_{\text{т,коч}}$. Сили тертя мають електромагнітну природу і залежать від швидкості руху тіл відносно одне одне. Розв'язуючи задачі динаміки, частіше доводиться мати справу з тертям ковзання, яке виникає при відносному переміщенні стичних тіл. Сила тертя ковзання $F_{\text{т,ковз}}^*$, що виникає при цьому, завжди напрямлена в бік, протилежний відносній швидкості стичних тіл, і залежить від сили нормального тиску N :

$$F_{\text{т}} = \mu N. \quad (2.24)$$

Сила нормального тиску N завжди перпендикулярна до поверхні, по якій рухається тіло. У випадку руху по горизонтальній поверхні $N = mg$, тому $F_{\text{т}} = \mu mg$.

* Далі $F_{\text{т,ковз}}$ позначатимемо $F_{\text{т}}$.

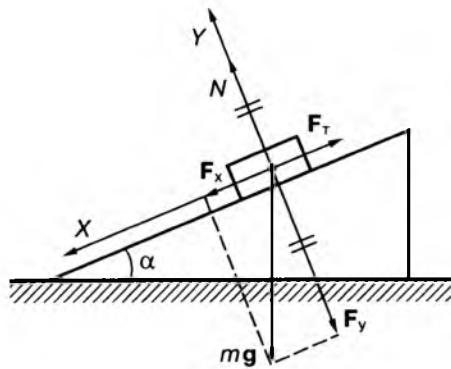


Рис. 2.22

Тертя ковзання характеризується коефіцієнтом тертя ковзання

$$\mu = F_T / N,$$

де F_T – сила тертя; N – сила нормального тиску.

Коефіцієнт тертя дорівнює відношенню двох величин однакової розмірності і тому є безрозмірною величиною. На рис. 2.22 зображено тіло, що лежить на похилій площині, та сили, що діють на нього. Вісь X паралельна, вісь Y –

перпендикулярна до похилої площини. В даному випадку сила $|F_Y| = |N|$ є складовою сили тяжіння mg тіла. Інша складова сили mg , яка спричинює рух тіла, напрямлена паралельно тертьовим поверхням F_X .

Сила тертя ковзання F_T виникає в місці контакту; проте, вважаючи поперечний розмір тіла, яке лежить на похилій площині, незначним, переносимо точку її прикладання в центр ваги тіла. Напрям сили тертя ковзання протилежний напрямку сили F_X . Ця сила, спонукаючи тіло до руху вниз по похилій площині, дорівнює

$$F_x = mg \sin \alpha,$$

де α – кут нахилу площини до горизонту.

В свою чергу, сила тертя ковзання F_T , яка утримує тіло на похилій площині, також залежить від кута α , оскільки

$$N = mg \cos \alpha,$$

і тоді

$$F_T = \mu mg \cos \alpha.$$

Співвідношення сил F_x і F_T залежить від кута α і фізичних характеристик тертьових поверхонь, тобто від коефіцієнта тертя.

Тіло починає рухатись по похилій площині, коли сила F_x більша за силу тертя:

$$F_x \geq F_T.$$

Коли тіло знаходиться в спокої, діюча в цьому випадку сила тертя називається *силою тертя спокою*, а коефіцієнт тертя – *коефіцієнтом тертя спокою*.

Збільшуючи кут нахилу α , можна змусити тіло рухатись. У момент початку руху рушійна сила F_x дорівнюватиме максимальному значенню

сили тертя спокою. Оскільки сила тертя спокою більша за силу тертя ковзання, то очевидно, що і коефіцієнт тертя спокою $\mu_{сп}$ перевищує коефіцієнт тертя ковзання у більшості випадків (див. нижче). Тому зрушити тіло з місця “важче”, ніж потім його переміщати ($\mu_{сп} > \mu$).

Коефіцієнт тертя

Матеріали	$\mu_{сп}$	μ	Матеріали	$\mu_{сп}$	μ
Лід – лід	0,05–0,15	0,02	Сталь – сталь	0,6	0,4
Сталь – лід	0,1	0,05	Гума – мокрий бетон	0,7	0,5
Гума – лід	0,3	0,02	Скло – скло	0,9	0,7
Дерево – дерево	0,5	0,5	Гума – дерево	0,9	0,7
Гума – асфальт	0,6	0,4			

Коефіцієнти тертя $\mu_{сп}$ і μ великою мірою залежать від роду і стану тертьових поверхонь; крім того, коефіцієнт тертя ковзання залежить і від швидкості руху. У багатьох випадках він на початку руху зменшується зі збільшенням швидкості руху, а потім зростає.

Із щоденного досвіду відомо, що легше везти вантаж на візку, ніж його тягти, тому що коефіцієнт тертя кочення менший за коефіцієнт тертя ковзання для одних і тих самих матеріалів ($\mu_{коч} < \mu$). Наприклад, для матеріалів сталь–сталь $\mu_{коч} = 0,001$.

Сила пружності

Усі тіла складаються з молекул або атомів, а атом – з позитивно зарядженого ядра і електронів, заряд яких негативний. Між атомами і молекулами тіл одночасно діють сили взаємного притягання та відштовхування. Ці сили мають електромагнітну природу. Модулі цих сил залежать від відстані між атомами і молекулами. Якщо відстань між молекулами приблизно дорівнює діаметру молекули, то сили притягання дорівнюють силам відштовхування і їх рівнодійна (результуюча) дорівнює нулеві. Молекула знаходиться в рівновазі.

У разі деформації тіла відстань між молекулами змінюється, рівновага порушується:

- при стисканні тіла відстань між молекулами зменшується, сили відштовхування зростають і намагаються збільшити цю відстань, “повернути” молекулу в рівноважний стан;
- при розтягу тіла відстань між молекулами збільшується. Сили притягання зростають і намагаються зменшити цю відстань, “повернути” молекулу в рівноважний стан.

Деформація тіла відбувається під дією зовнішніх сил і супроводжується зміненням розмірів і форми твердого тіла.

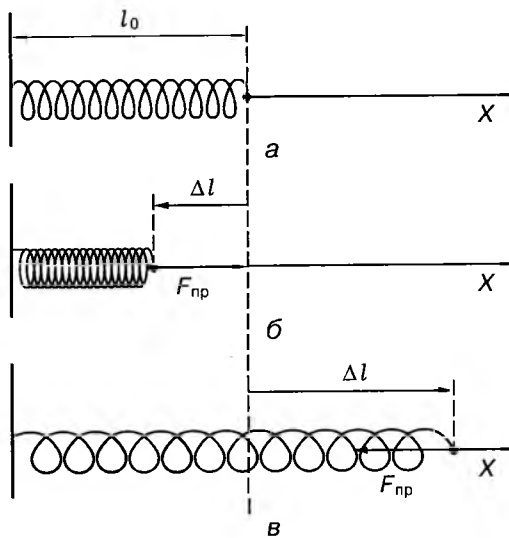


Рис. 2.23

Деформації, які повністю зникають у разі зняття деформуючих чинників, називають пружними. Деформації, які не зникають у разі зняття деформуючих чинників, є пластичними.

Пружність і пластичність тіл загалом визначається матеріалом, з якого вони виготовлені. Наприклад, сталь і гума пружні, а мідь і віск пластичні.

Пружні деформації, що виникають у тілах, досить різноманітні. Розрізняють чотири основних види деформацій: розтяг (або стиск), зсув, крутіння і згин.

Найчастіше під час експлуатації різних конструкцій доводиться обчислювати пружні деформації розтягу або стиску.

Деформації розтягу і стиску характеризуються подовженням Δl , яке дорівнює

$$\Delta l = l - l_0,$$

де l_0 – початкова довжина тіла або пружини (рис. 2.23).

При розтягу $\Delta l > 0$ – довжина тіла l після розтягу більша за початкову довжину тіла l_0 (рис. 2.23, б). Вектор Δl збігається з додатним напрямом осі X .

При стиску $\Delta l < 0$ – довжина тіла l після стиску менша за початкову довжину тіла l_0 (рис. 2.23, в). Вектор Δl напрямлений протилежно осі X .

Сили, що виникають при деформації і намагаються відновити початкові розміри та форму тіла, називають силами пружності – F_{np} .

Сила пружності F_{np} , що виникає при деформації тіла, завжди напрямлена в бік, протилежний зсуву частинок тіла.

У разі одномірної лінійної деформації розтягу або стиску сила пружності напрямлена вздовж лінії дії зовнішньої сили і пропорційна вектору Δl .

Зв'язок між модулем сили пружності F_{np} і подовженням l виражається законом Гука.

Модуль сили пружності, яка виникає при пружній деформації розтягу або стиску тіла, пропорційний його подовженню:

$$|F_{np}| = -k\Delta l. \quad (2.25)$$

Коефіцієнт пропорційності k називають коефіцієнтом пружності або жорсткістю.

Жорсткість виражається в ньютонках на метр (Н/м).

Закону Гука підпорядковуються малі деформації, що виникають у стрижнях з чавуну, сталі, алюмінію, пружинах та інших пружних тілах, тобто якщо $\Delta l \ll l_0$. У разі великих деформацій закон Гука не виконується.

Як впливає зі співвідношення

$$F_{np} = k\Delta l, \quad (2.26)$$

за подовженням пружини Δl можна визначити силу, яка діє на неї. Закон Гука лежить в основі вимірювання сил.

Проградуєвана пружина, призначена для вимірювання сил, називається пружинним динамометром. За його допомогою вимірюють сили, які мають довільний напрям у просторі.

Короткі висновки

- Динаміка – розділ механіки, в якому вивчаються закони руху тіл і чинники, що спричиняють або змінюють цей рух.
- Перший закон Ньютона. Будь-яке тіло зберігає стан відносного спокою або рівномірного прямолінійного руху до тих пір, поки зовнішнє діяння не змінить цього стану.
- Інерціальні системи відліку – системи відліку, в яких виконується перший закон Ньютона.
- Сила F – векторна фізична величина, яка є мірою механічного діяння на тіло з боку інших тіл. Це діяння проявляється в зміні швидкості рухомого тіла. Сила вважається заданою, якщо відомі її числове значення, напрям і точка прикладання.
- Принцип незалежності дії сил. Якщо на тіло одночасно діють кілька сил, то кожна з сил діє незалежно одна від одної.
- Інертність – властивість тіла зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху.
- Маса – фізична величина, яка є мірою інертності тіла при поступальному русі. Маса – величина скалярна. Одиниця маси – кілограм (кг). У класичній механіці ($v \ll c$) маса тіла вважається сталою величиною, яка не залежить від швидкості руху тіла. Маса тіла дорівнює сумі мас усіх частинок (або матеріальних точок), із яких воно складається. Маса замкненої системи тіл лишається незмінною при будь-яких процесах, що відбуваються в системі.
- Імпульс тіла p – векторна величина, яка дорівнює добуткові маси тіла на швидкість його руху

$$p = mv.$$

Напрямок вектора p завжди збігається з напрямом вектора v .

Одиниця імпульсу – кілограм-метр на секунду (кг · м/с).

- Другий закон Ньютона. Прискорення, якого набуває тіло в інерціальній системі відліку, пропорційне діючій на тіло силі і обернено пропорційне масі цього тіла:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \text{ або } \mathbf{F} = m\mathbf{a}.$$

Сила \mathbf{F} і прискорення \mathbf{a} напрямлені вздовж однієї прямої в один бік. Якщо на тіло діє кілька сил, то під силою слід розуміти рівнодійну всіх цих сил.

Одиниця сили – ньютон (Н).

- Основний закон динаміки $\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t}$ або $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{F} \cdot \Delta t$.
- Третій закон Ньютона. Сили, з якими дві матеріальні точки (тіла) діють одна на одну, однакові за модулем і напрямлені у протилежні боки вздовж прямої, що з'єднує ці точки:

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}.$$

Сила \mathbf{F}_{12} – сила, з якою друге тіло діє на перше; вона прикладена до першого тіла; \mathbf{F}_{21} – сила, з якою перше тіло діє на друге; вона прикладена до другого тіла. Ці сили прикладені до різних тіл, не зрівноважують одна одну і є силами однієї природи.

- Закон всесвітнього тяжіння. Дві будь-які матеріальні точки притягуються одна до одної з силою, пропорційною добуткові їх мас (m_1 і m_2) і обернено пропорційною квадрату відстані (r) між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Коефіцієнт пропорційності G – гравітаційна стала: $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$.

Гравітаційні сили – сили притягання – напрямлені вздовж прямої, яка з'єднує взаємодіючі матеріальні точки, є центральними силами.

- Сила тяжіння – сила, з якою тіло притягається Землею. Сила тяжіння дорівнює добуткові маси тіла m на прискорення вільного падіння g :

$$P = mg.$$

Сила тяжіння прикладена до тіла.

- Вага тіла – сила, з якою тіло внаслідок притягання до Землі діє на опору чи підвіс, що утримують його від вільного падіння. Вага тіла прикладена до опори чи підвісу.
- Сила тертя ковзання виникає при ковзанні одного тіла по поверхні іншого. Сила тертя ковзання пропорційна силі нормального тиску (N), яка пристискає тертьові поверхні одна до одної:

$$F_{\tau} = kN,$$

де k – коефіцієнт тертя ковзання, залежний від природи і стану стичних поверхонь і швидкості руху.

Сила тертя напрямлена вздовж дотичної до тертьових поверхонь у бік, протилежний руху даного тіла відносно іншого.

- Сили пружності виникають внаслідок взаємодії тіл, яка супроводжується деформацією.

Сила пружності пропорційна зсуву частинки і напрямлена до положення рівноваги:

$$\mathbf{F} = -k\Delta l,$$

де k – коефіцієнт пружності; Δl – подовження тіла внаслідок деформації.

Запитання для самоконтролю та повторення

- Що вивчає динаміка? 2. Яке тіло називають вільним? 3. Сформулюйте перший закон Ньютона. 4. Яку систему відліку називають інерціальною? 5. Чи може рухатися тіло за відсутності зовнішнього діяння? 6. Дайте означення сили. 7. У чому полягає принцип незалежності дії сил? 8. Що таке інертність? Яка фізична величина є мірою інертності тіла? 9. Що таке центр мас? Де він може знаходитися? 10. Чому дорівнює імпульс тіла? 11. Сформулюйте другий закон Ньютона. 12. Яку силу називають доцентровою? 13. Сформулюйте третій закон Ньютона. 14. Чому дорівнює відношення модулів прискорень взаємодіючих сил? 15. Яку роль відіграли праці М. Коперника в розвитку науки? 16. Сформулюйте закон всесвітнього тяжіння. 17. У чому полягає фізичний зміст гравітаційної сталої? 18. Дайте характеристику гравітаційної взаємодії. 19. Що таке гравітаційне поле? 20. Наведіть означення ваги тіла. 21. Який стан тіла називають невагомістю? 22. Які способи вимірювання маси тіла Вам відомі? 23. Куди напрямлена сила тертя ковзання і чому вона дорівнює? 24. Які види пружних деформацій Вам відомі? 25. Які сили називають силами пружності? 26. Сформулюйте закон Гука.

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Визначити положення центра мас системи Земля–Місяць відносно центра Землі. Маса Землі у 81 раз більша за масу Місяця. Відстань від центра Землі до центра Місяця дорівнює $60R_{\oplus}$. Радіус Землі

$$R_{\oplus} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}.$$

Дано: $M_{\oplus} = 81m_M$; $R = 60R_{\oplus}$; $R_{\oplus} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$.

Знайти: x_c .

Розв'язання. Виберемо систему координат так, щоб вісь X проходила через центри мас Землі та Місяця (рис. 2.24). Координата центра мас x_c системи Земля–Місяць визначається за формулою (2.5):

$$x_c = \frac{M_{\oplus}x_{\oplus} + m_Mx_M}{M_{\oplus} + m_M}.$$

Сумістимо початок координат з центром Землі, тоді $x_{\oplus} = 0$ і координата x_c відносно центра Землі дорівнює

$$x_c = \frac{m_Mx_M}{M_{\oplus} + m_M}.$$



Рис. 2.24

Враховуючи, що x_M – це відстань від центра Землі до центра Місяця, тобто $x_M = 60R_{\oplus}$, а маса Землі $M_{\oplus} = 81m_M$, маємо

$$x_c = \frac{60m_M \cdot R_{\oplus}}{81m_M + m_M} = \frac{60m_M \cdot R_{\oplus}}{82m_M}$$

або

$$x_M = \frac{30}{41} R_{\oplus}.$$

З отриманого виразу видно, що $x_M < R_{\oplus}$, тобто центр мас системи Земля–Місяць розташований всередині Земної кулі.

Обчислення:

$$x_M = \frac{60 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}}{82} = 4,68 \cdot 10^6 \text{ м} = 4680 \text{ км}.$$

Відповідь. Центр мас системи Земля–Місяць розташований на відстані 4680 км від центра Землі.

Задача 2. На потяг масою 20 т, що рухається зі швидкістю 54 км/год, починає діяти сила гальмування і він зупиняється через 100 с. Визначити: силу, яка діє на потяг; прискорення, з яким він рухався; шлях, пройдений потягом до зупинки.

Дано: $m = 20 \text{ т} = 2 \cdot 10^4 \text{ кг}$, $v_0 = 54 \text{ км/год} = 15 \text{ м/с}$, $t = 100 \text{ с}$.

Знайти: F_T , a , S .

Розв'язання. На потяг діють (рис. 2.25): 1) сила тяжіння mg ; 2) сила реакції опори N ; 3) сила тертя F_T .

Потяг рухається в горизонтальному напрямі. За додатний напрям осі X візьмемо напрям руху потягу. Рух потягу рівносповільнений, вектор прискорення і вектор швидкості напрямлені в протилежні боки.

У векторній формі другий закон Ньютона має вигляд $mg + F_T + N = ma$.

Проекція на осі X

$$-F_T = -ma \text{ або } F_T = ma.$$

Прискорення і шлях, пройдений потягом до зупинки, знайдемо з рівняння кінематики $v = v_0 - at$, звідки $a = \frac{v_0}{t}$, оскільки $v = 0$; $S = \frac{v_0^2}{2a}$.

Обчислення:

$$a = \frac{15 \text{ м/с}}{100 \text{ с}} = 0,15 \text{ м/с}^2;$$

$$S = \frac{15^2 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2 \cdot 0,15 \text{ м/с}^2} = 750 \text{ м};$$

$$F_T = 2 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot 0,15 \text{ м/с}^2 = 3 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

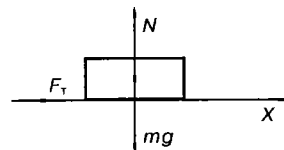


Рис. 2.25

Задача 3. Два вантажі масою 1 кг і 2 кг прикріплені до кінців невагомої нерозтяжної нитки, перекинутої через блок, який підвішено до стелі. Визначити прискорення, з яким рухатимуться вантажі. Вважати блок невагомим, тертям в осі блока знехтувати.

Дано: $m_1 = 1 \text{ кг}$; $m_2 = 2 \text{ кг}$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Знайти: a .

Розв'язання. За умовою задачі:

1) нитки нерозтяжні, отже $a_1 = a_2$;

2) блок невагомий, отже $T_1 = T_2 = T$.

На кожен з вантажів діють сили тяжіння m_1g , m_2g і сили натягу T_1 і T_2 відповідно (рис. 2.26). У векторній формі другий закон Ньютона має вигляд $m_1g + T_1 = m_1a_1$ – для першого вантажу, $m_2g + T_2 = m_2a_2$ – для другого вантажу.

Проекції на вісь X :

$$\begin{cases} -m_1g + T_1 = m_1a_1; \\ -m_2g + T_2 = -m_2a_2. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_1 = T_2 = T; \\ a_1 = a_2 = a. \end{cases} \quad (2)$$

Цю систему рівнянь слід доповнити двома рівняннями, оскільки система рівнянь (1) і (2) містить чотири невідомі:

$$\begin{cases} T_1 = T_2 = T; \\ a_1 = a_2 = a. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_1 = T_2 = T; \\ a_1 = a_2 = a. \end{cases} \quad (4)$$

Підставивши (3) і (4) в рівняння (1) і (2), дістанемо

$$\begin{cases} -m_1g + T = m_1a; \\ -m_2g + T = -m_2a. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} -m_1g + T = m_1a; \\ -m_2g + T = -m_2a. \end{cases} \quad (6)$$

Віднявши з рівняння (5) рівняння (6), дістанемо

$$-m_1g + T + m_2g - T = m_1a + m_2a,$$

звідки

$$g(m_2 - m_1) = a(m_1 + m_2),$$

або

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} g.$$

Обчислення:

$$a = \frac{2 \text{ кг} - 1 \text{ кг}}{1 \text{ кг} + 2 \text{ кг}} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 = 3,3 \text{ м/с}^2.$$

Розв'язуючи задачу, вважаємо, що блок не обертається, нитка ковзає без тертя по блоку.

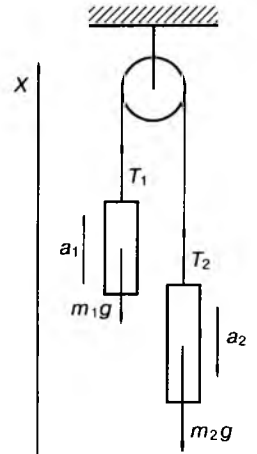


Рис. 2.26

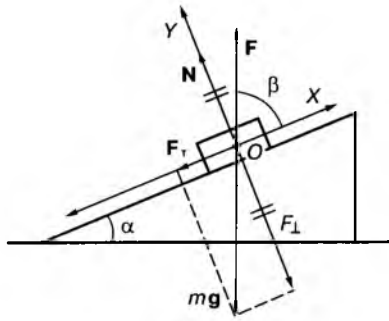


Рис. 2.27

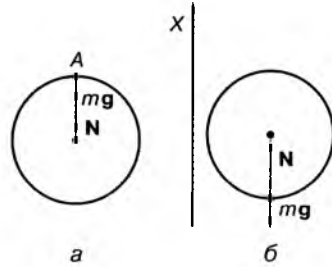


Рис. 2.28

Задача 4. Уверх по похилій площині з кутом нахилу 30° рухається вантаж масою 1 кг. На вантаж діє сила 10 Н, напрямлена під кутом 60° до похилої площини. Знайдіть прискорення, з яким рухається тіло, якщо коефіцієнт тертя ковзання дорівнює $0,05$.

Дано: $m = 1$ кг, $F = 10$ Н, $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\mu = 0,05$, $g = 9,8$ м/с².

Знайти: a .

Розв'язання. На тіло діють (рис. 2.27): 1) сила F , напрямлена під кутом 60° до похилої площини; 2) сила тертя F_t ; 3) сила реакції опори N .

Додатний напрям осі OX напрямлений вздовж площини вгору, додатний напрям осі OY – вгору перпендикулярно до осі OX .

У векторній формі другий закон Ньютона має вигляд

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}_t + \mathbf{N} + \mathbf{mg} = \mathbf{ma},$$

$$\begin{cases} F \cos \beta - F_t - mg \sin \alpha = ma & \text{(проекція на вісь } OX); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} N + F \sin \beta - mg \cos \alpha = 0 & \text{(проекція на вісь } OY). \end{cases} \quad (2)$$

Із рівняння (1) визначимо прискорення

$$a = \frac{F \cos \beta - F_t - mg \sin \alpha}{m}. \quad (3)$$

Щоб знайти прискорення, треба знати силу тертя: $F_t = \mu N$, де N – сила реакції опори.

Із рівняння (2) знаходимо $N = mg \cos \alpha - F \sin \beta$. Тоді сила тертя дорівнює $F_t = \mu(mg \cos \alpha - F \sin \beta)$. Підставивши F_t у рівняння (3), дістанемо

$$a = \frac{F \cos \beta - \mu(mg \cos \alpha - F \sin \beta) - mg \sin \alpha}{m}. \quad (4)$$

Обчислення:

$$a = \frac{10 \text{ Н} \cdot \cos 60^\circ - 0,05(1 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot \cos 30^\circ - 10 \text{ Н} \cdot \sin 60^\circ) - 1 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot \sin 30^\circ}{1 \text{ кг}} = 3,8 \text{ м/с}^2.$$

Задача 5. Літак описує “мертву петлю” у вертикальній площині. Визначити найменшу швидкість літака, при якій пілот у верхній точці петлі не

відривався би від крісла. Яке перевантаження відчуває пілот у нижній точці “петлі”, якщо літак рухається з тою самою швидкістю? Радіус петлі 200 м.

Дано: $R = 200$ м, $g = 10$ м/с², $m = 70$ кг.

Знайти: v_{\min} .

Розв'язання. На пілота діють такі сили (рис. 2.28):

1) сила тяжіння mg ; 2) сила реакції опори N .

Додатний напрям осі OX напрямлений до центра кола.

1. Пілот знаходиться в точці A . У векторній формі другий закон Ньютона

$$\mathbf{mg} + \mathbf{N} = \mathbf{ma}_{\text{дц}}.$$

У проекції на вісь X

$$mg + N = ma_{\text{дц}},$$

або

$$mg + N = \frac{mv^2}{R}, \quad (1)$$

де $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{R}$.

У момент відриву пілота від опори (крісла) $N = 0$, тому рівняння (1) для цього моменту часу має вигляд

$$mg = \frac{mv_{\min}^2}{R},$$

звідки

$$v = \sqrt{gR}.$$

Обчислення: $v = \sqrt{10 \text{ м/с}^2 \cdot 200 \text{ м}} \approx 44,7 \text{ м/с}$.

2. Пілот знаходиться в точці B .

Перевантаження – це відношення ваги пілота до його сили тяжіння:

$n = \frac{P}{mg}$. Вага пілота за модулем дорівнює силі реакції опори ($P = N$), але

за напрямом їй протилежна. Вага – це сила, з якою пілот діє на опору.

У векторній формі другий закон Ньютона $\mathbf{mg} + \mathbf{N} = \mathbf{ma}_{\text{дц}}$.

У проекції на вісь X (див. рис. 2.28)

$$-mg + N = \frac{mv^2}{R}.$$

Знаходимо $N = \frac{mv^2}{R} + mg$, отже,

$$P = \frac{mv^2}{R} + mg.$$

Визначаємо перевантаження:

$$n = \frac{P}{mg} = \frac{\frac{mv^2}{R} + mg}{mg} = \frac{v^2}{Rg} + 1.$$

Обчислення:

$$n = \frac{(44,7 \text{ м/с})^2}{200 \text{ м} \cdot 10 \text{ м/с}^2} + 1 = 1,1.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. При різкому вириванні моркви з землі гичка рветься, а при повільному – ні. Чому?
2. Чи може швидкість тіла змінюватися миттєво?
3. Визначити положення центра мас системи, яка складається з двох куль, маси котрих дорівнюють m і $4m$. Відстань між кулями дорівнює 20 см.
4. Чотири кулі, маси яких 0,1 кг, 0,2 кг, 0,3 кг і 0,4 кг, розташовані вздовж однієї прямої. Відстань між сусідніми кулями 0,15 м. Визначити положення центра мас цієї системи.
5. Чи з однаковим прискоренням рухатиметься тіло масою m у двох випадках, показаних на рис. 2.29. Нитка невагома, нерозтяжна.
6. Молекула масою $5,3 \cdot 10^{-26}$ кг, що летить до стінки посудини зі швидкістю 600 м/с, ударяється об стінку і пружно відскакує від неї. Визначити імпульс, отриманий стінкою.
7. Куля масою 0,15 кг, рухаючись зі швидкістю 10 м/с, пружно ударяється об гладку нерухому стінку. Визначити імпульс, отриманий стінкою, якщо швидкість кулі була напрямлена під кутом 60° до площини стінки.
8. Тіло масою 2 кг падає в повітрі з прискоренням 8 м/с^2 . Знайти силу опору повітря.
9. На нитці, прикріпленій до стелі ліфта, підвішено вантаж масою 0,5 кг. Визначити силу натягу нитки, якщо ліфт: 1) знаходиться в стані спокою; 2) підіймається з прискоренням 2 м/с^2 ; 3) опускається з прискоренням 2 м/с^2 .
10. Вантаж масою 25 кг рівноприскорено піднімають за допомогою мотузки вертикально вгору протягом 10 с на висоту 5 м. Визначити силу натягу мотузки.
11. Два тіла масою 0,1 кг і 0,3 кг з'єднані ниткою і перекинута через невагомий блок. Нехтуючи тертям у блоці, знайти: 1) прискорення, з яким рухаються тіла; 2) силу натягу нитки.

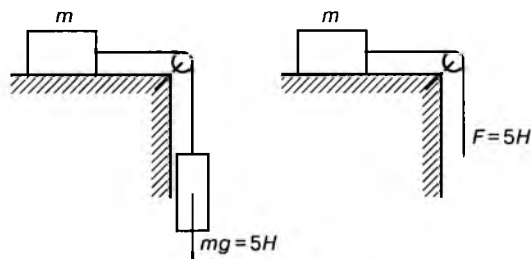


Рис. 2.29

12. На брусок масою 4 кг в горизонтальному напрямі діє сила 20 Н. Визначити прискорення, з яким рухається брусок, якщо коефіцієнт тертя бруска о поверхню 0,5.
13. Вантаж переміщається по горизонтальній поверхні під дією сили 294 Н, напрямленій під кутом 30° до горизонту, з прискоренням $5,9 \text{ м/с}^2$. Коефіцієнт тертя вантажу о площину 0,1. Визначити масу вантажу.
14. Два тіла масою 0,5 кг і 0,7 кг, зв'язані невагомою нерозтяжною ниткою, лежать на горизонтальній поверхні. На вантаж масою 0,5 кг діє горизонтально напрямлена сила 6 Н. Знайдіть прискорення, з яким рухаються вантажі, та силу натягу нитки.
15. Потяг масою 1000 т, гальмуючи, зупиняється за 20 с, пройшовши при цьому відстань 150 м. Знайти початкову швидкість потягу і силу гальмування, якщо він рухався рівносповільнено.
16. Тіло рівномірно рухається вниз по площині, яка нахилена до горизонту під кутом 30° . Знайти коефіцієнт тертя тіла о площину.
17. Невагомий блок закріплений на кінці стола (рис. 2.30). Тіла однакової маси по 0,5 кг з'єднані ниткою й перекинута через блок. Коефіцієнт тертя першого тіла об стіл дорівнює 0,2. Знайти: 1) прискорення, з яким пересуваються тіла; 2) силу натягу нитки.
18. Молот масою 200 кг падає з висоти 2 м на ковадло. Тривалість удару 0,01 с. Визначити середнє значення сили удару.
19. Автомобіль масою $5 \cdot 10^3$ кг рухається зі швидкістю 36 км/год по опуклому мосту. З якою силою він тисне на міст у його верхній частині, якщо радіус кривини моста 50 м?
20. Відро з водою обертається у вертикальній площині на мотузці завдовжки 60 см. З якою найменшою швидкістю треба обертати відро з водою, щоб вода з нього не виливалась?
21. Визначте радіус петлі Нестерова, якщо, виконуючи її, пілот тисне на сидіння крісла літака у нижній точці з силою 7,1 кН. Маса пілота 80 кг, швидкість літака 140 м/с.
22. Якого перевантаження зазнає космонавт, що обертається в горизонтальній площині на центрифугі радіусом 6 м з кутовою швидкістю $4,05 \text{ рад/с}$? Чому дорівнює максимальне перевантаження, якщо ця центрифуга обертається у вертикальній площині з тою ж самою швидкістю?
23. Визначте силу притягання між Сонцем і Землею. Відп.: $3,6 \cdot 10^{22} \text{ Н}$.
24. На якій відстані від центра Землі розташоване тіло, котре буде притягуватися Землею і Місяцем з однаковою силою? Радіус Землі $6,4 \cdot 10^6$ м, середня віддаль між центрами Землі і Місяця $3,84 \cdot 10^8$ м.
25. Визначте прискорення вільного падіння на висоті 100 км від поверхні Землі.
26. На якій середній висоті над поверхнею Землі обертається по коловій орбіті штучний супутник, якщо він рухається зі швидкістю $8 \cdot 10^3 \text{ м/с}$?
27. Визначте масу Сонця, якщо період обертання Марса навколо Сонця 687 діб, а середня відстань між їх центрами 228 млн км.

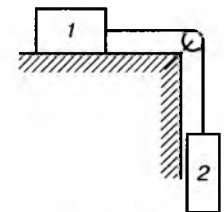


Рис. 2.30

ГЛАВА 3 ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ У МЕХАНІЦІ

§ 23. Закон збереження імпульсу

Зміна імпульсу системи тіл

Розглянемо систему, яка складається з двох тіл, наприклад двох зорь.

Сили взаємодії між тілами, що входять до системи (між зорями), називаються внутрішніми силами. Внутрішні сили позначатимемо символом F_{ik} . Тут перший індекс i означає номер тіла, на яке діє сила F_{ik} , а другий індекс k – номер тіла, з боку якого діє сила F_{ik} .

За третім законом Ньютона

$$F_{ik} = -F_{ki}. \quad (3.1)$$

Сили діяння на тіла даної системи (дві зорі) з боку тіл, які не входять до цієї системи (наприклад, сусідні космічні тіла), називаються зовнішніми силами.

Рівнодійну всіх зовнішніх сил, які діють на i -те тіло системи, позначатимемо F_i .

Для будь-якого тіла, що входить до системи, запишемо другий закон Ньютона [див. формулу (2.17)]:

$$\frac{\Delta(m_1 v_1)}{\Delta t} = F_{12} + F_1; \quad \frac{\Delta(m_2 v_2)}{\Delta t} = F_{21} + F_2. \quad (3.2)$$

Додавши ліві та праві частини цих рівнянь, дістанемо

$$\frac{\Delta(m_1 v_1)}{\Delta t} + \frac{\Delta(m_2 v_2)}{\Delta t} = F_{12} + F_1 + F_{21} + F_2.$$

Враховуючи, що $F_{12} = -F_{21}$, маємо

$$\frac{\Delta(m_1 v_1 + m_2 v_2)}{\Delta t} = F_1 + F_2 \quad \text{або} \quad \frac{\Delta p}{\Delta t} = F_1 + F_2, \quad (3.3)$$

де $p = m_1 v_1 + m_2 v_2$ – сумарний імпульс системи тіл.

Зі співвідношення (3.3) випливає, що зміна сумарного імпульсу системи тіл визначається сумою зовнішніх сил, які діють на цю систему.

Внутрішні сили, змінюючи імпульси окремих тіл системи (3.2), не змінюють сумарний імпульс системи (3.3).

Закон збереження імпульсу

Замкнена система – це система тіл, на кожне з яких не діють зовнішні сили.

Якщо система тіл замкнена, то сума всіх зовнішніх сил, які діють на систему, дорівнюють нулю. Оскільки зовнішні сили не діють ні на жодне тіло системи, то в рівнянні (3.3)

$$F_1 + F_0 = 0.$$

Тоді $\frac{\Delta p}{\Delta t} = 0$, або $\Delta p = 0$, $\Delta t \neq 0$, отже,

$$p = \text{const} \quad \text{або} \quad m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0. \quad (3.4)$$

В інерціальній системі відліку сумарний імпульс замкненої системи тіл у часі не змінюється:

$$\sum_{i=1}^n p_i = \text{const}. \quad (3.5)$$

Імпульс системи дорівнює добуткові маси m системи на швидкість її центра мас v_c :

$$p = m v_c. \quad (3.6)$$

Для замкненої системи тіл $p = m v_c = \text{const}$; оскільки $m = \text{const}$, то $v_c = \text{const}$.

В інерціальній системі відліку центр мас замкненої системи тіл рухається прямолінійно і рівномірно.

Векторному рівнянню (3.4) відповідають три рівняння для проєкцій на осі прямокутної (декартової) системи координат:

$$m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = \text{const}; \quad m_1 v_{1y} + m_2 v_{2y} = \text{const}; \quad m_1 v_{1z} + m_2 v_{2z} = \text{const}.$$

Незалежно від розміру інтервалу часу Δt імпульс системи тіл на початку і в кінці цього інтервалу часу буде тим самим.

Отже, для замкненої системи тіл виконується закон збереження імпульсу.

Усі реальні системи не є замкненими, тому що на тіла системи діють як сили тяжіння, так і різні сили опору, наприклад тертя. У багатьох випадках силами тертя можна нехтувати через їх малість.

В окремих випадках закон збереження імпульсу можна застосовувати й для незамкнених систем тіл, якщо зовнішні сили, які діють на будь-яке тіло системи, зрівноважуються, тобто сума всіх зовнішніх сил дорівнює нулю.

• При співударянні двох тіл, наприклад більярдних куль, можна застосовувати закон збереження імпульсу, оскільки сили тяжіння $m_1 g$ і $m_2 g$ та сили реакції N_1 і N_2 зрівноважуються (рис. 3.1). Силою тертя кочення можна нехтувати.

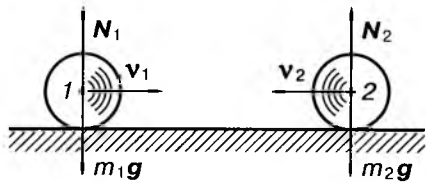


Рис. 3.1

- Проекція суми всіх зовнішніх сил на яку-небудь координатну вісь дорівнює нулю. В цьому разі має місце закон збереження проекції імпульсу незамкненої системи на дану координатну вісь.

Нехай гармата знаходиться на платформі. Маса системи гармата–снаряд дорівнює M . Після пострілу з гармати снаряд масою m летить із швидкістю v_2 , напрямленою під кутом α до горизонту, гармата відкочується зі швидкістю v_1 . Модуль швидкості $|v_1|$ можна визначити з закону збереження проекції імпульсу на координатну вісь X , оскільки проекція зовнішньої сили – сили тяжіння снаряда mg на вісь OX дорівнює нулю.

До пострілу швидкість v системи гармата–снаряд дорівнювала нулеві: $v = 0$, імпульс системи $Mv = 0$, тому $0 = (M - m)v_{1x} + mv_{2x}$. Враховуючи, що $v_{2x} = v_2 \cos \alpha$, маємо

$$v_{1x} = |v_1| = -\frac{mv_2 \cos \alpha}{M - m}.$$

Знак “мінус” означає, що при пострілі в додатному напрямі осі X швидкість гармати напрямлена в протилежний бік (рис. 3.2, б) – виникає “відбій”. Модуль швидкості $|v_1|$ залежить від маси гармати $(M - m)$: чим більша маса гармати, тим менше $|v_1|$. Щоб зменшити “відбій”, стрілець притискає рушницю, оскільки маса системи рушниця–куля близько 6 кг, а системи стрілець–рушниця–куля понад 60 кг.

- Відбуваються швидкі взаємодії типу вибухів або ударів. Зміни імпульсів окремих тіл системи мають місце під дією внутрішніх сил; зовнішні сили – сили тяжіння, тертя не встигають змінити імпульс системи.

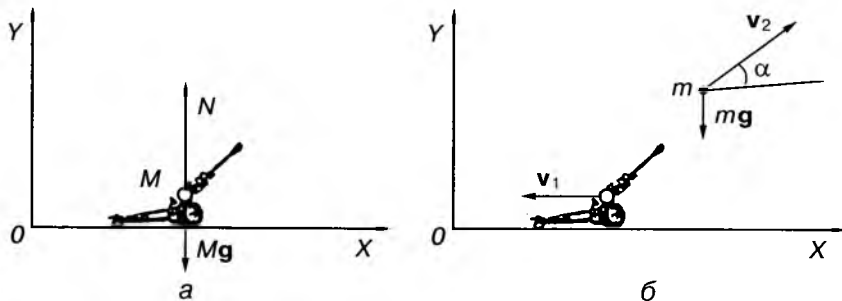


Рис. 3.2

Наприклад, під час вибуху снаряда його осколки розлітаються зі швидкістю від 500 до 1000 м/с. Вибух відбувається протягом малого проміжку часу Δt , майже миттєво. Зовнішньою силою, що діє на осколки, є сила тяжіння $F_1 = mg$. Визначимо час, протягом якого сила тяжіння змогла би змінити швидкість від 500 до 100 м/с.

За другим законом Ньютона

$$m\Delta v = mg\Delta t_1,$$

звідки

$$\Delta t_1 = \frac{m\Delta v}{mg} = \frac{\Delta v}{g}; \Delta t_1 = \frac{500 \text{ м/с}}{10 \text{ м/с}^2} = 50 \text{ с}, \Delta t_1 \gg \Delta t.$$

§ 24. Реактивний рух

Закон збереження імпульсу лежить в основі теорії реактивного руху.

Реактивний рух – це рух, який виникає при відділенні від тіла деякої його частини з певною швидкістю відносно тіла.

Прикладом реактивного руху є рух ракети. Під час запуску ракети відбувається витікання продуктів згоряння палива з деякою швидкістю v_1 відносно ракети (рис. 3.3). Імпульс продуктів згоряння p_1 напрямлений “вниз”. Згідно з законом збереження імпульсу ракета матиме такий самий за модулем імпульс p_2 , але напрямлений у протилежний бік – “уверх”. У польоті маса ракети протягом часу зменшується. Динаміка тіл змінної маси була створена наприкінці XIX сторіччя російським професором І. В. Мещерським (1859–1935) і К. Е. Цюлковським (1857–1935).

Наведемо без доведення формулу Цюлковського для визначення максимальної швидкості v_{\max} , яку матиме ракета після витрачання всього палива:

$$v_{\max} = 2,3v_1 \lg \frac{M_0}{M_1} \text{ або } v_{\max} = v_1 \lg \frac{M_0}{M_1},$$

де v_1 – швидкість витікання газів; M_0 – маса ракети в момент старту (тобто з повним запасом палива); M_1 – маса ракети без палива.

Із цієї формули випливає, що збільшити v_{\max} можна, якщо:

- збільшити v_1 – швидкість витікання газів;



Рис. 3.3

- збільшити відношення $\frac{M_0}{M_1}$. Цей шлях підвищення швидкості раке-

ти був указаний К. Е. Ціолковським. Він запропонував застосовувати багатоступеневі ракети для польоту в космос.

Основоположник теорії міжпланетних сполучень К. Е. Ціолковський писав: “Людство не залишиться довечно на Землі, але в погоні за світлом і простором спочатку несміливо проникне за межі атмосфери, а потім завоює собі весь навколосонячний простір”. Мрія вченого здійснилась.

Початок космічної ери ознаменувався запуском першого штучного супутника Землі (4 жовтня 1957 р.), 2 січня 1959 р. стартувала космічна ракета, яка вивела на орбіту перший штучний супутник Сонця, а 14 вересня 1959 р. ракета досягла поверхні Місяця і доставила туди герб Радянського Союзу.

Наступним етапом розвитку космонавтики став політ людини в космос. Піонером освоєння космосу був Ю. О. Гагарін. Космічний корабель “Восток-1”, пілотований Ю. О. Гагаріном, 12 квітня 1961 р. піднявся в космос і, здійснивши політ навколо Земної кулі, повернувся на Землю. Через 8 років (20 липня 1969 р.) два американських астронавти Н. Армстронг і Е. Олдрин з екіпажу космічного корабля “Аполлон-11” здійснили посадку на Місяць.

Великий внесок у розвиток космонавтики зробив учений, конструктор космічних кораблів “Восток” і “Восход”, С. П. Корольов (1906–1966), з ім’ям якого пов’язаний початок космічної ери – перший штучний супутник Землі, перший політ людини в космос.

§ 25. Робота сили

Елементарна робота сили

Елементарною роботою ΔA сили \mathbf{F} на елементарному переміщенні $\Delta \mathbf{r}$ називають фізичну величину, яка дорівнює скалярному добутку вектора сили \mathbf{F} на вектор переміщення $\Delta \mathbf{r}$:

$$\Delta A = (\mathbf{F}\Delta \mathbf{r}). \quad (3.7)$$

Згідно з означенням скалярного добутку векторів

$$\Delta A = F\Delta r \cos \alpha,$$

де α – кут між векторами \mathbf{F} і $\Delta \mathbf{r}$ (рис. 3.4); F і Δr – відповідно модуль сили і модуль переміщення.

Робота сили \mathbf{F} на переміщенні $\Delta \mathbf{r}$ дорівнює добуткові модулів цих векторів на косинус кута між ними.

Одиниця роботи – джоуль (Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2.$$

1 Дж – робота, здійснювана силою 1 Н на переміщенні 1 м, якщо напрямки сили і переміщення збігаються.

Якщо на матеріальну точку або тіло діють одночасно кілька сил, то елементарна робота всіх цих сил при переміщенні точки (тіла) на $\Delta \mathbf{r}$ дорівнює

$$\Delta A = F_{\text{рез}} \Delta r \cos \alpha,$$

де $F_{\text{рез}}$ – модуль результуючої (рівнодійної) всіх сил, що діють на матеріальну точку; α – кут між вектором результуючої сили \mathbf{F} і $\Delta \mathbf{r}$.

Залежно від взаємної орієнтації векторів \mathbf{F} і $\Delta \mathbf{r}$, тобто кута між ними, робота може бути:

- позитивною, $\Delta A > 0$, якщо $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, оскільки косинуси гострих кутів ($\cos \alpha$) додатні;
- негативною, $\Delta A < 0$, якщо $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$, оскільки косинуси тупих кутів ($\cos \alpha$) від’ємні;
- рівною нулеві, $\Delta A = 0$, якщо $\alpha = \frac{\pi}{2}$, оскільки $\cos \frac{\pi}{2} = 0$.

Сила, що перпендикулярна до переміщення, роботу не здійснює. Наприклад, не здійснює роботу сила тяжіння під час руху тіла по горизонтальній площині.

Внаслідок того, що поняття спокій і рух – відносні, тобто тіло, що покоїться в одній системі відліку, переміщатиметься в іншій, що рухається відносно першої, – **значення елементарної роботи залежить від вибору системи відліку.**

Робота сили на скінченному переміщенні

У загальному випадку обчислення роботи A сили на скінченному переміщенні є дуже складним.

Розглянемо кілька окремих випадків.

- Сила є сталою ($F = \text{const}$), а траєкторія тіла – прямолінійною ($\alpha = \text{const}$) (рис. 3.5).

Відповідно до формули (3.8) робота сили F у разі переміщення тіла з точки A в точку B дорівнює

$$A = F \cos \alpha \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{r}_i = F \cos \alpha r_{AB} = FS_{AB} \cos \alpha.$$

Якщо рух прямолінійний, то модуль вектора переміщення дорівнює шляху: $|\mathbf{r}_{AB}| = S$.

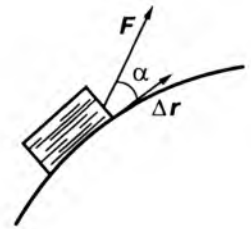


Рис. 3.4

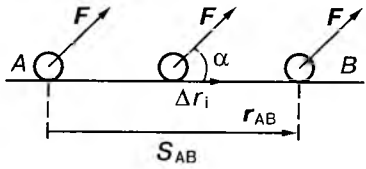


Рис. 3.5

• Сила є сталою ($F = \text{const}$), а траєкторія тіла криволінійна ($\alpha_i \neq \text{const}$) (рис. 3.6).

Робота сили F при переміщенні тіла з точки A в точку B

$$A = F_r r_{AB},$$

де F_r – проекція вектора сили на напрям вектора переміщення:

$$F_r = F \cos \alpha,$$

де α – кут між векторами F і r_{AB} .

Тоді маємо

$$A = F_r r_{AB} \cos \alpha. \quad (3.8)$$

Якщо траєкторія замкнена, тобто $r_{AB} = 0$, то **сумарна робота сили F дорівнює нулеві**.

• Сила є сталою за модулем: $|\mathbf{F}| = F = \text{const}$ і утворює однакові кути ($\alpha = \text{const}$) з елементарними векторами переміщення Δr_i в будь-якому місці криволінійної траєкторії (рис. 3.7):

$$|\mathbf{F}_i| = |\mathbf{F}_r| = |\mathbf{F}_m| = |\mathbf{F}| = F = \text{const}.$$

За формулою (3.8) робота сили F при переміщенні тіла з точки A в точку B дорівнює

$$A = F \cos \alpha \sum_{i=1}^n \Delta r_i = F \cos \alpha S_{12}.$$

У даному випадку

$$\sum_{i=1}^n \Delta r_i = S,$$

де S – шлях тіла від початкового до кінцевого положення B . Якщо траєкторія тіла замкнена, то робота сили відмінна від нуля.

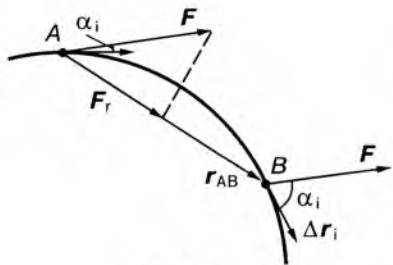


Рис. 3.6

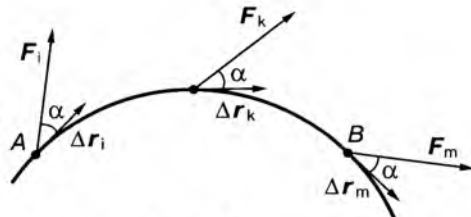


Рис. 3.7

§ 26. Робота потенціальних сил

Потенціальні сили

Потенціальні сили – це сили, робота яких залежить тільки від початкового і кінцевого положень рухомого тіла. Отже, робота потенціальних сил не залежить від форми траєкторії руху.

Робота потенціальної сили по замкненій траєкторії завжди дорівнює нулеві.

До потенціальних сил належать сили пружності та сили тяжіння. Сила пружності та сила тяжіння є змінними силами, тобто такими, що залежать від Δr .

Непотенціальні сили – це сили, робота яких залежить від форми траєкторії (наприклад, сили тертя).

Якщо графік залежності $F_r = f(\Delta r)$ є відомим, то за ним можна знайти роботу сили. Так, за рис. 3.8 робота сили на переміщенні $1-2$ дорівнює площі фігури $1-a-b-2$.

Елементарній роботі ΔA відповідає площа криволінійної трапеції з основою Δr_i (рис. 3.8, б).

Робота пружної сили

Робота пружної сили $F = k\Delta l$ обчислюється двома способами.

Спосіб 1. Графік залежності пружної сили від подовження Δl зображений на рис. 3.9.

Робота сили пружності при одномірному розтягу (або стиску), який характеризується вектором подовження Δl , дорівнює площі прямокутного трикутника (на рис. 3.9, а він заштрихований), катетами якого є $|\mathbf{F}_{\Delta l}|$ і $|\Delta l|$:

$$A_{\text{пр}} = \frac{F_{\Delta l} \Delta l}{2} = \frac{k \Delta l^2}{2}.$$

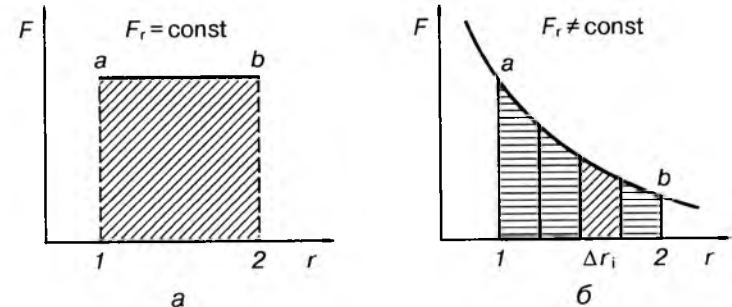


Рис. 3.8

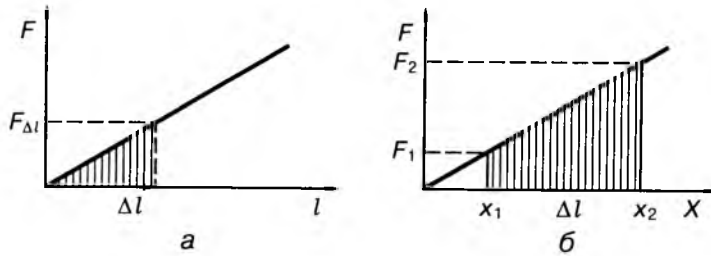


Рис. 3.9

Нехай вісь X збігається за напрямом з вектором Δl ; x_1 і x_2 – координати початку і кінця вектора Δl . Робота сили пружності в цьому разі (див. рис. 3.9, б)

$$A_{\text{пр}} = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}. \quad (3.9)$$

Якщо $x_1 = x_2$, тобто $\Delta l = 0$ – траєкторія замкнена, то згідно з формулою (3.9) у разі переміщення точки пружнодеформівного тіла замкненою траєкторією робота сили пружності дорівнює нулеві.

Спосіб 2. На початку процесу одномірного розтягу (або стиску) $F_0 = 0$, оскільки $\Delta l = 0$; при подовженні Δl сила пружності $F_{\Delta l} = k\Delta l$.

Її середнє значення знаходимо як середнє арифметичне, тому що залежність F від Δl є прямо пропорційною:

$$F_{\text{сеп}} = \frac{0 + k\Delta l}{2} = \frac{k\Delta l}{2}.$$

Робота сили пружності згідно з (3.8) дорівнюватиме

$$A_{\text{пр}} = F_{\text{сеп}}\Delta l = \frac{k\Delta l^2}{2}. \quad (3.10)$$

Робота гравітаційних сил

Визначимо роботу гравітаційних сил або сил тяжіння $F = G\frac{Mm}{r^2}$ у разі переміщення матеріальної точки масою m із положення 1 у положення 2 відносно іншої матеріальної точки M , яка розміщена на початку відліку. При переміщенні тіла m сила змінюється обернено пропорційно r^2 . Роботу на ділянці 1–2 (A_{12}) визначимо як суму робіт на окремих ділянках (рис. 3.10):

$$A_{12} = A_{1a} + A_{ab} + A_{bc} + \dots + A_{i2}.$$

Робота на ділянці (1–a) $A_{1a} = F_{1a} \times (r_a - r_1)$, де F_{1a} – середня геометрична сила (оскільки F обернено пропорційна r^2), яка дорівнює кореню квадратному з добутку сил у крайніх точках:

$$F_{1a} = \sqrt{F_1 F_a} = \sqrt{G\frac{Mm}{r_1^2} G\frac{Mm}{r_a^2}} = G\frac{Mm}{r_1 r_a}.$$

Робота на цій ділянці

$$A_{1a} = G\frac{Mm}{r_1 r_a} (r_a - r_1) = GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_a} \right).$$

Відповідно робота на ділянках (a–b), (b–c), (i–2) дорівнює

$$A_{ab} = GMm \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right); \quad A_{bc} = GMm \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_c} \right); \dots; \quad A_{i2} = GMm \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Додавши отримані значення роботи на окремих ділянках, дістанемо

$$\begin{aligned} A_{12} &= GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_a} \right) + GMm \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) + \dots + GMm \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2} \right) = \\ &= GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} + \dots + \frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2} \right) = GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \end{aligned}$$

Усі проміжні члени в дужках взаємно знищуються, тому маємо

$$A = GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (3.11)$$

де r_1 і r_2 – модулі радіусів-векторів, які характеризують початкове та кінцеве положення рухомого тіла.

Із формули (3.11) випливає:

- робота залежить тільки від початкового і кінцевого положення рухомого тіла, тобто не залежить від форми траєкторії;
- у разі переміщення однієї з взаємодіючих матеріальних точок замкненою траєкторією ($r_2 = r_1$) робота сил тяжіння дорівнює нулеві.

Формулу (3.11) можна переписати у вигляді

$$A = GMm \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}.$$

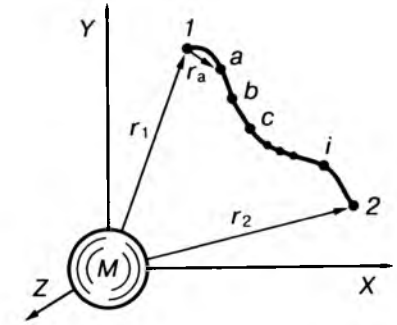


Рис. 3.10

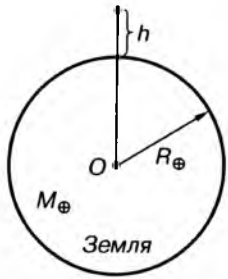


Рис. 3.11

Нехай тіло m підняте на висоту h над поверхнею Землі (рис. 3.11).

Тоді робота при підйманні тіла масою m на висоту h з урахуванням того, що $r_1 = R_{\oplus}$, $r_2 = R_{\oplus} + h$, дорівнюватиме

$$A = GM_{\oplus}m \frac{h}{R_{\oplus}(R_{\oplus} + h)}, \quad (3.12)$$

де M_{\oplus} , R_{\oplus} – відповідно маса і радіус Землі.

За умови $h \ll R_{\oplus}$ та з урахуванням того, що модуль прискорення вільного падіння поблизу поверхні Землі $g = \frac{GM}{R_{\oplus}^2}$, дістанемо

$$A = mgh. \quad (3.13)$$

§ 27. Потужність

Конструюючи та експлуатуючи машини, слід брати до уваги не лише роботу, виконувану машиною, але й швидкість виконання роботи. Величина, яка характеризує швидкість виконання роботи, називається потужністю.

Середня потужність чисельно дорівнює відношенню роботи A до проміжку часу Δt , за який вона здійснюється:

$$N_{\text{сеп}} = \frac{A}{\Delta t}. \quad (3.14)$$

Одиниця потужності – ват (Вт); $1 \text{ Вт} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3$.

Ват дорівнює потужності, при якій робота 1 Дж здійснюється за час 1 с.

Підставивши у формулу (3.14) вираз роботи A , дістанемо

$$N_{\text{сеп}} = \frac{F \Delta s \cos \alpha}{\Delta t} = F \frac{\Delta s}{\Delta t} \cos \alpha = F v_{\text{сеп}} \cos \alpha, \quad (3.15)$$

де $v_{\text{сеп}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$.

Якщо машина працює нерівномірно, тобто її потужність змінюється в часі, то формула (3.14) визначатиме середню потужність, а границя цього відношення при $\Delta t \rightarrow 0$ виражає миттєву потужність (потужність у даний момент):

$$N = F \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \cos \alpha = F v \cos \alpha,$$

де $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = v$.

Потужність дорівнює добутковій модуля вектора сили на модуль вектора швидкості та на косинус кута між напрямками цих векторів або скалярному добуткові вектора сили на вектор швидкості:

$$N = (\mathbf{Fv}). \quad (3.16)$$

Потужність, як і робота, – величина скалярна.

Потужність різних двигунів, у тому числі й автомобільних, до цього часу вимірюється в кінських силах: $1 \text{ к.с.} = 735 \text{ Вт}$.

Потужність людини становить приблизно 70 Вт.

§ 28. Енергія

У природі все знаходиться у взаємному зв'язку та взаємній залежності. Пізнаючи та вивчаючи послідовність і взаємозв'язок явищ, природознавці відкривають закони природи.

Ще Арістотель у трактаті “Фізика” писав: “Оскільки природа є початок руху та зміни, а предметом нашого дослідження є природа, то не можна лишати нез'ясованим, що таке рух: але ж незнання руху необхідно спричиняє незнання природи”. Пізніше було встановлено, що крім механічного руху існують й інші види руху; наприклад, теплові та різні види руху можуть перетворюватися один на інший. Рух зберігається, змінюється тільки форма руху. З перетворенням різних видів руху один на інший зв'язано поняття енергії* – основне поняття фізики.

Термін “енергія” сучасного змісту виник на початку XIX ст. Англійський фізик Г. Юнг (1773–1829) перший визначив енергію як **працездатність рухомих мас** (1807 р.).

У середині XIX ст. були опубліковані праці Р. Майєра (1814–1878), Д. Джоуля (1818–1889) і Г. Гельмгольца (1821–1894), в яких викладався закон збереження і перетворення енергії. Поняття енергії поширилося, крім механічного, на інші види руху.

Можна провести аналогію між перетворенням енергії та обміном валюти: інші банкноти, інша назва, але основне – купівельна спроможність – лишається. Так само і енергія, зазнаючи перетворення, лишається енергією і **характеризує здатність тіла або системи тіл виконувати роботу**.

Взаємодіючі тіла, наприклад у гравітаційному полі, здатні виконувати роботу, отже, вони “володіють” енергією.

Таким чином, поняття руху і взаємодії матеріальних об'єктів та поняття енергії пов'язані між собою.

Енергія E – це скалярна фізична величина, яка є єдиною мірою різних форм руху та взаємодії матерії.

* Енергія (від грец. *enérgeia*) – діяння, діяльність.

Відповідно до різних форм руху матерії говорять про різні види енергії – механічну, внутрішню, ядерну тощо. У процесі взаємодії тіл форма руху матерії може змінюватись; наприклад, при терті тіла нагріваються, змінюючи вид енергії; механічна енергія переходить у внутрішню.

Зміна виду енергії зумовлена дією на тіло сил і пов'язана з виконанням роботи.

Одиниця енергії, як і одиниця роботи, – джоуль (Дж).

Виконуючи механічну роботу, тіло або система тіл переходять з одного стану в інший. Стан механічної системи визначається радіусами-векторами або координатами тіл та їхніми швидкостями.

У разі зміни стану тіла або системи тіл їхня енергія змінюється.

Робота A , виконана тілом або системою тіл при цьому, є мірою змінення їхньої енергії ΔE :

$$A = \Delta E \text{ або } A = E_2 - E_1. \quad (3.17)$$

Запас енергії тіла (системи тіл) визначається найбільшою роботою, котру може виконати тіло (система тіл).

Виконання роботи силами пов'язане зі змінням енергії:

- якщо система тіл виконує роботу над зовнішніми тілами, то енергія системи тіл зменшується. Наприклад, механічний (пружинний) годинник "йде" (працює) протягом певного проміжку часу, оскільки енергія пружини витрачається на виконання роботи з подолання сил тертя коліщаток, стрілок, механізму годинника;

- якщо зовнішні сили (зовнішні тіла) виконують роботу над системою тіл, то енергія системи тіл збільшується. Щоб механічний годинник працював, його треба завести, тобто зовнішні сили мають виконувати роботу з деформації пружини годинника.

Механічна енергія E – це фізична величина, яка є функцією швидкостей і взаємного розташування тіл.

§ 29. Кінетична енергія

Означення кінетичної енергії

Кінетична енергія E_k матеріальної точки або тіла є мірою механічного руху і залежить від швидкості руху в даній інерціальній системі відліку.

У процесі руху тіла переходять з одного стану в інший, отже, змінюється їх енергія. Зміна енергії дорівнює роботі зовнішніх сил.

Обчислимо роботу сталої сили $F = \text{const}$, яка діє на тіло масою m . Тіло рухається поступально прямолінійно вздовж осі X ; вектори сили і швидкості тіла співнапрямлені.

При переміщенні тіла на Δx сила \mathbf{F} виконує роботу

$$\Delta A = F \cdot \Delta x. \quad (3.18)$$

При цьому за час Δt швидкість руху тіла змінюється від v_1 до v_2 . Під дією сталої сили $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ тіло рухається рівноприскорено ($\mathbf{a} = \text{const}$):

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}; F = \frac{m(v_2 - v_1)}{\Delta t}.$$

За час Δt тіло проходить шлях

$$\Delta x = v_1 \Delta t + \frac{a(\Delta t)^2}{2} = v_1 \Delta t + \frac{(v_2 - v_1)(\Delta t)^2}{\Delta t \cdot 2} = \frac{(v_2 + v_1)\Delta t}{2}.$$

Отже, під дією сили $F = \frac{m(v_2 - v_1)}{\Delta t}$ тіло переміщується за проміжок часу Δt на $\Delta x = \frac{(v_2 + v_1)\Delta t}{2}$.

Робота сили F за формулою (3.18) дорівнює

$$\Delta A = \frac{m(v_2 - v_1)}{\Delta t} \cdot \frac{(v_2 + v_1)\Delta t}{2} = \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2}$$

або

$$\Delta A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (3.19)$$

Із порівняння формул (3.17) і (3.19) робимо висновок, що

$$E_{k2} = \frac{mv_2^2}{2}; E_{k1} = \frac{mv_1^2}{2}.$$

Кінетична енергія при поступальному русі тіла дорівнює половині добутку маси тіла (m) на квадрат його швидкості*:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (3.20)$$

Часто у розв'язанні задач зручніше користуватися виразом кінетичної енергії тіла через його імпульс $p = mv$. Помноживши і розділивши на m ($m \neq 0$) праву частину формули (3.20), дістанемо

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m^2 v^2}{2m} = \frac{p^2}{2m}. \quad (3.21)$$

* Формула $E_k = \frac{mv^2}{2}$ запропонована французьким ученим Коріолісом у 1809 р.

* Кінетика (від грец. kinētikós) – той, що приводить у рух.

Кінетична енергія тіла дорівнює квадрату імпульсу тіла, розділеному на подвоєну масу тіла.

Кінетична енергія системи тіл дорівнює алгебричній сумі кінетичних енергій усіх тіл, з яких складається система:

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2}.$$

Значення кінетичної енергії тіла залежать від вибору системи відліку, але вони не можуть бути від'ємними, тобто $E_k \geq 0$.

Теорема про кінетичну енергію

На тіло можуть діяти різні сили – тяжіння, пружності, тертя або одночасно кілька сил.

Робота будь-якої сили або результуючої сил, діючих на тіло, є мірою змінення кінетичної енергії тіла. Раніше отриману формулу (3.19) можна записати так:

$$\Delta A = E_{k2} - E_{k1}, \quad (3.22)$$

де E_{k2} – кінетична енергія тіла в кінцевому положенні; E_{k1} – кінетична енергія тіла в початковому положенні.

Зміна кінетичної енергії тіла ΔE_k при переході з одного положення в інше дорівнює роботі всіх сил, що діють на тіло.

Дія на тіло сил, робота яких на даному переміщенні є додатною, спричинює збільшення кінетичної енергії тіла.

Дія на тіло сил, робота яких на даному переміщенні є від'ємною, спричинює зменшення кінетичної енергії тіла.

§ 30. Потенціальна енергія

Означення потенціальної енергії

Тіла, підняті на деяку висоту h над поверхнею Землі, падаючи, можуть виконати роботу. Наприклад, копер забиває палю в ґрунт. Отже, такі тіла володіють енергією. Ця енергія називається потенціальною.

Потенціальна енергія $E_{п}$ – це енергія, котра залежить від взаємного розташування тіл або частин того самого тіла.

Тіла, що падають на Землю, виконують роботу, оскільки тіло взаємодіє з Землею. Пружно деформована пружина здатна виконати роботу, тому що відбувається взаємодія між її частинами.

Потенціальна енергія – це енергія взаємодії.

Поняття потенціальної енергії стосується системи взаємодіючих об'єктів. Коли говорять про потенціальну енергію одного тіла, завжди мають на увазі інші тіла, з якими дане тіло взаємодіє. Тому іноді її називають взаємною потенціальною енергією або енергією потенціальних взаємодій, наприклад гравітаційної взаємодії.

Мірою змінення потенціальної енергії в процесі переходу системи з одного стану в інший є робота потенціальних сил, які спрямовані на взаємодію між тілами системи або частинами того самого тіла. Робота потенціальних сил $A_{п}$ дорівнює спаданню* потенціальної енергії системи ($E_{1п} - E_{2п}$):

$$A_{п} = E_{1п} - E_{2п} = -\Delta E_{п}, \quad (3.23)$$

де $E_{1п}$ – потенціальна енергія системи в початковому стані; $E_{2п}$ – потенціальна енергія системи в кінцевому стані.

За формулою (3.23) роботу потенціальних сил – сил взаємодії – визначає різниця значень потенціальної енергії. Крім того, при розв'язанні фізичних задач є важливою саме ця різниця потенціальних енергій. Тому можна довільно, керуючись міркуваннями щодо спрощення розв'язання задачі, вибрати стан системи, в якому її потенціальна енергія вважається нульовою. Цьому станові відповідає нульовий рівень потенціальної енергії. Різниця значень потенціальної енергії не залежить від вибору нульового рівня. Залежно від вибору нульового рівня потенціальна енергія може бути додатною ($E_{п} > 0$), від'ємною ($E_{п} < 0$) або дорівнювати нулю ($E_{п} = 0$).

Потенціальна енергія визначається взаємним розташуванням (відстанню) тіл у системі або частин того самого тіла. Відстані між тілами не залежать від вибору системи відліку, тобто не змінюються під час переходу від однієї системи відліку до іншої, тому і **потенціальна енергія не залежить від вибору системи відліку.**

Потенціальна енергія гравітаційної взаємодії

Робота гравітаційної сили за формулою (3.11)

$$A = GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

* Спадання – це різниця між початковим $E_{1п}$ і кінцевим $E_{2п}$ значеннями ($E_{1п} - E_{2п}$). Приріст або зміна позначається знаком “дельта” (Δ).

Якщо за одне тіло взяти Землю ($M = M_{\oplus}$), а інше тіло масою m переміщати з точки 1 в точку 2, які знаходяться відповідно на відстані r_1 і r_2 від центра Землі (рис. 3.12), то робота гравітаційної сили з переміщення тіла масою m дорівнюватиме

$$A = \frac{GM_{\oplus}m}{r_1} - \frac{GM_{\oplus}m}{r_2}. \quad (3.24)$$

Роботу гравітаційної сили можна визначити як за формулою (3.23), так і за формулою (3.24). Із порівняння цих формул випливає, що

$$E_{1n} = \frac{GM_{\oplus}m}{r_1}; \quad E_{2n} = \frac{GM_{\oplus}m}{r_2}. \quad (3.25)$$

Прийнято потенціальну енергію взаємодії відносно нульового рівня відліку вважати додатною, якщо при взаємодії тіла відштовхуються, наприклад однойменно заряджені тіла.

Якщо при взаємодії тіла притягуються, наприклад різнойменно заряджені тіла або у разі гравітаційної взаємодії, їх потенціальна енергія від'ємна відносно нульового рівня відліку.

Потенціальна енергія гравітаційної взаємодії системи двох матеріальних точок з масами m і M , які знаходяться на відстані r одна від одної, дорівнює

$$E_n = \frac{GmM}{r}. \quad (3.26)$$

Доцільно за нульовий рівень відліку потенціальної енергії гравітаційної взаємодії Землі з матеріальними об'єктами масою m вибрати точку, яка знаходиться на такій віддалі від Землі, щоб сила притягання тіла до Землі прямувала до нуля:

$$F = G \frac{M_{\oplus}m}{r^2} \rightarrow 0, \text{ якщо } r \rightarrow \infty.$$

Початок відліку потенціальної енергії знаходиться на нескінченно великій відстані від центра Землі.

На поверхні Землі ($r = R_{\oplus}$) потенціальна енергія гравітаційної взаємодії мінімальна.

Графік залежності потенціальної енергії системи тіло–Земля від відстані між тілом і центром Землі наведений на рис. 3.13.

Якщо $r \rightarrow \infty$, то $E_n \rightarrow 0$.

$$\text{Якщо } r = R_{\oplus}, \text{ то } E_n = -\frac{GmM_{\oplus}}{R_{\oplus}}.$$

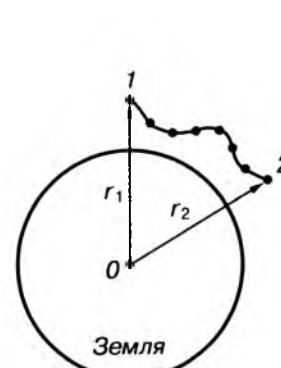


Рис. 3.12

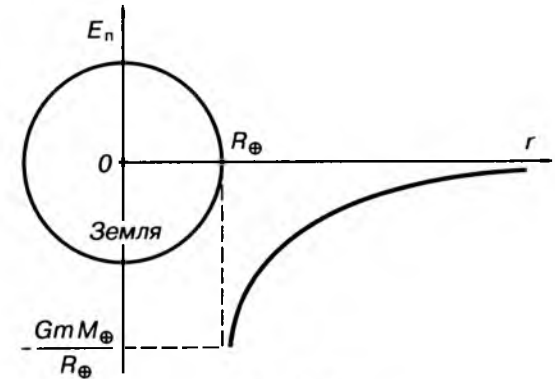


Рис. 3.13

Мінімальну потенціальну енергію має тіло, що знаходиться на поверхні Землі.

Робота сили тяжіння поблизу поверхні Землі ($h \ll R_{\oplus}$) визначається за формулою (3.13) і дорівнює $A = mgh$; отже, тіло, яке підійняте на висоту h відносно поверхні Землі, має потенціальну енергію

$$E_n = mgh. \quad (3.27)$$

Потенціальна енергія пружнодеформованого тіла

Деформація стиску або розтягу відбувається під дією зовнішніх сил. У пружнодеформованих тілах виникають сили пружності – потенціальні сили, які перешкоджають деформації тіла. Вони діють так, щоб повернути тіло в початковий – недеформований стан рівноваги. При цьому сили пружності виконують роботу [див. формулу (3.9)]

$$A_{\text{пр}} = \frac{k\Delta l^2}{2},$$

де k – жорсткість; $\Delta l = l - l_0$; l_0 , l – довжини відповідно недеформованого і деформованого тіла, наприклад пружини (рис. 3.14).

Відповідно до формули (3.23) потенціальна енергія пружних взаємодій дорівнює

$$E_n = \frac{k(\Delta l^2)}{2}. \quad (3.28)$$

Потенціальна енергія пружнодеформованого тіла дорівнює роботі сили пружності під час переходу з деформованого в недеформований стан.

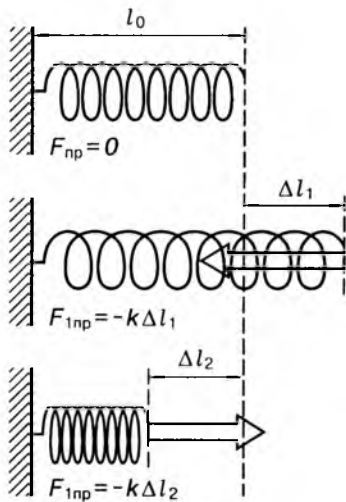


Рис. 3.14

Початок відліку потенціальної енергії ($E_n = 0$) відповідає такому стану системи, в якому сили пружної взаємодії дорівнюють нулю ($F_{np} = 0$, $l = l_0$, $\Delta l = 0$).

Графік залежності потенціальної енергії E_n деформованого тіла від подовження наведений на рис. 3.15 і являє собою параболу. Початок координат відповідає положенню рівноваги: $\Delta l = 0$; $E_n = 0$. Права гілка відображує змінення потенціальної енергії при розтягу, $\Delta l > 0$, оскільки $l > l_0$. Ліва гілка відображує змінення потенціальної енергії при стиску, $\Delta l < 0$, оскільки $l < l_0$.

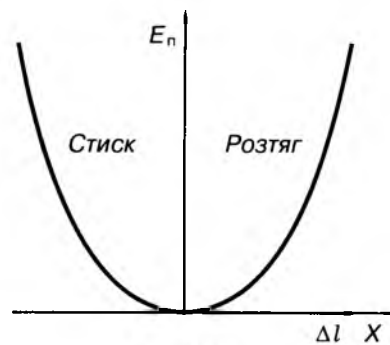


Рис. 3.15

§ 31. Закон збереження механічної енергії

Повна механічна енергія

Механічна енергія E є мірою механічного руху та взаємодії тіл і залежить від швидкостей і взаємного розташування тіл.

Повна механічна енергія системи тіл – це сума кінетичної і потенціальної енергії всіх тіл, які входять до системи:

$$E = E_k + E_n. \quad (3.29)$$

Залежно від сил, діючих на тіла, які входять до системи, системи тіл поділяють на консервативні та неконсервативні.

Система тіл є **консервативною**, якщо внутрішні та зовнішні сили, що діють на тіла системи, є потенціальними, наприклад гравітаційними або пружними силами.

Система тіл є **неконсервативною**, якщо поряд із потенціальними діють і непотенціальні сили, наприклад сили тертя.

Припустимо, система тіл є замкненою і консервативною. Застосуємо до цієї системи тіл теорему про кінетичну енергію [див. формулу (3.22)]

$$\Delta A = E_{k2} - E_{k1},$$

де ΔA – робота потенціальних сил; вона дорівнює спаданню потенціальної енергії [див. формулу (3.23)]

$$\Delta A = E_{n1} - E_{n2};$$

отже,

$$E_{n1} - E_{n2} = E_{k2} - E_{k1}, \text{ або } E_{n1} + E_{k1} = E_{n2} + E_{k2}.$$

Враховуючи, що $E_{n1} + E_{k1} = E_1$ – механічна енергія системи в початковому стані, а $E_{n2} + E_{k2} = E_2$ – механічна енергія системи в кінцевому стані, дістанемо

$$E_1 = E_2, \text{ або } E = \text{const}. \quad (3.30)$$

Формула (3.30) виражає закон збереження механічної енергії.

Повна механічна енергія замкненої консервативної системи не змінюється, тобто зберігається.

Закон збереження механічної енергії є слушним і для **незамкнених консервативних систем**, оскільки в теоремі про кінетичну енергію ΔA – це робота всіх сил, діючих на систему тіл.

Припустимо, система тіл є **неконсервативною**.

У такому разі роботу сил, діючих на систему, можна подати як суму робіт потенціальних ΔA_n і непотенціальних ΔA_{np} сил. Застосувавши теорему про кінетичну енергію, дістанемо

$$E_{k1} - E_{k2} = \Delta A_n + \Delta A_{np}.$$

Враховуючи, що $\Delta A_n = E_{n1} - E_{n2}$, вираз набере вигляду

$$E_{k2} - E_{k1} = E_{n1} - E_{n2} + \Delta A_{np}.$$

Перетворивши отриманий вираз, матимемо

$$(E_{k2} + E_{n2}) - (E_{k1} + E_{n1}) = \Delta A_{np}.$$

Врахувавши, що $E_{к2} + E_{п2} = E_2$, а $E_{к1} + E_{п1} = E_1$,
отримаємо

$$E_2 - E_1 = \Delta A_{\text{нп}}. \quad (3.31)$$

Зміна повної механічної енергії системи дорівнює роботі внутрішніх непотенціальних сил. Візьмемо, наприклад, замкнену систему, в якій поряд із потенціальними силами діють і сили тертя. Робота сил тертя в рухомій системі зменшує її кінетичну енергію, а отже, механічна енергія системи зменшується, переходячи в енергію інших немеханічних форм руху матерії.

Закон збереження енергії – це універсальний принцип природи.

§ 32. Закони збереження – фундаментальні закони природи

Закони збереження дають змогу розв'язувати ряд складних задач без розгляду діючих на тіло сил і без простежування руху системи тіл. До таких задач, наприклад, належать задачі про зіткнення тіл. Застосування законів збереження спрощує розв'язання багатьох механічних задач.

Закони збереження, відкриті в механіці, виходять далеко за її межі. В тих випадках, коли закони Ньютона незастосовні, наприклад для описання руху електронів у атомі, закони збереження механічних величин не втрачають свого значення. Механічні величини – маса, імпульс, енергія – є загальними в фізиці.

Закони збереження “працюють” у мікро-, макро- та мегасвіті, тобто застосовні до систем усіх матеріальних об'єктів незалежно від їх розмірів: елементарних частинок, макротіл (звичайних для нас розмірів) і до космічних тіл. Закони збереження відіграють центральну роль у фізиці.

Закони збереження дозволяють робити нові відкриття. В потужності законів збереження можна переконатися на прикладі передрікання на їх основі вражаючої елементарної частинки – нейтрино. За сучасними уявленнями нейтрино не мають маси спокою, нейтральні – їх електричний заряд дорівнює нулю, вони рухаються зі швидкістю світла і мають величезну проникну здатність. Земля для нейтрино просто прозора. Гіпотезу про існування нейтрино на підставі закону збереження енергії висловив у 1930 р. швейцарський фізик В. П. Паулі (1900–1958). Експериментальне відкриття нейтрино здійснилося через 26 років і було пов'язане з появою потужних джерел нейтрино-ядерних реакторів.

Закони збереження – фундаментальні закони природи – пов'язані з однорідністю часу, однорідністю та ізотропністю простору.

§ 33. Симетрія і закони збереження

Поняття симетрії

Красота – один із критеріїв, якими характеризуються багато речей, явищ, закономірностей.

Красота закону – одна з ознак його досконалості. Недарма фундаментальні співвідношення фізики такі лаконічні.

Що таке симетрія? Інтуїтивно це розуміють усі, якщо мати на увазі симетрію предметів. Німецький математик Герман Вейль дав таке означення: **предмет симетричний, якщо він не змінює свого зовнішнього вигляду після усяких просторових операцій.**

Французьким математиком А. Пуанкаре вперше було поставлене питання про симетрію законів фізики. Він шукав такі класи просторово-часових перетворень, які лишають рівняння фізики у незмінному або інваріантному вигляді. В 1918 р. була опублікована праця німецького математика Е. Нетер, в якій вона довела наявність зв'язку між симетрією та відповідним законом збереження.

Деякі типи фундаментальних симетрій у фізиці

Перенесення в просторі. Незалежність властивостей ізольованого фізичного об'єкта від його місцеположення у вільному просторі є проявом однорідності самого простору. Наприклад, властивості атома за інших рівних умов мають бути однакові в усіх куточках Всесвіту, як на Землі, так і на інших планетах. Симетрична операція перенесення в просторі супроводжується збереженням імпульсу замкненої системи.

Закон збереження імпульсу пов'язаний з однорідністю простору.

“Зсув” у часі. Ця операція означає, що час однорідний по відношенню до ізольованого фізичного об'єкта. Наприклад, проводячи дослідження, вчені вважають, що властивості атомів мільярди років тому були такі самі, як і зараз. Це твердження дає змогу описувати історію “народження” і розвитку Всесвіту. Симетрія “зсув” у часі – однорідність часу – веде до збереження енергії фізичної системи. Це є слушним не тільки для систем, які знаходяться у вільному просторі, але й для систем, які знаходяться в зовнішніх постійних (що не залежать від часу) полях.

Закон збереження енергії пов'язаний з однорідністю часу.

Перехід від однієї інерціальної системи відліку до іншої інерціальної системи відліку. В інерціальних системах відліку вільні об'єкти рухаються рівномірно і прямолінійно. Інерціальних систем відліку можна вибрати

* Інваріанти (від лат. *invariants* – незмінний) – сталі величини, що не змінюються в процесі еволюції системи.

скільки завгодно, і всі вони будуть рівноправні. Згідно з принципом відносності, математичне формулювання законів природи має бути таким, щоб воно не змінювалося у разі переходу від однієї інерціальної системи відліку до іншої.

Завдяки принципу відносності фізичні закони є досконалими, маючи симетрію відносно вибору інерціальних систем відліку.

§ 34. Застосування законів збереження

Зіткнення тіл

Вивчення зіткнення тіл або ударів* відіграло велику роль у фізиці. В 1666 р. Лондонське королівське товариство для розвитку природничих наук оголосило конкурс на кращу роботу з вивчення зіткнення тіл. Оскільки детально простежити, що відбувається за коротку мить співударяння тіл, неможливо, то, щоб передбачити результат співударяння тіл, необхідно було знайти величини, які б лишалися незмінними при співударяннях. Результат пошуків виявився дивним:

голландський фізик Х. Гюйгенс і англійські фізики Уолліс та Рен відкрили закон збереження імпульсу;

Х. Гюйгенс, який повністю розв'язав задачу про зіткнення тіл, перший висловив думку про збереження кінетичної енергії при пружних зіткненнях.

Зіткнення тіл або удари тіл поділяють на абсолютно непружні та абсолютно пружні.

Абсолютно непружний удар – зіткнення тіл, при якому між тілами діють непотенціальні сили і внаслідок якого тіла рухаються як одне ціле.

Абсолютно пружний удар – це зіткнення тіл, при якому сили взаємодії тіл, що співударяються, є потенціальними і внаслідок якого механічна енергія системи не змінюється.

Абсолютно непружний і абсолютно пружний удари є фізичними моделями для описання реальних зіткнень.

Обмежимося розглядом центральних ударів, тобто таких ударів, коли швидкості тіл напрямлені вздовж лінії, котра з'єднує центри мас тіл.

Абсолютно непружний удар

До абсолютно непружних ударів можна віднести зіткнення метеоритів із Землею, метелика зі склом рухомого автомобіля, елементарних частинок, наприклад фотона та електрона, атома металу при фотоелектричному ефекті.

Розглянемо як приклад абсолютно непружного удару зіткнення платформи з піском M , яка рухається зі швидкістю v_1 , та ядра m , що летить зі швидкістю v_2 . Після

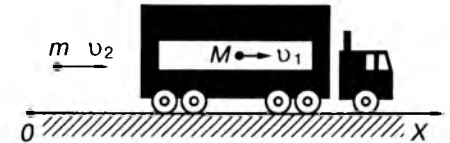


Рис. 3.16

центрального непружного удару (ядро застряло в піску) їх загальна швидкість дорівнює U (рис. 3.16). Визначимо її.

Ця система неконсервативна і незамкнена, проте для неї виконується закон збереження проекції імпульсу на вісь X , оскільки в даному напрямку на тіла не діють сили:

$$Mv_{1x} + mv_{2x} = (M + m)U_x,$$

або з урахуванням напрямку векторів v_1 , v_2 та осі X

$$Mv_1 + mv_2 = (M + m)U,$$

звідки

$$U = \frac{Mv_1 + mv_2}{M + m}. \quad (3.32)$$

Швидкість системи $(M + m)$ після непружного зіткнення U співнапрявлена зі швидкостями v_1 і v_2 . Під час непружних співударянь відбувається зміна механічної, в даному разі – кінетичної, енергії системи, оскільки при ударі між тілами діють непотенціальні сили:

$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1},$$

$$E_{k1} = \frac{(M + m)U^2}{2}; \quad E_{k2} = \frac{Mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2}.$$

Враховуючи, що $U = \frac{Mv_1 + mv_2}{M + m}$, дістанемо

$$\begin{aligned} \Delta E_{k1} &= \frac{M + m}{2} \left(\frac{Mv_1 + mv_2}{M + m} \right)^2 - \frac{Mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2}; \\ \Delta E_{k2} &= -\frac{Mm}{2(M + m)} (v_1 - v_2)^2. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Знак “мінус” показує зменшення кінетичної енергії; оскільки $\Delta E_k < 0$, то $E_{k2} < E_{k1}$.

* Удар – це явище зміння швидкостей тіл за дуже малий проміжок часу їх зіткнень.

Абсолютно пружний удар

До абсолютно пружних ударів можна віднести зіткнення більярдних куль, удар шайби об штангу воріт при грі в хокей, зіткнення багатьох елементарних частинок. Розглянемо центральне співударяння двох куль з масами m_1 і m_2 , що рухаються поступально вздовж осі X зі швидкостями v_1 і v_2 (рис. 3.17). Визначимо швидкість куль U_1 та U_2 після центрального пружного удару.

Для цієї системи тіл виконується закон збереження проекції імпульсу на вісь X . З урахуванням напрямку векторів v_1 , v_2 та осі X (див. рис. 3.17) закон збереження імпульсу запишемо так:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2.$$

Система куль консервативна, тому до неї застосовний закон збереження механічної енергії у вигляді

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2}.$$

Розв'язуючи сумісно рівняння, котрі виражають закони збереження імпульсу та енергії, дістаємо

$$U_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}; \quad U_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2}. \quad (3.34)$$

Розглянемо окремі розв'язання цієї системи рівнянь.

- Нехай одне з тіл до удару знаходиться в стані спокою. Наприклад, на хокейному майданчику в штангу воріт масою M влучає шайба масою m , яка летить зі швидкістю v_1 . Визначимо швидкість шайби U_1 та швидкість воріт після пружного удару шайби об штангу воріт.

У цьому разі система рівнянь, що виражають закон збереження імпульсу і закон збереження енергії, матиме вигляд

$$\begin{cases} m v_1 + 0 = m U_1 + M U_2; \\ \frac{m v_1^2}{2} = \frac{m U_1^2}{2} + \frac{M U_2^2}{2}. \end{cases}$$

Члени рівняння, що характеризують шайбу, перенесемо вліво:

$$\begin{cases} m v_1 - m U_1 = M U_2; \\ \frac{m v_1^2}{2} - \frac{m U_1^2}{2} = \frac{M U_2^2}{2}. \end{cases}$$

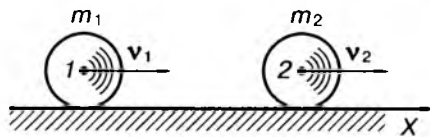


Рис. 3.17

Винесемо спільний множник m і друге рівняння помножимо на два:

$$\begin{cases} m(v_1 - U_1) = M U_2; \\ m(v_1^2 - U_1^2) = M U_2^2. \end{cases}$$

Перепишемо перше рівняння без змін, а друге рівняння почленно розділимо на перше; отримаємо

$$\begin{cases} m(v_1 - U_1) = M U_2; \\ v_1 + U_1 = U_2. \end{cases}$$

Підставивши знайдене значення U_2 в перше рівняння, дістанемо

$$m(v_1 - U_1) = M(v_1 + U_1).$$

Розкриємо дужки:

$$m v_1 - m U_1 = M v_1 + M U_1.$$

Перенесемо члени, які містять U_1 , вліво:

$$-m U_1 - M U_1 = M v_1 - m v_1,$$

звідки

$$-U_1(m + M) = (M - m)v_1.$$

З отриманої рівності визначаємо швидкість шайби після удару об штангу:

$$U_1 = -\frac{M - m}{M + m} v_1. \quad (3.35)$$

Знак "мінус" показує, що швидкості шайби до і після удару протилежно напрямлені ($v_1 \uparrow \downarrow U_1$).

Підставивши формулу (3.35) в раніше отримане співвідношення $v_1 + U_1 = U_2$, визначимо швидкість воріт після удару шайби об штангу:

$$U_2 = \frac{2m}{M + m} v_1. \quad (3.36)$$

Швидкість воріт і швидкість шайби до удару співнапрямлені ($v_1 \uparrow \uparrow U_2$).

У випадку, коли $M \gg m$, як, наприклад, при ударі тенісного м'яча (m) об стінку (M), із формули (3.35) випливає, що

$$U_1 \approx -\frac{M}{M} v_1 \approx -v_1,$$

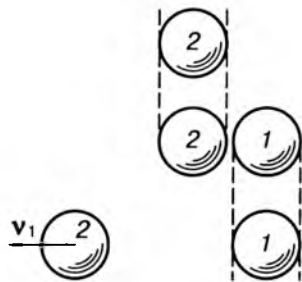


Рис. 3.18

тобто швидкість тенісного м'яча після удару об стінку дорівнює за модулем його швидкості до удару, але протилежно їй напрямлена:

$$|U_1| = |v_1|; v_1 \uparrow \downarrow U_1.$$

Якщо $M = m$ (наприклад, дві більярдні кулі, одна з яких рухається зі швидкістю v_1 , а інша перебуває у стані спокою), з формул

(3.35) і (3.36) випливає, що при центральному пружному ударі (в більярдні називається "циголь") швидкість першої кулі $U_1 = 0$, швидкість другої кулі $U_2 = v_1$. У разі цигля перша куля зупиняється, а друга, що раніше знаходилася в спокої, почне рухатися в напрямку руху першої кулі зі швидкістю v_1 . Внаслідок удару кулі "обмінюються" швидкостями (рис. 3.18).

Друга космічна швидкість

Друга космічна швидкість – це найменша швидкість, яку треба надати тілу, щоб воно, подолавши гравітаційне тяжіння Землі (Венери, Марса, Місяця або іншого космічного тіла), віддалилося від неї на нескінченно велику відстань.

Визначимо другу космічну швидкість v_{II} ракети масою m , що стартувала з Землі (M_{\oplus}). Поблизу поверхні Землі механічна енергія ракети, що стартувала зі швидкістю v_0 , дорівнює

$$E = \frac{mv_0^2}{2} - G \frac{mM_{\oplus}}{R_{\oplus}}.$$

В міру віддалення ракети від Землі її потенціальна енергія збільшуватиметься, а кінетична – зменшуватиметься. В точці, що знаходиться на відстані r від центра Землі, механічна енергія ракети, котра рухається зі швидкістю $v < v_0$,

$$E = \frac{mv^2}{2} - G \frac{mM_{\oplus}}{r}.$$

На підставі закону збереження енергії

$$\frac{mv_0^2}{2} - G \frac{mM_{\oplus}}{R_{\oplus}} = \frac{mv^2}{2} - G \frac{mM_{\oplus}}{r}.$$

Ракета долає гравітаційне притягання Землі, якщо потенціальна енергія взаємодії з Землею $E_{II} \rightarrow 0$, тобто

$$-G \frac{mM_{\oplus}}{r} \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty.$$

У цьому разі закон збереження енергії має вигляд

$$\frac{mv_0^2}{2} - G \frac{mM_{\oplus}}{R_{\oplus}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Швидкість v_0 , з якою ракета під час запуску подолає гравітаційну взаємодію з Землею,

$$v_0 = \sqrt{\frac{2}{m} \left(G \frac{mM_{\oplus}}{R_{\oplus}} + \frac{mv^2}{2} \right)}.$$

Швидкість v_0 буде мінімальною, тобто космічною швидкістю $v_0 = v_{II}$, якщо підкореневий вираз матиме мінімальне значення, тобто $\frac{mv^2}{2} = 0$; тоді

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}}; \quad (3.37)$$

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2 \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}}{6,4 \cdot 10^6 \text{ м}}} \approx 11,2 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

За формулою (2.22) $g = G \frac{M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$, а тому

$$v_{II} = \sqrt{2gR_{\oplus}}. \quad (3.38)$$

Враховуючи, що перша космічна швидкість [див. формулу (2.35)] $v_I = \sqrt{gR_{\oplus}}$, друга космічна швидкість більша за першу космічну в $\sqrt{2}$ раз, або $v_{II} \approx 1,41v_I$, $v_{II} = \sqrt{2}v_I$.

Нижче наведено значення другої космічної швидкості для планет земної групи.

Значення другої космічної швидкості

Планета	v_{II} , км/с	Планета	v_{II} , км/с
Меркурій	4,2	Земля	11,2
Венера	10,3	Марс	5,0

Короткі висновки

- Зменшення сумарного імпульсу системи тіл визначається сумою зовнішніх тіл, які діють на цю систему.
- Замкнена система – це система тіл, на кожне з яких не діють зовнішні сили.
- Закон збереження імпульсу: в інерціальній системі відліку сумарний імпульс замкненої системи тіл у часі не змінюється. Закон збереження імпульсу є теоретичною основою реактивного руху.
- Робота сили – це скалярна фізична величина, що дорівнює скалярному добуткові вектора сили на вектор переміщення:

$$A = (\mathbf{F}\Delta\mathbf{r}); \quad A = F\Delta r \cos(\mathbf{F} \wedge \Delta\mathbf{r}).$$

- Одиниця роботи – джоуль (Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2.$$

- Потенціальні сили – це сили, робота яких залежить тільки від початкового і кінцевого положень тіл. Робота потенціальних сил по замкненій траєкторії дорівнює нулю.
- Непотенціальні сили – це сили, робота яких залежить від траєкторії руху тіла.
- Потужність дорівнює добуткові модуля вектора сили на модуль вектора швидкості та на косинус кута між напрямками цих векторів:

$$N = Fv \cos \alpha.$$

- Енергія E – це скалярна фізична величина, яка є мірою різних форм руху та взаємодії матерії.
- Кінетична енергія при поступальному русі тіла дорівнює половині добутку маси (m) на квадрат його швидкості:

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

- Зміна кінетичної енергії тіла ΔE_k у разі переходу з одного положення в інше дорівнює роботі всіх сил, які діють на тіло.
- Потенціальна енергія – це енергія взаємодії.
- Повна механічна енергія системи тіл – це сума кінетичної та потенціальної енергій усіх тіл, що входять до системи.
- Закон збереження енергії: повна механічна енергія замкненої консервативної системи не змінюється, тобто зберігається.
- Абсолютно непружний удар – зіткнення тіл, при якому між тілами діють непотенціальні сили і внаслідок якого тіла рухаються як єдине ціле.
- Абсолютно пружний удар – зіткнення тіл, при якому сили взаємодії частинок, що співударяються, є потенціальними і внаслідок взаємодії механічна енергія системи не змінюється.
- Друга космічна швидкість – найменша швидкість, яку треба надати тілу, щоб воно, подолавши гравітаційне тяжіння Землі (Венери, Марса, Місяця або іншого космічного тіла), віддалилось від неї на нескінченно велику відстань.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Які сили називаються внутрішніми, зовнішніми?
2. Яка система тіл називається замкненою?
3. Наведіть приклади замкнених систем тіл.
4. Сформулюйте закон збереження імпульсу.
5. В яких випадках закон збереження імпульсу можна застосувати для незамкнених систем тіл?
6. Який рух називають реактивним?
7. Чому для запуску космічних кораблів з поверхні Землі використовується багатоступенева ракета?
8. Сформулюйте означення роботи сили.
9. За яких умов робота сили додатна; від'ємна; дорівнює нулю? Наведіть приклади.
10. Які сили називаються потенціальними? Наведіть приклади.
11. Як можна визначити роботу?
12. Чому дорівнює робота, здійснювана пружною силою?
13. За яких умов робота гравітаційних сил дорівнює mgh ?
14. В яких одиницях вимірюється потужність?
15. Чому дорівнює миттєва потужність?
16. Сформулюйте означення енергії. В яких одиницях вимірюється енергія?
17. Що є мірою зміни енергії системи тіл?
18. Наведіть приклади змінення механічної енергії системи тіл.
19. Сформулюйте означення кінетичної енергії тіла.
20. Сформулюйте теорему про кінетичну енергію.
21. Сформулюйте означення потенціальної енергії систем тіл.
22. Чому потенціальна енергія не залежить від вибору системи відліку?
23. При якому виборі початку відліку потенціальна енергія тіла в гравітаційному полі Землі буде від'ємною?
24. Чому дорівнює потенціальна енергія пружнодеформованого тіла?
25. Чому дорівнює повна механічна енергія системи тіл?
26. Дайте поняття консервативних і неконсервативних систем тіл.
27. За яких умов повна кінетична енергія системи зберігається?
28. Чому дорівнює зміна повної механічної енергії системи?
29. З якими властивостями простору й часу пов'язані закони збереження імпульсу, енергії?
30. Чому планети Сонячної системи мають різну космічну швидкість?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Людина масою $m = 60$ кг спускається на землю сходами завдовжки 20 м, які розташовані під кутом $\beta = 30^\circ$ до горизонтальної поверхні. Знайти роботу сили тяжіння.

Дано: $m = 60$ кг; $s = 20$ м; $\beta = 30^\circ$; $g = 10$ м/с².

Знайти: A .

Розв'язання. *Спочіб 1.* Робота сили тяжіння дорівнює зміні потенціальної енергії, взятій з протилежним знаком:

$$A = -(mgh_2 - mgh_1). \quad (1)$$

Вважаємо, що потенціальна енергія людини на поверхні землі дорівнює нулеві: $mgh_2 = 0$, тоді

$$A = mgh_1, \quad (2)$$

де h_1 – висота (рис. 3.19),

$$h_1 = s \sin \beta. \quad (3)$$

Підставивши (3) в (2), дістанемо

$$A = mgs \sin \beta.$$

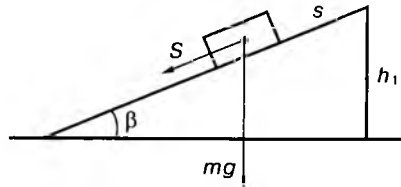


Рис. 3.19

Обчислення: $A = 60 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \times 20 \text{ м} \cdot \sin 30^\circ = 6 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 6 \text{ кДж}$.

Спосіб 2. Робота сили тяжіння дорівнює

$$A = mgs \cos \alpha,$$

де α – кут між вектором переміщення ($\alpha = 90^\circ - \beta = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$).

Обчислення: $A = 60 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 20 \text{ м} \cdot \cos 60^\circ = 6 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 6 \text{ кДж}$.

Задача 2. Куля, що летить зі швидкістю v_1 , заглиблюється в мішень на 0,5 см. На скільки заглибиться в ту саму мішень куля, що летить зі швидкістю $v_2 = 2v_1$?

Дано: $v_{01}, v_{02} = 2v_{01}; S = 0,5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; v = 0$.

Знайти: s_2 .

Розв'язання. Кінетична енергія кулі витрачається на виконання роботи з подолання сили опору мішені. Вважаємо, що сила опору є сталою.

Для першого випадку

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_{01}^2}{2} = FS_1.$$

Для другого випадку

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_{02}^2}{2} = FS_2.$$

Оскільки $v_{02} = 2v_{01}$ і $v = 0$, то

$$-\frac{mv_{01}^2}{2} = FS_1; \quad (1)$$

$$-\frac{m \cdot 4v_{01}^2}{2} = FS_2. \quad (2)$$

Розділивши (2) на (1), дістанемо:

$$\frac{m \cdot 4v_{01}^2 \cdot 2}{2mv_{01}^2} = \frac{FS_2}{FS_1} \text{ або } 4 = \frac{S_2}{S_1}; S_2 = 4S_1.$$

Обчислення: $S_2 = 4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 20 \text{ см}$.

Задача 3. Спускаючись під уклон при вимкненому двигуні, автомобіль масою $m = 2 \cdot 10^3$ рухається рівномірно зі швидкістю $v = 10 \text{ м/с}$. Визначити потужність двигуна при підйомі автомобіля по такому ж самому уклону з тією ж швидкістю. Уклон ділянки, по якій рухається автомобіль, дорівнює 0,1.

Дано: $m = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}; v = 10 \text{ м/с}; \sin \beta = 0,1; g = 10 \text{ м/с}^2; a = 0$.

Знайти: N .

Розв'язання. Потужність двигуна автомобіля, який рухається рівномірно,

$$N = Fv,$$

де F – сила тяги автомобіля; v – швидкість рівномірного руху.

Силу F визначаємо за другим законом Ньютона, враховуючи, що $v = \text{const}$ або $a = 0$.

На автомобіль, що спускається під уклон, діють (рис. 3.20): 1) сила тяжіння mg ; 2) сила тертя F_T ; 3) сила реакції опори N .

Запишемо у векторній формі другий закон Ньютона:

$$N + mg + F_T = 0;$$

$$\begin{cases} -F_T + mg \sin \beta = 0 & (\text{проекція на вісь } X); \\ N - mg \cos \beta = 0 & (\text{проекція на вісь } Y). \end{cases}$$

Тоді

$$F_T = mg \sin \beta.$$

На автомобіль, що рухається вгору по уклону, діють (рис. 3.21): 1) сила тяжіння mg ; 2) сила тертя F_T ; 3) сила реакції опори N ; 4) сила тяги автомобіля F :

$$mg + F_T + N + F = 0.$$

Проекція на вісь X

$$-mg \sin \beta - F_T + F = 0.$$

З рівняння випливає, що

$$F = F_T + mg \sin \beta.$$

Потужність двигуна

$$N = Fv \text{ або } N = Fv \cos \alpha,$$

але $\alpha = 0$, тобто $\cos \alpha = 1$.

Тоді

$$N = Fv = 2mgv \sin \beta.$$

Обчислення: $N = 2 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с} \cdot 0,1 \cdot 10 \text{ м/с}^2 = 4 \cdot 10^4 \text{ Вт} = 40 \text{ кВт}$.

Задача 4. Із залізничної платформи, що рухається зі швидкістю $v = 2 \text{ м/с}$, вистрілили з гармати. Загальна маса платформи з гарматою $M = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}$, маса снаряда $m_2 = 20 \text{ кг}$, його початкова швидкість $v_2 = 600 \text{ м/с}$. Якою буде швидкість платформи в момент пострілу, якщо напрям пострілу:

а) збігається з напрямом руху платформи; б) протилежний напрям руху платформи?

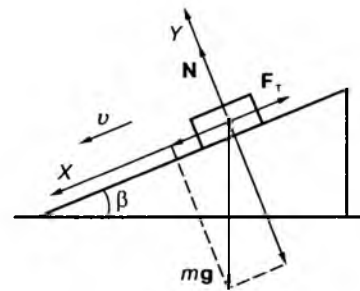


Рис. 3.20

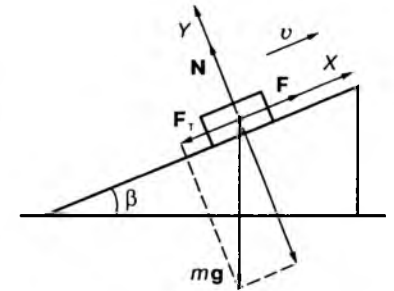


Рис. 3.21

Дано: $v = 2 \text{ м/с}$; $M = m_1 + m_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}$; $m_2 = 20 \text{ кг}$; $v_2 = 600 \text{ м/с}$.

Знайти: v'_1 ; v''_2 .

Розв'язання. На систему залізнична платформа–снаряд діють зовнішні сили: 1) сила тяжіння снаряда; 2) сила тяжіння платформи; 3) сила реакції рейок. Але в горизонтальному напрямку на систему платформа–снаряд зовнішні сили не діють, тому при розв'язанні задачі можна застосувати закон збереження проекції імпульсу на вісь X – горизонтальну вісь.

Додатний напрям осі X збігається з напрямом руху залізничної платформи до пострілу.

1. Напрямок пострілу збігається з напрямом руху платформи:

$$Mv = (M - m_2)v'_1 + m_2v_2,$$

звідки

$$v'_1 = \frac{Mv - m_2v_2}{M - m_2}.$$

2. Напрямок пострілу протилежний напрямом руху платформи:

$$Mv = (M - m_2)v''_1 - m_2v_2,$$

звідки

$$v''_2 = \frac{Mv + m_2v_2}{M - m_2}.$$

Обчислення:

$$v'_1 = \frac{2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 2 \text{ м/с} - 20 \text{ кг} \cdot 600 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^3 \text{ кг} - 20 \text{ кг}} \approx -4 \text{ м/с};$$

$$v''_2 = \frac{2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 2 \text{ м/с} + 20 \text{ кг} \cdot 600 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^3 \text{ кг} - 20 \text{ кг}} \approx 8 \text{ м/с}.$$

Аналіз. $v'_1 = -4 \text{ м/с}$, отже, напрям руху залізничної платформи змінився на протилежний, швидкість платформи в цьому напрямі – 4 м/с ; $v''_2 = 8 \text{ м/с}$, швидкість руху платформи збільшилась, платформа рухається в попередньому напрямі.

Задача 5. Два товарних вагони рухаються назустріч один одному зі швидкостями $v_1 = 0,4 \text{ м/с}$ і $v_2 = 0,1 \text{ м/с}$. Маса вагонів відповідно дорівнюють $m_1 = 12 \text{ т}$, $m_2 = 48 \text{ т}$. З якою швидкістю і в якому напрямі рухатимуться вагони після зіткнення? Удар вважати непружним.

Дано: $v_1 = 0,4 \text{ м/с}$; $v_2 = 0,1 \text{ м/с}$; $m_1 = 12 \text{ т} = 12 \cdot 10^3 \text{ кг}$; $m_2 = 48 \text{ т} = 48 \cdot 10^3 \text{ кг}$.

Знайти: v .

Розв'язання. Застосуємо закон збереження проекції імпульсу на вісь X . Додатний напрям осі X збігається з напрямом руху першого вагона:

$$m_1v_1 - m_2v_2 = (m_1 + m_2)v,$$

звідки

$$v = \frac{m_1v_1 - m_2v_2}{m_1 + m_2}.$$

$$\text{Обчислення: } v = \frac{12 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 0,4 \text{ м/с} - 48 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot 0,1 \text{ м/с}}{12 \cdot 10^3 \text{ кг} + 48 \cdot 10^3 \text{ кг}} = 0.$$

Аналіз: $v = 0$, отже, після зіткнення вагони зупиняться.

Задача 6. Тіло кинуте під кутом до горизонту зі швидкістю $v_0 = 10 \text{ м/с}$. Яку швидкість матиме тіло на висоті $h = 3,2 \text{ м}$ над горизонтом? Опором повітря знехтувати.

Дано: $v_0 = 10 \text{ м/с}$; $h = 3,2 \text{ м}$; $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Знайти: v .

Розв'язання. До замкненої системи Земля–тіло застосуємо закон збереження механічної енергії

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + mgh.$$

Розв'язуючи рівняння відносно v , дістанемо

$$v = \sqrt{v_0^2 - 2gh}.$$

Обчислення: $v = \sqrt{(10 \text{ м/с})^2 - 2 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 3,2 \text{ м}} = 6 \text{ м/с}$.

Задача 7. Футбольний м'яч масою $m = 0,4 \text{ кг}$ летить у напрямку воріт зі швидкістю $v_1 = 20 \text{ м/с}$. Назустріч йому біжить воротар зі швидкістю $v_2 = 2 \text{ м/с}$. Визначити кінетичну енергію м'яча відносно воріт і відносно воротаря.

Дано: $m = 0,4 \text{ кг}$; $v_1 = 20 \text{ м/с}$; $v_2 = 2 \text{ м/с}$.

Знайти: $E_{к1}$, $E_{к2}$.

Розв'язання. 1. Кінетична енергія відносно воріт

$$E_{к1} = \frac{mv_1^2}{2}.$$

2. Кінетична енергія відносно воротаря

$$E_{к2} = \frac{m(v_1 + v_2)^2}{2},$$

де $v_1 + v_2 = v$ – швидкість м'яча відносно воротаря.

Обчислення:

$$E_{к1} = \frac{0,4 \text{ кг} \cdot (20 \text{ м/с})^2}{2} = 80 \text{ Дж},$$

$$E_{к2} = \frac{0,4 \text{ кг} \cdot (20 \text{ м/с} + 2 \text{ м/с})^2}{2} = 96,8 \text{ Дж}.$$

Задача 8. Тіло, що падає на поверхню Землі, на висоті $4,8 \text{ м}$ від неї мало швидкість 10 м/с . З якою швидкістю тіло впаде на Землю? Опором повітря знехтувати.

Дано: $h = 4,8 \text{ м}$; $v_1 = 10 \text{ м/с}$; $h_2 = 0$; $g = 10 \text{ м/с}^2$.

Знайти: v_2 .

Розв'язання. Система Земля–тіло є замкнутою, тому до неї застосований закон збереження механічної енергії:

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

На поверхні Землі потенціальна енергія тіла $E_{п2} = 0$, тобто поверхню Землі вибираємо за нуль відліку потенціальної енергії. Отже,

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2},$$

звідки

$$v_2 = \sqrt{2gh_1 + v_1^2}.$$

Обчислення: $v_2 = \sqrt{2 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 4,8 \text{ м} + (10 \text{ м/с})^2} = 14 \text{ м/с}.$

Задача 9. Тіло кинуте вертикально вгору зі швидкістю $v_1 = 8 \text{ м/с}$. На якій висоті потенціальна енергія тіла дорівнюватиме кінетичній енергії? Опором повітря знехтувати.

Дано: $v_1 = 8 \text{ м/с}$; $E_{п2} = E_{к2}$; $g = 10 \text{ м/с}^2$; $h_1 = 0$.

Знайти: h_2 .

Розв'язання. Система Земля–тіло є замкнутою, отже, повна механічна енергія системи лишається сталою. За нуль відліку потенціальної енергії вибираємо точку кидання, тобто $h_1 = 0$.

За законом збереження енергії

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

За умовою задачі $E_{п2} = E_{к2}$, тобто

$$\frac{mv_2^2}{2} = mgh_2.$$

Тоді

$$\frac{mv_1^2}{2} = 2mgh_2,$$

звідки

$$h_2 = \frac{v_1^2}{4g}.$$

Обчислення: $h_2 = \frac{(8 \text{ м/с})^2}{4 \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 1,6 \text{ м}.$

Задача 10. Автомобіль рухається по горизонтальній асфальтовій дорозі зі швидкістю 108 км/год . Знайти його гальмівний шлях. Коефіцієнт тертя шин автомобіля об асфальт $\mu = 0,4$.

Дано: $v_1 = 108 \text{ км/год} = 30 \text{ м/с}$; $v_2 = 0$; $\mu = 0,4$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Знайти: S .

Розв'язання. Гальмівний шлях – це відстань S , яку проходить автомобіль до повної зупинки; отже, кінцева швидкість $v_2 = 0$.

При гальмуванні на автомобіль діють сили: тяжіння, реакції опори та тертя. Робота сил тяжіння і реакції опори дорівнює нулю, оскільки вони перпендикулярні до напрямку переміщення. При гальмуванні автомобіля роботу здійснюють лише сили тертя, направлені протилежно переміщенню (швидкості) автомобіля:

$$F_{\text{т}} = \mu N = \mu mg.$$

Робота сил тертя на гальмівному шляху від'ємна і дорівнює

$$A_{\text{т}} = -\mu mgS.$$

За теоремою про кінетичну енергію маємо

$$-\mu mgS = -\frac{mv^2}{2},$$

звідки

$$S = \frac{v_1^2}{2\mu g}.$$

Гальмівний шлях не залежить від маси автомобіля.

Обчислення: $S = \frac{(30 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 0,4 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2} \approx 115 \text{ м}.$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Підіймальний кран, потужність двигуна якого 15 кВт , рівномірно піднімає вантаж зі швидкістю $1,5 \text{ м/с}$. Визначити масу вантажу.
2. Людина масою 60 кг пробігає сходи заввишки 10 м за 15 с . Яку середню потужність розвиває людина в такому разі?
3. Вантаж масою 10 кг падає з деякої висоти і досягає поверхні Землі за $2,5 \text{ с}$. Знайти роботу сили тяжіння.
4. Потяг масою 250 т рівномірно піднімається по уклону 10 м на 1 км шляху зі швидкістю 30 км/год . Коефіцієнт тертя $0,002$. Визначити потужність, яку розвиває локомотив потягу.
5. Потужність двигуна танка 368 кВт . З якою максимальною швидкістю може рівномірно підніматися танк у гору з укладом 30° ? Маса танка 15 т .
6. Ковзаняр масою 50 кг , стоячи на льоду, кидає в горизонтальному напрямі шайбу масою 300 г зі швидкістю 15 м/с . На яку відстань відкотиться ковзаняр, якщо коефіцієнт тертя ковзанів об лід $0,01$?
7. Назустріч вагону з піском, який рухається зі швидкістю 36 км/год , горизонтально летить снаряд зі швидкістю 500 м/с . Визначити швидкість їх спільного руху, якщо снаряд застряє в піску. Маса вагона 10 т , маса снаряда 100 кг .
8. Снаряд, що летить зі швидкістю 15 м/с , розривається на два осколки масами 6 кг і 14 кг . Визначити швидкість більшого осколка, якщо менший осколок полетить зі швидкістю 6 м/с у напрямі, протилежному напрямку руху снаряда.

9. Дві кулі масами 6 кг і 4 кг рухаються вздовж одної прямої зі швидкостями 8 м/с і 3 м/с. З якою швидкістю вони рухатимуться після абсолютно непружного удару, якщо перша куля наздоганяє другу?

10. Куля масою $2,4 \cdot 10^{-2}$ кг, що летить зі швидкістю 400 м/с, влучає в перегороду. Середня сила опору перегороди руху кулі 7,6 кН. Чи проб'є куля перегороду, якщо товщина перегороди 30 см?

11. Тіло піднімають вертикально вгору з прискоренням 2 м/с^2 . Визначити масу тіла, якщо протягом перших п'яти секунд було виконано роботу 1,48 кДж.

12. Тіло масою 5 кг падає з висоти 20 м. Визначити суму потенціальної та кінетичної енергії тіла в точці, яка знаходиться від поверхні Землі на висоті 7 м. Тертям тіла об повітря знехтувати.

13. Тіло, падаючи з висоти 5,14 м, у момент зіткнення з Землею має імпульс 100 кг·м/с. Визначити масу тіла і його кінетичну енергію в момент удару об Землю.

14. Автомобіль масою 2 т зупиняється за 12 с, пройшовши відстань 60 м. Визначити початкову швидкість автомобіля і силу тертя, котра виконує роботу з гальмування автомобіля.

15. Вантаж масою 4 кг, що падає з висоти 5 м, проходить у ґрунт на глибину 0,05 м. Визначити середню силу опору ґрунта.

16. Із пружинного пістолета зроблено постріл вертикально вгору кулею масою 40 г. На яку висоту підніметься куля, якщо пружина жорсткістю 392 Н/м була стиснута на 10 см? Опором повітря і масою пружини знехтувати.

17. Куля, що летить горизонтально зі швидкістю 500 м/с, влучає в підвішений на довгій мотузці мішечок з піском і застряє в ньому. На яку висоту піднімається мішечок з піском, якщо його маса 6 кг, а маса кулі 15 г?

18. Нехтуючи тертям, визначити найменшу висоту, з якої має розпочати розгін велосипедист, щоб він зміг проїхати по вертикальній петлі радіусом 4 м і не відірватися від неї у верхній точці.

19. Штучний супутник Землі рухається по еліптичній орбіті. Визначити швидкість руху супутника в апогеї, якщо його швидкість у перигеї 8,25 км/с. Перигей орбіт знаходиться на відстані 200 км, а апогей – на відстані 400 км від поверхні Землі.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ І ТЕРМОДИНАМІКИ

Цей розділ присвячено вивченню фізичних властивостей тіл у різних агрегатних станах на основі розгляду їх молекулярної будови, хаотичного руху молекул і взаємодії частинок (атомів, молекул, іонів), які утворюють фізичні тіла.

У фізиці для опису цих явищ використовують два основних методи: молекулярно-кінетичний (статистичний) і термодинамічний. Молекулярно-кінетичний метод ґрунтується на уявленні про те, що всі речовини складаються з молекул, які хаотично рухаються. Оскільки кількість молекул величезна, то можна, застосовуючи закони статистики, знайти певні закономірності для всієї речовини в цілому. Термодинамічний метод виходить з основних дослідних законів, які назвали законами термодинаміки. Цей метод застосовують до вивчення явищ подібно до класичної механіки, яка базується на дослідних законах Ньютона. Якщо користуватися таким підходом, то внутрішню будову речовини не розглядають.

ГЛАВА 4

ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНО-КІНЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ

§ 35. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

Розділ фізики, що вивчає залежності будови і фізичних властивостей тіл від характеру руху і взаємодії між частинками, з яких складаються тіла, називають *молекулярною фізикою*.

Вчення про те, що всі тіла складаються з окремих частинок – атомів, виникло у Стародавній Греції в IV ст. до н. е. Основоположником атомістичної теорії був філософ Демокріт. Погляди Демокріта, природно, дуже далекі від сучасних уявлень, але вони мали велике значення у розвитку фізики. Серед видатних філософів-фізиків, які вивчали молекулярну будо-

ву речовини, особливу роль відіграли праці великого російського вченого М. В. Ломоносова. Він розглянув питання обертального руху молекул і пояснив теплові явища в цьому виді руху. Ломоносов заперечував учення про теплець, що панувало тоді, – деяку невагому рідину, яка нібито визначала теплові властивості тіл, а твердив, що “теплота полягає у внутрішньому русі матерії”.

Основні уявлення, висловлені М. В. Ломоносовим, були потім розвинуті Л. Больцманом, Р. Клаузіусом, Дж. Максвеллом, Ж. Гей-Люссаком, А. Авогадро та ін. Численні дослідження, виконані цими вченими, дали можливість сформулювати основні положення молекулярно-кінетичної теорії. В основі теорії лежать три важливі положення, підтверджені експериментально і теоретично.

1. Усі тіла складаються з найдрібніших частинок – атомів, молекул, до складу яких входять ще дрібніші елементарні частинки (електрони, протони, нейтрони). Будова будь-якої речовини дискретна (переривчаста).

2. Атоми і молекули речовини завжди перебувають у безперервному хаотичному русі.

3. Між частинками будь-якої речовини існують сили взаємодії – притягання і відштовхування. Природа цих сил електромагнітна.

Ці положення підтверджуються явищами дифузії, броунівського руху, особливостями будови і властивостями газів, рідин, твердих тіл та інших явищами.

Тепловий рух

Дослідні дані, які лежать в основі молекулярно-кінетичної теорії, є наочним доказом молекулярного руху і залежності цього руху від температури. На відміну від механічного руху нагрівання чи охолодження тіл може призвести до зміни їхніх фізичних властивостей. Так, від значного охолодження вода перетворюється в лід, а нагрівання металу до високих температур перетворює його не тільки в рідину, а й у газ.

Перебіг теплових процесів безпосередньо пов'язаний із структурою речовини, тому теплові явища можна використати для пояснення будови речовини, а будова речовини, у свою чергу, дає нам уявлення про фізичний зміст теплових явищ.

Щоб пояснити ці процеси і навчитись керувати ними, треба встановити закони, яким підпорядковані зміни, що відбуваються з тілами під дією теплоти. Ці закони описують теплову форму руху матерії.

§ 36. Розміри і маса молекул та атомів

Розміри молекул

Усі тіла складаються з безлічі молекул і атомів. Оскільки розміри атомів і молекул дуже малі, то побачити їх неозброєним оком не можна. Навіть кращі оптичні мікроскопи не дають можливості побачити окрему молекулу. Тільки за допомогою електронного мікроскопа, який дає збільшення в 30 000 разів і більше, було сфотографовано окремі великі молекули. Методом рентгеноструктурного аналізу з достатньою точністю можна визначити розміри молекул. Дані рентгеноструктурного аналізу показують, що найбільший лінійний розмір двохатомної молекули кисню порядку $4 \cdot 10^{-10}$ м, такий самий розмір мають молекули азоту. Об'єм молекули кисню дорівнює приблизно 10^{-29} м³.

Про те, що розміри молекул дуже малі, можна зробити висновок і без вимірювань. Виконаємо такий простий дослід. В 1 л (10^{-3} м³) чистої води розведемо 1 мм³ (10^{-9} м³) зеленого чорнила, тобто розбавимо чорнило в 1 млрд разів. Побачимо, що розчин має зелене забарвлення і водночас однорідний. Це свідчить про те, що навіть при розбавленні в 1 млн разів у воді є велика кількість молекул барвника (чорнила). Цей дослід показує, які малі розміри мають молекули.

Великі успіхи, досягнуті останнім часом у вивченні будови речовини, розкрили перед нами новий світ – світ найдрібніших частинок. Цей світ назвали *мікросвітом* на відміну від світу великих тіл – *макросвіту*. Встановлено, що мікросвіт дуже складний. Молекули будь-якого тіла складаються із ще дрібніших частинок – атомів, які, в свою чергу, складаються з електронів і ядер. Ядра атомів включають у себе протони і нейтрони – частинки, які також мають складну будову.

Атомом називають найменшу частинку певного хімічного елемента. Кожному хімічному елементу відповідають цілком певні атоми, які зберігають хімічні властивості цього елемента.

Молекулою називають найменшу стійку частинку певної речовини, яка має її основні хімічні властивості.

Маса молекул

Маси окремих молекул і атомів дуже малі, наприклад, абсолютне значення маси молекули води порядку $3 \cdot 10^{-26}$ кг. Маси окремих молекул експериментально визначають за допомогою спеціального приладу – мас-спектрометра.

У молекулярній фізиці маси атомів і молекул характеризують не їх абсолютними значеннями (в кілограмах), а відносними безрозмірними величинами, які називають *відносною атомною масою* A_0 і *відносною молекулярною масою* M_0 .

За міжнародною угодою за одиничну атомну масу m_0 береться 1/12 маси ізотопу вуглецю ^{12}C ($m_{0\text{C}}$):

$$m_0 = 1/12 m_{0\text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Відносну молекулярну масу, або відносну масу молекули (M_0), можна визначити, якщо абсолютне значення маси молекули ($m_{\text{мол}}$, кг) поділити на одиничну атомну масу ($1,66 \cdot 10^{-27}$ кг):

$$M_0 = \frac{m_{\text{мол}}}{m_0}. \quad (4.1)$$

Аналогічною формулою визначається і відносна атомна маса A , треба лише під $m_{\text{мол}}$ у формулі (4.1) розуміти абсолютне значення маси атома:

$$A_0 = \frac{m_{\text{ат}}}{m_0}.$$

Кількість речовини

Макроскопічні тіла складаються з безлічі молекул. Оскільки маси окремих молекул відрізняються одна від одної, то однакова кількість молекул різних речовин має різну масу, наприклад, 10^{28} молекул водню мають масу 33,45 кг, а 10^{28} молекул кисню – 531,45 кг. Тому прийнято порівнювати кількість молекул або атомів у певній речовині з кількістю атомів, які містяться в 0,012 кг вуглецю. Відносна кількість атомів або молекул в макроскопічному тілі характеризується фізичною величиною, яку називають кількістю речовини ν .

Кількість речовини – це відношення кількості N молекул (атомів) у певному макроскопічному тілі до кількості N_A атомів у 0,012 кг вуглецю:

$$\nu = N / N_A. \quad (4.2)$$

Кількість речовини визначають у *молях*.

Моль – кількість речовини, яка містить стільки молекул (атомів), скільки міститься молекул (атомів) у 0,012 кг вуглецю.

Моль будь-якої речовини містить, за означенням, однакову кількість молекул (атомів). Це число називають *сталю Авогадро*:

$$N_A = \frac{0,012 \text{ кг}}{12 m_0} \text{ моль}^{-1} = \frac{10^{-3} \text{ кг}}{1,66 \cdot 10^{-27}} \text{ моль}^{-1} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Поняття моля стосується кількості молекул (атомів) речовини. Наприклад, неправильно говорити, що в балоні міститься два моля вуглекислого газу CO_2 . Треба говорити: в балоні міститься два моля молекул вуглекислого газу. Це означає, що в балоні є $2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул CO_2 , тобто два моля атомів вуглецю і чотири моля атомів кисню.

Молекулярна маса

У молекулярній фізиці користуються таким поняттям *молекулярної маси* M , яку означають як масу одного моля речовини:

$$M = m_{\text{мол}} N_A. \quad (4.3)$$

Молекулярну масу виражають у *кілограмах на моль* (кг/моль). Маса будь-якої кількості речовини дорівнює

$$m = M \nu.$$

В 1 молі будь-якої речовини міститься $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул. Відомо, що моль за нормальних умов має об'єм $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Отже, в 1 м^3 будь-якого газу за нормальних умов міститься однакова кількість молекул:

$$N_{\text{л}} = \frac{N_A}{V_0} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ моль} \cdot \text{м}^3} = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^3.$$

Це число називають *сталю Лошмідта*.

§ 37. Броунівський рух. Дифузія

Броунівський рух

У 1827 р. англійський ботанік Р. Броун, вивчаючи внутрішню будову рослин за допомогою мікроскопа, встановив, що частинки твердої речовини в рідкому середовищі здійснюють безперервний хаотичний рух.

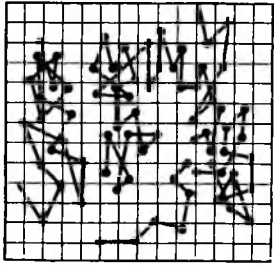


Рис. 4.1

Аналогічний рух можна спостерігати через мікроскоп, якщо розглядати дим, крапельки жиру у воді або частинки твердого тіла, що зависли в рідині чи газі. *Тепловий рух завислих у рідині (або газі) частинок назвали броунівським рухом.* Було встановлено, що швидкість броунівських частинок залежить від їх розмірів і температури. Чим вища температура і менші розміри, тим швидше рухаються частинки. Причиною броунівського

руху є безперервний хаотичний рух молекул рідини або газу, які, безладно вдаряючись з усіх боків об завислі в рідині (газі) частинки, надають їм руху.

Якщо розміри такої частинки великі, то вона зазнає з усіх боків безліч ударів; результуючий імпульс, здобутий нею від співударів, дорівнюватиме нулю або буде близький до нуля; частинка залишається практично нерухомою.

Якщо частинка має мікроскопічні розміри, то сума імпульсів, здобутих нею від молекул з різних боків, може не дорівнювати нулю як внаслідок різної кількості ударів, так і внаслідок того, що частинку з одного боку могли вдарити кілька молекул, які мають у даний момент часу більші швидкості, ніж молекули, що вдарили її з іншого боку. Така частинка починає рухатись. Через деякий час під дією нових співударів напрям її руху може змінитись. Якщо спостерігати за цією частинкою, то ми побачимо, що вона рухається ламаною траєкторією (рис. 4.1). Молекулярно-кінетичну теорію броунівського руху створив А. Ейнштейн, а експериментально вона була підтверджена в працях французького фізика Ж. Перрена.

Дифузія

Безперервний рух молекул будь-якої речовини (твердої, рідкої, газоподібної) підтверджується численними дослідженнями з дифузії. *Дифузією називають явище спонтанного проникнення однієї речовини в іншу.* Якщо пахучу речовину (ефір, гас, нафталін, духи тощо) внести до приміщення, то через деякий час запах цієї речовини пошириться по всьому приміщенню. Це свідчить про те, що молекули однієї речовини без впливу зовнішніх сил проникають в іншу. На досліді було встановлено, що швидкість перебігу процесу дифузії залежить від роду дифундуючих речовин і температури. Дифузія в рідинах відбувається повільніше, ніж у газах, але швидше, ніж у твердих тілах, тому що, чим густіша речовина, тим ближче одна до одної розміщені в ній молекули.

§ 38. Сили й енергія міжмолекулярної взаємодії

Молекулярні сили

У процесі вивчення будови речовини було встановлено, що між молекулами одночасно діють сили притягання і відштовхування, які називають *молекулярними силами*. Здатність твердих тіл чинити опір розтягання, особливі властивості поверхні рідини та інші явища дають можливість зробити висновок, що між молекулами діють *сили притягання*. Мала стисливість дуже густих газів, і особливо рідин і твердих тіл, означає, що між молекулами діють *сили відштовхування*. У твердих і рідких тілах сили відштовхування і притягання діють одночасно. Якби цього не було, то тіла не були б стійкі: або розліталися б на частинки, або злипалися. Сили міжмолекулярної взаємодії за своєю природою є силами електромагнітного походження.

Будова атомів і молекул

Атоми, що входять до складу молекул, – це складна система із заряджених частинок – електронів, що мають негативний заряд, і ядер, заряд яких позитивний. Електрони навколо ядра в атомі вдержуються кулонівськими силами притягання різнойменних зарядів. Атом у цілому електрично нейтральний. Молекули складаються з атомів. Сили, які вдержують разом атоми в молекулі, за своєю природою також є електричними, однак виникнення їх трохи складніше. Строга теорія молекулярних сил дається з позицій квантової механіки.

Міжмолекулярна взаємодія – це взаємодія електрично нейтральних молекул або атомів.

Залежність молекулярних сил від відстані між молекулами

Сили взаємодії залежать від відстані між молекулами. На відстанях, які перевищують розміри молекул у кілька разів, їх дія практично дорівнює нулю. На рис. 4.2 подано залежність сил взаємодії двох молекул від відстані між ними.

Між електронами однієї молекули і атомними ядрами іншої діють сили притягання $F_{пр}$, які умовно вважають від'ємними. Водночас між електронами молекул та їх ядрами діють сили відштовхування $F_{від}$, які умов-

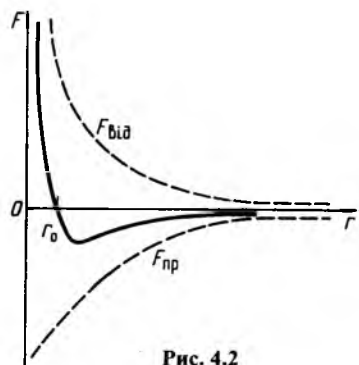


Рис. 4.2

но вважають додатними. На відстані $r = r_0$, як видно з рис. 4.2, результуюча сила дорівнює нулю ($F_r = 0$)*, тобто сили притягання зрівноважують сили відштовхування. Цьому відповідає найстійкіше розміщення взаємодіючих молекул. При $r > r_0$ сила притягання перевищує силу відштовхування, при $r < r_0$ – навпаки.

Оскільки сили притягання і відштовхування діють одночасно, то можна визначити їх рівнодійну, яка характеризує силу

взаємодії між молекулами. Крива, яка характеризує силу взаємодії, дає можливість якісно пояснити виникнення сил пружності в процесі стискання і розтягання тіл. У разі стискання частинки твердого тіла зближуються. На відстані, меншій від r_0 , виникає сила, яка перешкоджає зближенню частинок і прагне повернути частинки в початкове положення. Якщо тверде тіло розтягують, то частинки віддаляються одна від одної на відстань $r > r_0$; при цьому починають діяти сили притягання між частинками, які прагнуть повернути частинки у вихідне положення ($r = r_0$).

Залежність енергії взаємодії від відстані між молекулами

Атоми і молекули взаємодіють і, отже, мають потенціальну енергію, яку позначають через E_n .

Встановимо орієнтовний характер залежності потенціальної енергії взаємодії молекул від відстані між ними.

Вважають, що потенціальна енергія при відштовхуванні молекул додатна, при притяганні – від'ємна.

Потенціальну енергію тяжіючих тіл, що лежать на нескінченній відстані одне від одного, умовились вважати такою, що дорівнює нулю. При зближенні молекул (рис. 4.3) потенціальна енергія їх зменшуватиметься і досягне мінімального значення при $r = r_0$ ($F = 0$). Далше зближення молекул можливе лише за рахунок роботи, яка виконується проти сил відштовхування. При цьому потенціальна енергія молекул почне різко зростати. Таким чином, потенціальна енергія взаємодії молекул має мінімум при $r = r_0$.

* Точно кажучи, під F_r розуміють проекцію сили на напрям вектора r , який визначає відстань між центрами молекул.

Отже, положення стійкої рівноваги відповідає мінімуму потенціальної енергії взаємодії молекул.

Графік залежності потенціальної енергії взаємодії молекул від відстані між ними називають потенціальною кривою; ділянку ABC – потенціальною ямою: $E_{n \min}$ – глибиною потенціальної ями; σ – ефективним діаметром молекули, що визначає розміри тієї області, в яку інша молекула проникнути не може.

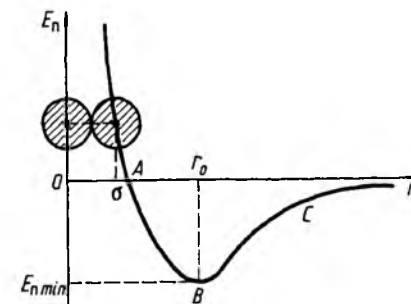


Рис. 4.3

Як правило, міжмолекулярна взаємодія описується потенціальною енергією взаємодії, бо саме середня потенціальна енергія взаємодії визначає стан і багато властивостей речовини. Атоми і молекули перебувають у русі і, отже, мають певну кінетичну енергію.

Співвідношення між мінімальною потенціальною енергією $E_{n \min}$ і середньою кінетичною енергією $\langle E_k \rangle$ хаотичного теплового руху визначає можливість існування того чи іншого агрегатного стану речовини: газоподібного, твердого і рідкого:

- 1) якщо $\langle E_k \rangle \gg E_{n \min}$, то речовина перебуває в газоподібному стані;
- 2) якщо $\langle E_k \rangle \ll E_{n \min}$, то речовина перебуває у твердому стані;
- 3) якщо $\langle E_k \rangle \approx E_{n \min}$, то речовина перебуває в рідкому стані.

§ 39. Про будову газоподібних, рідких і твердих тіл

Гази

Характер теплового руху молекул і атомів залежить від агрегатного стану речовини і визначається силами молекулярної взаємодії. Речовина може бути в чотирьох агрегатних станах: твердому, рідкому, газоподібному і плазмовому. Основні властивості речовини, яка перебуває в певному агрегатному стані, якісно пояснює молекулярно-кінетична теорія.

Частинки газу не зв'язані молекулярними силами притягання і рухаються вільно, рівномірно заповнюючи весь наданий їм об'єм. У газах за нормальних умов молекули перебувають на відстанях, які в багато разів перевищують розміри самих молекул. Молекули газу рухаються зі

швидкостями порядку кількох сотень метрів за секунду. Вони взаємодіють одна з одною тільки при співударянні. Тиск усередині газу і на стінки посудини, де він розміщений, створюється зіткненнями молекул однієї з одною і зі стінками посудини. У процесі зіткнень передається імпульс, який зумовлює тиск газу. Внаслідок того що сил молекулярної взаємодії практично немає, гази можуть легко стискатися і необмежено розширюватись.

Рідини

Це агрегатний стан речовини, в якій спостерігається впорядковане відносне розміщення сусідніх частинок. Молекули рідини здійснюють коливальний рух навколо певних положень рівноваги. Ці коливання можливі тому, що між молекулами рідини є свослідний “вільний” простір.

Радянський фізик-теоретик Я. І. Френкель розробив теорію, за якою час “осілого життя” частинки, тобто час коливання навколо положення рівноваги, дуже малий, порядку $10^{-10} - 10^{-12}$ с, після чого частинка переходить у нове положення рівноваги і, отже, переміщується всередині рідини. З підвищенням температури час “осілого життя” молекул рідини зменшується. Основна властивість рідини – текучість. Під дією зовнішньої сили в рідині стрибки частинок з одного “осілого положення” в інше набирають напрямку дії сили. Ось чому рідина тече і набуває форми посудини, в яку її налили.

Тверді тіла

Вони відрізняються від двох попередніх агрегатних станів речовини сталістю форми і об’єму. У твердих тілах атоми або молекули жорстко зв’язані одні з одними, утворюючи просторові кристалічні ґрати, впорядковане розміщення частинок, яке періодично повторюється в просторі. Сили взаємодії (сили притягання) такі великі, що частинки твердого тіла не можуть віддалитись від своїх “сусідів” на скільки-небудь значну відстань. Тепловий рух частинок у твердих тілах є хаотичним коливанням відносно їх положень рівноваги. У кристалах положеннями рівноваги є вузли кристалічних ґрат, тобто точки, які відповідають найстійкішому положенню частинок твердого тіла.

Розміщення частинок у кристалічних ґратах зумовлює форму і властивості кристалів. Поряд з твердими тілами в природі є й аморфні тіла, які

не мають кристалічних ґрат. Прикладом аморфних тіл можуть бути пластикін, скло, смола та інші речовини. Аморфний стан – це нестійкий стан, який з часом переходить у кристалічний. Докладніше про аморфні тіла йдеться далі.

Плазма

Це ще один агрегатний стан речовини. Плазма – це газ, в якому є безліч позитивно і негативно заряджених іонів, а також вільних електронів*, її можна добути внаслідок нагрівання речовини до дуже високих температур (понад 10 000 К). За цих умов речовина перебуває в газоподібному стані, причому внаслідок теплових зіткнень майже всі атоми перетворюються в іони. Такі умови існують на Сонці та інших зорях, де температура досягає порядку $15 \cdot 10^6$ К і більше.

§ 40. Швидкості руху молекул та їх вимірювання

Дослід Штерна

Метод визначення швидкостей молекул запропонував О. Штерн (1920). Швидкість молекул було виміряно на установці, схему якої подано на рис. 4.4. Установа складається з двох концентричних циліндрів *A* і *B*, які мають різні діаметри і спільну вісь. Повітря з циліндрів відкачано. У циліндрі *A* є вузька щілина *C*. Уздовж осі натягнуто платиновий дріт *P*, вкритий шаром срібла, по якому пропускають електричний струм. Від нагрівання дроту срібло випаровується, атоми його вилітають крізь щілину *C* і потрапляють на внутрішню поверхню циліндра *B*. Якщо обидва циліндри нерухомі, то всі атоми срібла, незалежно від їхньої швидкості, потрапляють в ту саму точку *D* циліндра *B*. Якщо обидва циліндри одночасно обертають з кутовою швидкістю ω , атом срібла залежно від швидкості потрапить в іншу точку на стінці циліндра *B*, наприклад у точку *D'*, бо за час пролітання атомів від дроту *P* до стінки циліндра *B* встигає трохи повернутись. Знаючи від-

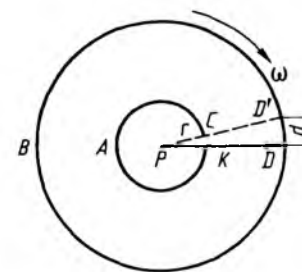


Рис. 4.4

* Сумарний заряд електронів та іонів у кожному елементарному об’ємі дорівнює (або майже дорівнює) нулю.

стані d , на які змістились сліди атомів відносно їхніх слідів при нерухомих циліндрах, кутову швидкість обертання циліндрів, радіуси зовнішнього R і внутрішнього r циліндрів, легко обчислити швидкість молекули. Справді, якщо швидкість зовнішнього циліндра u , а час пролітання молекули від внутрішнього циліндра до зовнішнього t , то відстань на поверхні циліндра $d = ut = \omega Rt$, а швидкість молекули $v = (R-r)/t$. Виключивши з обох рівнянь t , дістанемо

$$v = \omega R(R-r)/d. \quad (4.4)$$

Під час досліду було визначено, що середня швидкість атомів срібла дорівнює 650 м/с. Характерно, що шар срібла на зовнішньому циліндрі розмився. Це означає, що швидкості руху атомів різні.

Розподіл молекул за швидкостями

Закон розподілу швидкостей молекул у газі відкрив Дж. Максвелл. Через складність закону тут подано тільки його графічне зображення (рис. 4.5). По осі ординат відкладено функцію розподілу $f(v) = \Delta n / (n \Delta v)$, де n – загальна кількість молекул, Δn – кількість молекул, які мають швидкості в інтервалі від v до $v + \Delta v$, а по осі абсцис – швидкість молекул. Площа заштрихованої смуги з основою Δv показує, яка частина загальної кількості молекул має швидкості, що лежать у цьому інтервалі. Максимум кривої розподілу, поданої на рис. 4.5, відповідає найімовірнішій швидкості v_i . Більшість молекул газу рухається з найімовірнішою швидкістю, тоді як кількість молекул, що мають дуже малі і дуже великі швидкості, мала. Крім найбільш імовірної швидкості v_i , рух молекул газу характеризується:

а) середньою арифметичною швидкістю

$$\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}, \quad (4.5)$$

яка є середнім арифметичним із значень швидкостей усіх молекул;

б) середньою квадратичною швидкістю

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v_{\text{кв}}^2 \rangle} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n}}, \quad (4.6)$$

яка дорівнює кореню квадратному із суми квадратів швидкостей усіх n молекул газу, поділену на їх кількість.

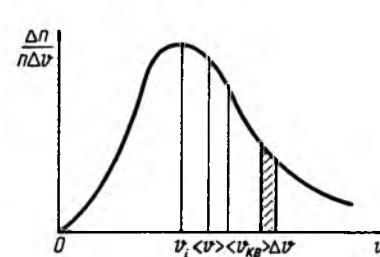


Рис. 4.5

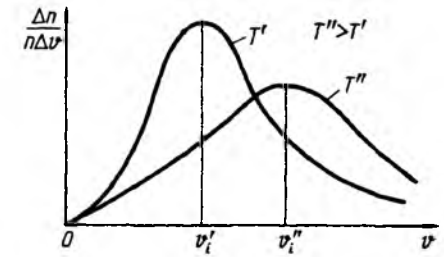


Рис. 4.6

Якщо всі молекули однакові за масою, то

$$v_i < \langle v \rangle < \langle v_{\text{кв}} \rangle. \quad (4.7)$$

З підвищенням температури найімовірніша швидкість зростає, максимум розподілу молекул за швидкостями зсувається в бік більших швидкостей (рис. 4.6). З підвищенням температури збільшується відносна кількість молекул, які мають більші швидкості.

§ 41. Ідеальний газ. Тиск газу

Параметри стану ідеального газу

У молекулярній фізиці і термодинаміці розглядаються системи, які складаються з безлічі частинок, тобто макроскопічні системи. Для однієї частинки окремо не можна визначити її координату і напрям руху, температуру і тиск. Вимірними є тільки *параметри стану* сукупності молекул, тобто макроскопічні характеристики.

З'ясуємо спочатку, яким закономірностям підпорядковується поведіння речовини, що перебуває в газоподібному стані. При цьому розглядатимемо ідеалізовану модель реальних газів – ідеальний газ. *Ідеальним називають такий газ, для якого можна знехтувати розмірами молекул та силами молекулярної взаємодії; молекули в такому газі співударяються за законом співударяння пружних куль.*

Реальні гази поведуть себе як ідеальний тоді, коли середня відстань між молекулами в багато разів перевищує їхні розміри, тобто при досить великих розрідженнях.

Стан деякої маси газоподібної речовини характеризують залежними одна від одної фізичними величинами, які називають *параметрами стану*. До них належать об'єм V , тиск p і температура T .

Об'єм газу завжди збігається з об'ємом тієї посудини, яку він займає.

Одиниця об'єму в СІ – кубічний метр (м^3).

Тиск газу

Тиск – це фізична величина, яка дорівнює відношенню сили F , що діє на елемент поверхні нормально до неї, до площі S цього елемента:

$$p = \frac{F}{S}. \quad (4.8)$$

Одиниця тиску в СІ – паскаль ($1 \cdot \text{Н} / \text{м}^2 = 1 \text{ Па}$).

Досі вживають позасистемні одиниці тиску: *технічну атмосферу* $1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$; *фізичну атмосферу* $1 \text{ атм} = 1,031 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ Па}$; $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1013 \text{ ГПа}$.

Як виникає тиск газу? Кожна молекула газу, вдаряючись об стінку посудини, в якій вона міститься, протягом малого проміжку часу діє на стінку з певною силою. Внаслідок безладних ударянь об стінку сила з боку всіх молекул на одиницю площі стінки швидко змінюється з часом відносно деякої (середньої) величини. Прилади, якими вимірюють тиск, називають *манометрами* (рис. 4.7, а – г). Манометри фіксують середню за часом силу тиску, що припадає на одиницю площі його чутливого елемента (мембрани) або іншого приймача тиску.

На рис. 4.7, а зображено схему будови *металевого манометра* для вимірювання великих тисків. Основною його частиною є зігнута трубка А, відкритий кінець якої припаяний до трубки В, а закритий – з'єднаний із стрілкою. Газ надходить через кран К і трубку В у трубку А і розгинає її. Вільний кінець трубки А, переміщуючись, надає рух передавальному механізму і стрілці. Шкалу проградуїровано в певних одиницях тиску: або в паскалях, або в технічних атмосферах, або в міліметрах ртутного стовпа.

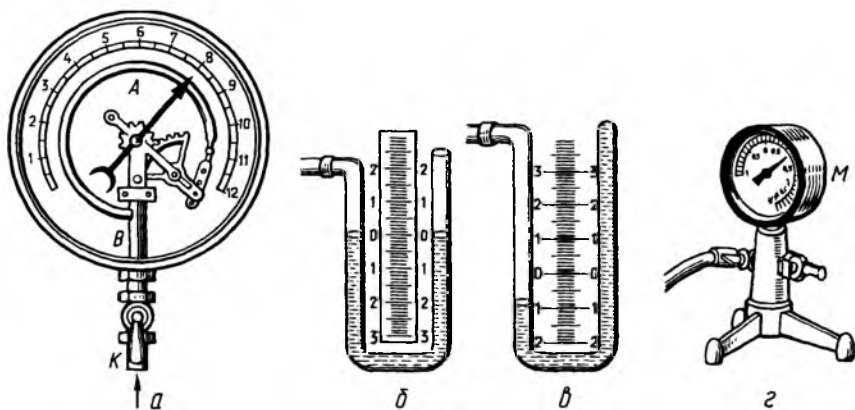


Рис. 4.7

На рис. 4.7, б, в зображено схеми рідинних манометрів: відкритого (рис. 4.7, б) для вимірювання невеликих тисків, вищих від атмосферного, і закритого (рис. 4.7, в) – також для вимірювання тисків, нижчих від атмосферного, тобто невеликого вакууму.

Фізичний зміст поняття температури розкриватиметься в міру вивчення молекулярно-кінетичної теорії газів і основ термодинаміки.

Параметри V, p, T пов'язує однозначне співвідношення. У загальному вигляді це рівняння стану. Для простих систем його можна записати так: $f(p, V, T) = 0$. За допомогою рівняння стану за двома параметрами можна завжди визначити третій.

§ 42. Середня довжина вільного пробігу молекул у газі

Середня довжина вільного пробігу молекул

Середні швидкості молекул газу дуже великі. Вони становлять сотні і навіть тисячі метрів за секунду. Але, здійснюючи безладний рух, молекули газу за нормальних умов зазнають безліч співударів протягом 1 с, і відстані, які вони проходять від однієї точки до другої, набагато більші за переміщення L . Припустимо, що молекула рухається від точки А до точки В (рис. 4.8). Її траєкторія внаслідок співударів цієї молекули з іншими молекулами є ламаною лінією. Точно простежити за траєкторією частинки, яка прийшла з точки А в точку В, не можна, тому реальне зміщення молекули в газі оцінюють швидкістю дифузії: відношенням її переміщення L з А у В до часу, за який відбулося це переміщення. Швидкість дифузії молекули значно менша за середню швидкість її молекулярного руху.

Щоб оцінити швидкості дифузії молекул, вводять поняття *середньої довжини вільного пробігу* $\langle \lambda \rangle$. Це такий шлях, який проходить молекула, не зазнавши співударів.

Припустимо, що в одиничному об'ємі міститься n_0 молекул, кожна з яких можна зобразити у вигляді кульки з радіусом r (рис. 4.9). Вважатимемо, що

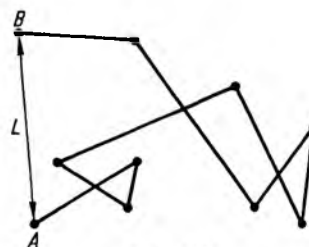


Рис. 4.8

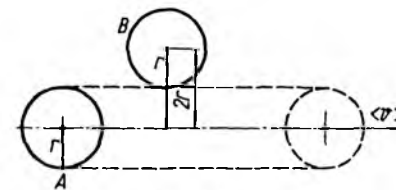


Рис. 4.9

траєкторія цієї молекули A прямолінійна (хоч насправді це й не так), а всі молекули, які зустрічаються на її шляху, нерухомі. На своєму шляху молекула A кілька разів зіткнеться з іншими молекулами, наприклад з B , центри яких лежать не далі ніж на $2r$ від траєкторії її руху. Отже, можна припустити, що область, в якій дана молекула взаємодіє з іншими, – це циліндр радіуса $2r$.

За 1 с рухома молекула зіткнеться з тими молекулами, що є всередині циліндра, і пройде шлях, який чисельно дорівнює її швидкості $\langle v \rangle$. Об'єм такого циліндра $V = 4\pi r^2 \langle v \rangle$, а середня кількість зіткнень молекули A з молекулами, які є в об'ємі циліндра, дорівнює

$$\langle z \rangle = 4\pi r^2 \langle v \rangle n_0. \quad (4.9)$$

Визначаючи $\langle z \rangle$ за формулою (4.9), ми виходимо з того, що всі молекули, крім однієї, нерухомі, а насправді всі молекули перебувають у хаотичному русі. Тому у формулу (4.9) вводять поправочний коефіцієнт $\sqrt{2}$, який показує, що реально зіткнень буде більше:

$$\langle z \rangle = 4\sqrt{2}\pi r^2 \langle v \rangle n_0, \quad (4.10)$$

де n_0 – кількість молекул в одиниці об'єму (концентрація молекул).

Середня довжина вільного пробігу молекули дорівнює відношенню шляху, пройденого молекулою за 1 с, до кількості зіткнень, які відбулися за цей час:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 n_0}. \quad (4.11)$$

З виразу (4.11) випливає, що $\langle \lambda \rangle$ не залежить від температури газу, оскільки з підвищенням температури зростають швидкість $\langle v \rangle$ і кількість зіткнень $\langle z \rangle$. Для певного газу при незмінній температурі середня довжина вільного пробігу обернено пропорційна тиску газу.

Ефективний діаметр молекули

Взаємодіючи, молекули можуть зближуватись до деякої найменшої відстані $d_{\text{еф}}$, яку називають ефективним діаметром молекули. Якщо припустити, що $d_{\text{еф}} = 2r$, то з (4.11) маємо

$$d_{\text{еф}}^2 = \frac{1}{\sqrt{2}\pi \langle \lambda \rangle n_0}. \quad (4.12)$$

Формули (4.11) і (4.12) можна використати для обчислення ефективного діаметра молекули газів, довжини вільного пробігу і концентрації молекул.

§ 43. Поняття про вакуум. Міжзоряний газ

Поняття про вакуум

Стан газу, при якому середня довжина вільного пробігу молекул $\langle \lambda \rangle$ порівнянна з розмірами l посудини, в якій міститься газ, називають *вакуумом*. Розрізняють такі ступені вакууму: надвисокий ($\langle \lambda \rangle \gg l$, тиск $133 \cdot 10^{-2}$ Па і менший); високий ($\langle \lambda \rangle > l$, тиск $133 \cdot 10^{-3}$ Па); середній ($\langle \lambda \rangle \ll l$, тиск $(1 \div 133) \cdot 10^{-3}$ Па); низький ($\langle \lambda \rangle < l$, тиск $(133 \div 1,01) \cdot 10^5$ Па).

Міжзоряний газ

У газових туманностях тиск газу в десятки тисяч разів менший, ніж у надвакуумі. В 1 м³ повітря при нормальному атмосферному тиску міститься порядку 10^{25} молекул, а в газових туманностях – порядку $10^6 - 10^8$.

Абсолютного вакууму не існує.

“Пустота” міжзоряного простору відносна. Цей простір наповнений не тільки полями тяжіння, електромагнітними, а й найдрібнішими пилинками, молекулами і атомами газу – *міжзоряним газом*. Цей газ було виявлено по лініях поглинання у спектрах зір. Радіоастрономія дає можливість виявити цей невидимий для ока газ за радіохвилями, які він випромінює.

Найвищий вакуум, досягнутий в лабораторних умовах, – це розріджений газ, що має тиск 10^{-11} мм рт. ст. ($\approx 10^{-9}$ Па).

§ 44. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів

Тиск виникає внаслідок ударів молекул об стінки посудин. Розглянемо поведження однієї довільно взятої молекули i ідеального газу, що є в посудині, яка має форму куба (рис. 4.10). Нехай v_i – її швидкість, напрямлена перпендикулярно до стінки посудини, а m_i – маса. Під час пружного удару молекула надасть стінці імпульс $m_i v_i$, після удару її імпульс дорівнюватиме $-m_i v_i$. Отже, імпульс молекули зміниться на $m_i v_i - (-m_i v_i) = 2m_i v_i$. За другим законом Ньютона,

$$F_i t_i = 2m_i v_i. \quad (4.13)$$

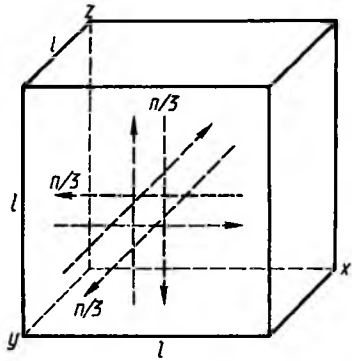


Рис. 4.10

Якщо в кубі, довжина ребра якого дорівнює l , є n молекул, то внаслідок безладного руху молекул і рівномірності всіх напрямів можна вважати, що $n/3$ молекул рухається вздовж осі x , $n/3$ – уздовж осі y , $n/3$ молекул – уздовж осі z . Щоб знайти середню силу тиску газу, треба обчислити суму імпульсів усіх молекул об стінку за певний час. Від удару до наступного удару об ту саму грань молекула проходить шлях, який в середньому дорівнює $2l$. Час, який минув між цими уда-

рами, дорівнює $t_i = 2l/v_i$. Визначимо тепер середню силу, з якою на одну із стінок посудини діє одна молекула. У рівняння (4.13) підставимо час t_i між двома ударами $F_i = (2l/v_i)$, звідки

$$F_i = \frac{2m_i v_i^2}{2l}, \text{ або } F_i = \frac{m_i v_i^2}{l}.$$

Молекули газу рухаються з різними швидкостями ($v_1, \dots, v_i, \dots, v_n$); отже, вони надають стінці посудини й різних імпульсів. Візьмемо який-небудь один напрям руху молекул (наприклад, уздовж осі x). Між двома протилежними гранями куба в цьому напрямі рухається $n/3$ усіх молекул, і сумарна сила ударів об одну грань

$$F = \frac{1}{3} \left(\frac{m_1 v_1^2}{l} + \frac{m_2 v_2^2}{l} + \dots + \frac{m_n v_n^2}{l} \right).$$

В ідеальному газі $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$, тому

$$F = \frac{1}{3} \frac{m}{l} (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2). \quad (4.14)$$

Помноживши і поділивши праву частину рівності (4.14) на n , дістанемо

$$F = \frac{1}{3} \frac{mn}{l} \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n} \right).$$

Вираз, який стоїть у дужках, є квадратом середньої квадратичної швидкості руху молекул $\langle v_{\text{кв}}^2 \rangle$. Отже,

$$F = \frac{1}{3} \frac{mn}{l} \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle,$$

де $F = pS$.

У нашому випадку $S = l^2$, отже,

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{l^2} = \frac{mn \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle}{3l^3}, \quad (4.15)$$

де $n/l^3 = n/v = n_0$. Тоді

$$p = \frac{1}{3} n_0 m \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle. \quad (4.16)$$

Це основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії.

Воно визначає макроскопічну величину – тиск газу через концентрацію n_0 молекул, масу m окремих молекул і середню квадратичну швидкість $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ їхнього руху.

Якщо через $\langle E \rangle = m \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle / 2$ позначити середню кінетичну енергію поступального руху деякої “середньої” молекули, то рівняння (4.16) можна записати у вигляді

$$p = \frac{2}{3} n_0 \langle E \rangle. \quad (4.17)$$

Тиск газу дорівнює $2/3$ середньої кінетичної енергії поступального руху всіх молекул, які містяться в одиничному об’ємі газу.

§ 45. Температура та її вимірювання

Теплова рівновага

Поняття температури – одне з найважливіших у молекулярній фізиці. Навіть без спеціальних приладів людина розрізняє тепло і холод, більш нагріті і менш нагріті тіла. *Ступінь нагрятості тіл характеризують температурою.* Таке означення поняття температури має лише якісний характер. Щоб дати кількісне означення температури, треба ввести поняття теплової рівноваги. Пояснимо його на прикладі. Якщо покласти нагрітий метал на лід, то лід почне танути, а метал – охолоджуватись доти, доки температури тіл не стануть однаковими.

При контакті два тіла обмінюються теплотою (відбувається теплообмін), внаслідок чого енергія металу зменшується, а енергія льоду (при таненні) – збільшується.

Тепер візьмемо кілька тіл (систему тіл): нагріте залізо (тіло A), воду при кімнатній температурі (тіло B) і лід (тіло B). Введемо умовний запис, який показує, як у процесі теплообміну між цими тілами змінюється енергія тіл:

$$A \rightarrow B \rightarrow B.$$

Напрямок стрілок показує, від якого тіла й до якого передається енергія в процесі теплообміну. Енергія при цьому завжди передається від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою. Нарешті, настає стан системи тіл, при якому теплообміну між тілами системи не буде. Такий стан називають *тепловою рівновагою*.

Тіла в тепловій рівновазі мають однакові температури.

Якщо система тіл перебуває в стані теплової рівноваги, то об'єм, температура її частин та інші характеристики стану не змінюються з часом. Властивість температури визначати напрям теплового обміну між тілами – найважливіша в термодинаміці.

Вимірювання температури

Із зміною температури змінюються розміри тіл, їх об'єми, електричний опір та інші властивості. Взагалі, більшість усіх фізичних і хімічних явищ залежить від температури. Отже, температуру можна визначити за зміною якої-небудь зручної для вимірювання фізичної властивості певної речовини.

Щоб однозначно визначити температуру, треба взяти термометричне тіло і температурний параметр.

За термометричне тіло для певних інтервалів температур можна взяти газ (наприклад, водень) або рідину (ртуть, спирт). Температурним параметром у них є об'єм, можуть бути електричний опір деяких напівпровідників і провідників, інтенсивність випромінювання тощо.

Температурний параметр має змінюватись з температурою безперервно і монотонно, тобто він не повинен мати однакових значень при різних температурах.

Найчастіше для вимірювання температур використовують властивість рідини змінювати об'єм від нагрівання (або охолодження). Прилад, за допомогою якого вимірюють температуру, називається *термометром*.

Звичайний рідинний термометр (рис. 4.11) складається з невеликого скляного резервуара, до якого приєднано скляну трубку з вузьким внут-

рішнім каналом. Резервуар і частину трубки наповнено ртуттю. Температуру середовища, в яке занурено термометр, визначають за положенням верхнього рівня ртуті в трубці. Поділки на шкалі домовились наносити в такий спосіб. Цифру 0 ставлять на тому місці шкали, де встановлюється рівень стовпчика рідини, коли термометр опущено в сніг (лід), який тоне, цифру 100 – в тому місці, де встановлюється рівень стовпчика рідини, коли термометр занурений у пару води, яка кипить при нормальному тиску (10^5 Па). Відстань між цими позначками ділять на 100 однакових частин, які називають *градусами*. Такий спосіб поділу шкали запровадив А. Цельсій. Градус за шкалою Цельсія позначають $^{\circ}\text{C}$.

Ртутні термометри застосовують для вимірювання температури в межах від -30 до $+800$ $^{\circ}\text{C}$. Поряд з рідинними ртутними і спиртовими термометрами застосовують електричні (термоелементи або термометри опору), газові термометри тощо. Показання термометрів, у яких використано різні термометричні тіла, як правило, трохи відрізняються один від одного. Щоб досягти більшої точності, вводять також ряд інших сталих температурних точок, наприклад температури затверднення різних чистих речовин (олова, свинцю, золота, міді). Але точне визначення температури не повинно залежати від речовини, яка заповнює термометр. З цією метою вводять термодинамічну шкалу температур.



Рис. 4.11

§ 46. Газові закони

Ізотермічний процес. Закон Бойля – Маріотта

Усяку зміну стану тіла називають термодинамічним процесом.

У будь-якому термодинамічному процесі змінюються параметри, які визначають стан тіла.

Немає жодного процесу, під час якого змінювався б тільки один параметр. Зміна одного параметра веде до зміни решти. *Процес, в якому один з параметрів сталий, а два інші змінюються, називають ізопроцесом.*

Процес, який відбувається в газі при сталій температурі, називається ізотермічним ("ізос" – рівний; "термос" – теплий).

Майже одночасно в XVII ст. французький учений Е. Маріотт і англійський учений Р. Бойль встановили залежність тиску від об'єму при сталій температурі:

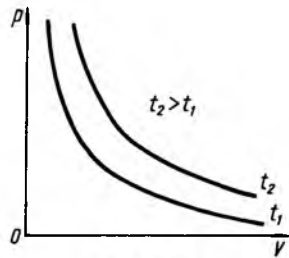


Рис. 4.12

тиск газу певної маси ($m = \text{const}$) при сталій температурі змінюється обернено пропорційно його об'єму (закон Бойля – Маріотта).

Цей закон можна сформулювати інакше – добуток тиску газу на об'єм для певної маси газу є величиною сталою:

$$pV = \text{const}. \quad (4.18)$$

Графічно цей закон в координатах pV виражається лінією, яку називають *ізотермою* (рис. 4.12). Для тієї самої маси газу різні ізотерми відповідають процесам, які відбуваються при різних температурах.

Ізобарний процес. Закон Гей-Люссака

Процес, який відбувається в газі при сталому тиску, називається *ізобарним* (“барос” – важкий).

Залежність об'єму газу від його температури при сталому тиску встановив французький фізик і хімік Ж. Гей-Люссак (1802).

Проведені ним досліди показали, що збільшення об'єму газу пропорційне приросту температури.

Об'єм газу певної маси при сталому тиску зростає лінійно із збільшенням температури (закон Гей-Люссака):

$$V = V_0(1 + \alpha t). \quad (4.19)$$

Тут V – об'єм газу при температурі $t, ^\circ\text{C}$; V_0 – його об'єм при $0 ^\circ\text{C}$. Величину α називають *температурним коефіцієнтом об'ємного розширення* (для всіх газів $\alpha = 1/273 ^\circ\text{C}$). Отже,

$$V = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right). \quad (4.20)$$

Графічна залежність об'єму від температури зображується прямою лінією – *ізобарою* (рис. 4.13). Якщо температури дуже низькі (близькі до $-273 ^\circ\text{C}$), то закон Гей-Люссака не виконується, тому суцільну лінію на графіку замінено штриховою.

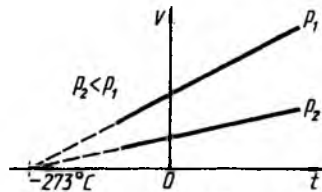


Рис. 4.13

§ 47. Абсолютний нуль температури. Термодинамічна шкала температур

Закон Шарля

Процес, який відбувається в газі при сталому об'ємі, називається *ізохорним* (“хорема” – місткість).

Залежність тиску певної маси газу від температури при сталому об'ємі вперше дослідив у 1787 р. французький фізик Ж. Шарль. Він встановив, що тиск газу певної маси при сталому об'ємі зростає лінійно із збільшенням температури (закон Шарля):

$$p = p_0(1 + \gamma t). \quad (4.21)$$

Тут p – тиск газу при температурі $t, ^\circ\text{C}$; p_0 – його тиск при $0 ^\circ\text{C}$. Величину γ називають *температурним коефіцієнтом тиску*. Його значення не залежить від природи газу; для всіх газів $\gamma = 1/273 ^\circ\text{C}^{-1}$. Отже,

$$p = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right). \quad (4.22)$$

Графічна залежність тиску від температури зображується прямою лінією – *ізохорою* (рис. 4.14).

Абсолютний нуль температури. Якщо ізохору (4.14) продовжити в область мінусових температур, то в точці перетину з віссю абсцис маємо

$$p = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right) = 0.$$

Звідси $t = -273 ^\circ\text{C}$ (точніше, $-273,16^\circ\text{C}$), що відповідає нулю за термодинамічною шкалою. Цю температуру називають *нулем Кельвіна* (або *абсолютним нулем*).

Термодинамічну шкалу температур запропонував англійський учений У. Кельвін. За початок відліку на цій шкалі взято температуру нуль Кельвіна (0 К). Нуль Кельвіна – це гранична температура, при якій тиск ідеального газу дорівнює нулю. Температури, нижчої від 0 К, не може бути; 0 К – найнижча температура в природі. Існування її передбачив М. В. Ломоносов.

За одиницю температури за термодинамічною шкалою взято *кельвін* (К); 1 К відповідає $1 ^\circ\text{C}$.

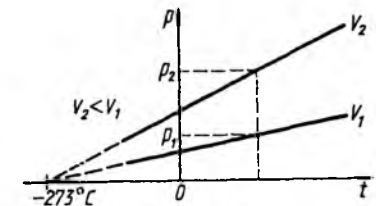


Рис. 4.14

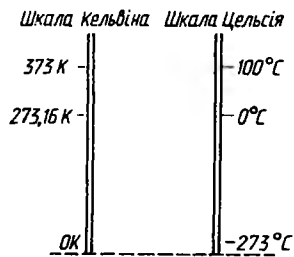


Рис. 4.15

Температуру, відлічену за термодинамічною шкалою температур, позначають T . Її називають *термодинамічною температурою*. Оскільки точка танення льоду при нормальному атмосферному тиску, взята за 0°C , дорівнює $273,16\text{ K}$ (рис. 4.15), то можна записати:

$$T = 273,16 + t. \quad (4.23)$$

Замінімо тепер у рівнянні (4.20) температуру, відлічену за шкалою Цельсія, термодинамічною температурою:

$$V = V_0 \left(1 + \frac{1}{273,16} t \right) = V_0 \left(\frac{273,16 + t}{273,16} \right) = V_0 \frac{T}{273,16}.$$

Позначивши через V_1 і V_2 об'єми газу при температурах T_1 і T_2 , запишемо:

$$V_1 = V_0 \frac{T_1}{273,16}, \quad V_2 = V_0 \frac{T_2}{273,16}. \quad (4.24)$$

Поділивши почленно ці рівності, дістанемо для ізобарного процесу

$$V_1 / V_2 = T_1 / T_2, \quad \text{або} \quad V / T = \text{const}. \quad (4.25)$$

Аналогічно дістанемо співвідношення між параметрами, які характеризують ізохорний процес

$$p_1 / p_2 = T_1 / T_2, \quad \text{або} \quad p / T = \text{const}. \quad (4.26)$$

Цими записами законів Гей-Люссака (4.25) і Шарля (4.26) найповніше розкривається їхній фізичний зміст.

Для певної маси газу його об'єм при ізобарному або тиск при ізохорному процесах пропорційні термодинамічній температурі.

Газові закони виконуються з високим ступенем точності для газів при невеликих тисках і не дуже низьких температурах.

§ 48. Рівняння стану ідеального газу.

Молярна газова стала

Рівняння Клапейрона

Розглядаючи ізопроцеси, ми досі вважали, що один з трьох параметрів стану не змінюється. На практиці найчастіше доводиться мати справу з випадками, коли одночасно змінюються всі три параметри стану.

Припустимо, що початковий стан газу при $m = \text{const}$ характеризується параметрами V_1 , p_1 , T_1 , а кінцевий – відповідно V_2 , p_2 і T_2 (рис. 4.16). Нехай з початкового стану в кінцевий газ переходить послідовно. Спочатку змінимо тиск p_1 на p_2 , а температуру T_1 не змінюватимемо. Об'єм, який матиме газ після цього переходу, позначимо V , тоді, за законом Бойля–Маріотта, $p_1 V_1 = p_2 V$, звідки

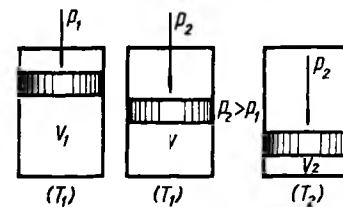


Рис. 4.16

$$V = p_1 V_1 / p_2. \quad (4.27)$$

Тепер при незмінному тиску p_2 зменшимо температуру від T_1 до T_2 , при цьому об'єм зміниться від значення V до V_2 ; отже, за законом Шарля, $V_2 / V = T_2 / T_1$, звідки

$$V_1 = V_2 T_1 / T_2. \quad (4.28)$$

У рівняннях (4.27) і (4.28) однакові ліві частини; отже, однакові й праві, тоді

$$\frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{T_1 V_2}{T_2}, \quad \text{або} \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad (4.29)$$

тобто можна записати, що

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \quad \text{або} \quad pV = \text{const}. \quad (4.30)$$

Вираз (4.30) називається *рівнянням Клапейрона*:

добуток тиску газу певної маси на його об'єм пропорційний термодинамічній температурі.

Рівняння Клапейрона – Менделєєва

Значення сталої в рівнянні (4.30) залежить від маси і молекулярної маси газу, а також від вибору одиниць тиску, об'єму і температури. Обчислимо цю сталу для речовини, взятої в кількості 1 моль. Як впливає з закону Авогадро, 1 моль будь-якого газу при однакових значеннях температури і тиску має однаковий об'єм. При $T = 273\text{ K}$ ($t = 0^\circ\text{C}$) і $p = 1,013 \cdot 10^5\text{ Па}$ 1 моль будь-якого газу має об'єм $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$. Підставивши ці дані в рівняння (4.30), дістанемо значення константи, яка входить до нього, причому для 1 моля будь-якого газу це значення однакове.

Його називають *молярною (універсальною) газовою сталою* (позначають R). Знайдемо числове значення R в СІ:

$$R = \frac{pV_0}{T} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}}{273 \text{ К}} = 8,31 \text{ Дж / (моль} \cdot \text{К)}.$$

Рівняння (1.30) для одного моля газу тепер можна записати так:

$$pV_0 = RT. \quad (4.31)$$

Цей вираз називають *рівнянням Клапейрона – Менделєєва*. З рівняння (4.31) легко дістати рівняння для будь-якої маси газу. Газ масою m займе об'єм $V = V_0 (m/M)$, де M – маса 1 моля, m/M – кількість молів газу.

Помноживши обидві частини рівняння (1.31) на m/M , дістанемо

$$(m/M)V_0 p = (m/M)RT.$$

Але $(m/M)V_0 = V$, отже

$$pV = (m/M)RT. \quad (4.32)$$

Це і є рівняння Клапейрона – Менделєєва для будь-якої маси газу.

Молярна газова стала

Встановимо тепер фізичний зміст молярної газової сталої. Припустимо, що в циліндрі (рис. 4.17) під поршнем при температурі T є 1 моль газу, об'єм якого V . Нагріємо його ізобарно ($p = \text{const}$) на 1 К, при цьому поршень підніметься на висоту Δh , а об'єм газу збільшиться на ΔV . Запишемо рівняння (4.31) для нагрітого газу

$$p(V + \Delta V) = R(T + 1)$$

і віднімемо від цієї рівності рівняння $pV = RT$, яке відповідає стану газу до нагрівання. Дістанемо

$$p\Delta V = R. \quad (4.33)$$

Підставимо в (4.33) значення $\Delta V = S\Delta h$, де S – площа основи циліндра:

$$pS\Delta h = R. \quad (4.34)$$

Але $pS = F$ – сила, а $F\Delta h = A$ – робота по переміщенню поршня, яку виконує ця сила проти зовнішніх сил при розширенні газу. Отже, $R = A$, тобто

молярна газова стала визначається роботою, яку виконує 1 моль газу при ізобарному нагріванні його на 1 К.

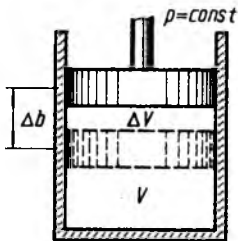


Рис. 4.17

§ 49. Температура – міра середньої кінетичної енергії хаотичного руху молекул

Термодинамічна температура

Перейдемо тепер до найважливіших наслідків, які випливають з основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів.

Візьмемо 1 моль газу, який займає об'єм V . Густина молекул газу $n_0 = N_A/V$, і рівняння (4.17) можна записати у вигляді

$$p = \frac{2}{3} \frac{N_A}{V} \langle E \rangle. \quad (4.35)$$

Але для 1 моля правдивим є рівняння стану $pV = RT$, звідки

$$p = \frac{RT}{V}.$$

Підставивши цей вираз для тиску в рівняння (4.35) і розв'язавши його відносно T або $\langle E \rangle$, дістанемо *перше положення молекулярно-кінетичної теорії*:

$$T = \frac{2}{3} \left(\frac{N_A}{R} \right) \langle E \rangle. \quad (4.36)$$

З рівняння (4.36) випливає, що **термодинамічна температура пропорційна середній кінетичній енергії хаотичного руху молекул газу.**

Стала Больцмана

Отже, чим швидше рухаються молекули, тим вища температура.

З рівняння (4.36), оскільки $\langle E \rangle \frac{2}{3} = \frac{R}{N_A} T$ для будь-якого газу, випливає

друге положення молекулярно-кінетичної теорії газів:

середні кінетичні енергії молекул різних газів при однаковій температурі однакові між собою.

З рівності середніх кінетичних енергій газових молекул випливає, що при перемішуванні різних газів, які мають однакові температури, переважного передавання енергії від молекул одного газу до молекул іншого не відбувається.

Величину $R/N_A = k$ у рівнянні (4.36) назвали *сталою Больцмана*, яка є газовою сталою, віднесеною до однієї молекули:

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}}{6,02 \cdot 10^{-23} \text{ моль}^{-1}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

Отже, вираз (4.36) можна записати у вигляді

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (4.37)$$

Залежність тиску газу від його концентрації і температури

Підставивши (4.37) у (4.34), знайдемо вираз для тиску газу:

$$p = n_0 kT. \quad (4.38)$$

Тиск газу пропорційний добутку кількості молекул в одиниці об'єму на його термодинамічну температуру.

Аналіз рівняння (4.37) показує, що при $T = 0\text{К}$ кінетична енергія поступального руху молекул $E = 0$, а отже, і $v_{\text{кв}} = 0$. Таким чином,

при $T = 0\text{К}$ поступально молекули не рухаються.

Але це не означає, що при $T = 0\text{К}$ припиняється рух взагалі. Зберігаються обертальний і коливальний рухи атомів і молекул. За сучасними уявленнями, при $T = 0\text{К}$ атоми і ще дрібніші частинки мають деяку енергію, яку називають нульовою.

Запишемо тепер формулу (4.37) у такому вигляді:

$$\frac{mv_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

звідки середня квадратична швидкість

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3kT/m}. \quad (4.39)$$

Звідси впливає *третьє положення молекулярно-кінетичної теорії*:

середня квадратична швидкість молекул пропорційна кореню квадратному з термодинамічної температури.

Отже, знаючи температуру газу, можна знайти середню квадратичну швидкість руху молекул. На основі виразу (4.37) можна дати таке означення температури:

термодинамічна температура з точністю до сталого множника $3/2 k$ дорівнює середній кінетичній енергії поступального руху молекули ідеального газу.

§ 50. Рівняння Клапейрона – Менделєєва

Рівняння Клапейрона – Менделєєва

Це рівняння можна вивести, використавши залежність тиску газу від концентрації його молекул і температури (див. (4.38)). Позначивши через n кількість молекул в об'ємі V газу і беручи до уваги, що $n_0 = n/V$, рівняння (4.38) запишемо у вигляді

$$pV = nkT. \quad (4.40)$$

Оскільки n для певної маси газу безпосередньо не вимірюється, то рівнянню (4.40) треба надати зручнішого вигляду. Для цього скористаємось поняттям моля.

Загальна кількість молекул в ν молях молекул дорівнює $n = \nu N_A$. Тому

$$pV = \nu RT, \quad (4.41)$$

де $R = kN_A$ – молярна газова стала.

Рівняння (4.41) називають *рівнянням Клапейрона – Менделєєва*.

При $T = \text{const}$ дістанемо рівняння Бойля – Маріотта, а при $p = \text{const}$ – закон Гей-Люссака.

У багатьох випадках рівняння (4.41) доцільно записувати у вигляді

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Короткі висновки

- Згідно з основним положенням молекулярно-кінетичної теорії:
 1. Усі тіла складаються з найдрібніших частинок – атомів, молекул. Будова будь-якої речовини дискретна.
 2. Атоми і молекули речовини завжди перебувають у безперервному хаотичному русі, який називається тепловим рухом.
 3. Між частинками будь-якої речовини діють сили взаємодії – притягання і відштовхування. Ці сили мають електромагнітну природу.
- Макроскопічні тіла складаються з безлічі молекул, маси яких малі, тому маси молекул і їх кількість виражають у відносних одиницях (відносна молекулярна або атомна маса). Кількість речовини виражають у молях.
- Кількість речовини – це відношення числа N молекул (атомів) у певному макроскопічному тілі до числа $N_A (6,02 \cdot 10^{-23} \text{ моль}^{-1})$ атомів в 0,012 кг вуглецю:

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}.$$

- Броунівський рух – це тепловий рух завислих у рідині (або газі) частинок.
- Агрегатний стан речовини визначається співвідношенням між середньою кінетичною і середньою потенціальною енергією взаємодії молекул: у газів середня кінетична енергія значно більша від абсолютного значення середньої потенціальної енергії взаємодії молекул, у рідин вони приблизно однакові, а в твердих тіл абсолютні значення середньої потенціальної енергії взаємодії молекул значно більші від їх середньої кінетичної енергії.
- Потенціальна енергія взаємодії під час притягання від’ємна.
- Ідеальний газ – це модель реального газу, що складається з молекул, розміри і взаємодія між якими дуже малі. Середня кінетична енергія молекул ідеального газу значно більша за середню потенціальну енергію їх взаємодії.
- Молекулярно-кінетична теорія розглядає тиск газу на стінки посудини, в якій він міститься, як результат ударів молекул об його стінки.
- Тиск газу визначається як $2/3$ середньої кінетичної енергії поступального руху всіх молекул, які містяться в одиничному об’ємі газу:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \langle E \rangle.$$

- Температура – це міра середньої кінетичної енергії хаотичного (теплого) руху молекул:

$$T = \frac{2}{3} \frac{N_A}{R} \langle E \rangle.$$

- У фізиці найбільше поширилась абсолютна шкала температур (шкала Кельвіна). Один кельвін дорівнює градусу за шкалою Цельсія.
- Термодинамічні параметри, які характеризують ідеальний газ, пов’язані між собою рівнянням Клапейрона – Менделєєва

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Це рівняння містить у собі як окремі випадки газові закони:

при $T = \text{const}$ $pV = \text{const}$ – закон Бойля – Маріотта;

при $p = \text{const}$ $\frac{V}{T} = \text{const}$ – закон Гей-Люссака;

при $V = \text{const}$ $\frac{p}{T} = \text{const}$ – закон Шарля.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
2. Що таке молекула? 3. Що таке атом? 4. Дайте поняття мікро- і макросвіту.
5. Що таке відносна молекулярна маса? 6. Що називається кількістю речовини? Яка її одиниця вимірювання? 7. Який фізичний зміст сталої Авогадро? 8. Чим зумовлений броунівський рух? 9. Що таке дифузія? 10. Який характер залежності сил міжмолекулярної взаємодії від

відстані між молекулами? 11. Побудуйте графік залежності потенціальної енергії взаємодії молекул від відстані між ними. 12. Які є агрегатні стани речовини? 13. Якими швидкостями характеризують рух молекул газу? 14. Який газ називають ідеальним? 15. Назвіть параметри стану газу. 16. Що таке тиск газу? Чим він зумовлений? 17. Що розуміють під середньою довжиною вільного пробігу молекул? 18. Дайте поняття вакууму. 19. Напишіть основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів. 20. Що називається термодинамічним процесом? Ізопроцесом? 21. Сформулюйте закони Бойля – Маріотта, Гей-Люссака, Шарля. 22. Яку температуру називають термодинамічною? 23. Який фізичний зміст мають молярна газова стала і стала Больцмана? 24. Який зв’язок між кінетичною енергією поступального руху молекул газу і його термодинамічною температурою? 25. Виведіть рівняння Клапейрона – Менделєєва з основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії.

Приклади розв’язування задач

Задача 1. Визначити середню квадратичну швидкість молекул газу, густина якого при тиску $p = 50$ кПа становить $\rho = 4,1 \cdot 10^{-12}$ кг/м³.

Дано: $p = 5 \cdot 10^4$ Па; $\rho = 4,1 \cdot 10^{-2}$ кг/м³.

Знайти: $\langle v_{\text{кв}} \rangle$.

Розв’язання. За основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії для тиску маємо

$$p = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle n_0,$$

де n_0 – кількість молекул в одиниці об’єму; m – маса молекули.

Добуток $mn_0 = \rho$ – це густина газу. Тоді

$$p = \frac{1}{3} \rho \langle v_{\text{кв}} \rangle; \quad \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3p/\rho}.$$

Обчислення:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3 \cdot 5 \cdot 10^4 \text{ Па}}{4,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}}} = 1910 \text{ м/с}.$$

Задача 2. Яка середня довжина вільного пробігу молекул водню при тиску 1240 мм рт. ст. і $t = 7$ °С?

Дано: $p = 1240 \cdot 133 \text{ Па} = 1,65 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $T = (273 + 7) \text{ К} = 280 \text{ К}$.

Знайти: $\langle \lambda \rangle$.

Розв’язання. Довжину вільного пробігу молекул визначаємо за формулою

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_{\text{сф}}^2 n_0}, \quad (1)$$

де $d_{\text{эф}}$ – ефективний діаметр молекули водню (беремо з таблиці; $d_{\text{эф}} = 2,3 \cdot 10^{-10}$ м); n_0 – кількість молекул газу в одиниці об'єму. З рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів (4.38) $p = n_0 kT$ знаходимо

$$n_0 = p(kT). \quad (2)$$

Підставивши значення (2) у формулу (1), дістанемо

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d_{\text{эф}}^2 p}.$$

Обчислення:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 280 \text{ К}}{\sqrt{2} \cdot 3,14 (2,3 \cdot 10^{-10})^2 \text{ м}^2 \cdot 1,65 \cdot 10^5 \text{ Па}} \approx 10^{-7} \text{ м}.$$

Задача 3. Скільки молів і молекул водню міститься в балоні об'ємом 50 м³ під тиском 767 мм рт. ст. при температурі 18 °С? Яка густина газу?

Дано: $V = 50 \text{ м}^3$; $p = 767 \cdot 1,33 \cdot 10^2 \text{ Па}$; $T = (273 + 18) \text{ К} = 291 \text{ К}$; $M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Знайти: ν , n , ρ .

Розв'язання. З рівняння Клапейрона – Менделєєва

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

де $\nu = m/M$ – кількість молів, які містяться в об'ємі V , масмо

$$\nu = \frac{pV}{RT}.$$

Кількість n молекул, які містяться в даному об'ємі, знаходимо, використавши сталу Авогадро:

$$n = \nu N_A.$$

Густина газу $\rho = m/V$, тоді

$$\rho = pM / (RT).$$

Обчислення:

$$\nu = \frac{767 \cdot 1,33 \cdot 10^2 \text{ Па} \cdot 50 \text{ м}^3}{8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 291 \text{ К}} = 2120 \text{ К};$$

$$n = 2,12 \cdot 10^3 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 12,76 \cdot 10^{26};$$

$$\rho = \frac{767 \cdot 1,33 \cdot 10^2 \text{ Па} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}}{8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 291 \text{ К}} = 8,44 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3.$$

Задача 4. Яким має бути найменший об'єм балона, щоб він вмщав $m = 6,4$ кг кисню при $t = 20$ °С, якщо його стінки витримують тиск $p = 16$ МПа?

Дано: $m = 6,4$ кг; $M = 3 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $T = (273 + 20) \text{ К} = 293 \text{ К}$; $p = 16 \cdot 10^6$ Па.

Знайти: V .

Розв'язання. З умови задачі випливає, що коли в балон помістити 6,4 кг кисню, то тиск не повинен перевищувати $p = 16 \cdot 10^6$ Па. За рівнянням Клапейрона – Менделєєва

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

звідки

$$V = \frac{m RT}{M p}.$$

Обчислення:

$$V = \frac{6,4 \text{ кг} \cdot 8,3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 293 \text{ К}}{32 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot 16 \cdot 10^6 \text{ Па}} = 30,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Задачі для самостійного розв'язування

- Обчислити масу однієї молекули води.
- Визначити масу атома заліза і молекули вуглекислого газу.
- Скільки молекул газу в посудині місткістю 0,15 м³ за нормальних умов?
- Скільки молів і скільки молекул газу в посудині місткістю 250 см³, якщо тиск газу 566 мм рт. ст., а температура дорівнює 10 °С?
- Чому дорівнює молярна маса газу, якщо він при температурі 27 °С і тиску 2 Па має густину, яка дорівнює 2,6 кг/м³?
- Визначити температуру газу, якщо середня кінетична енергія поступального руху однієї молекули дорівнює $6,9 \cdot 10^{-21}$ Дж.
- Середня кінетична енергія поступального руху окремих молекул газу дорівнює $5 \cdot 10^{-21}$ Дж, число молекул в 1 см³ становить $3 \cdot 10^{19}$. Визначити тиск газу.
- Обчислити сталу Лошмідта, тобто кількість молекул, які містяться в 1 м³ газу за нормальних умов.
- Найімовірніша швидкість молекул кисню при тиску 240 мм рт. ст. становить 160 м/с. Чому дорівнює кількість молекул в 100 см³?
- У восьмилітровому балоні міститься 2 кг газу при тиску $5 \cdot 10^5$ Па. Визначити середню квадратичну, середню арифметичну і найімовірнішу швидкості молекул газу.
- Визначити середню довжину вільного пробігу молекул, якщо у п'ятилітровій посудині міститься 1 г кисню.
- Визначити середню довжину вільного пробігу молекул азоту, якщо густина розрідженого газу дорівнює $1,8 \cdot 10^{-6}$ кг/м³.

ГЛАВА 5

ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

§ 51. Основні поняття й означення

Історично початок розвитку термодинаміки пов'язаний з вивченням коефіцієнта корисної дії теплових машин. Розвиток техніки і повсюдне поширення теплових машин у першій половині XIX ст. настійно потребували розвитку теорії теплових процесів. Проте фізика того часу не могла дати стрункої теорії теплових процесів на основі молекулярних уявлень, тому теорія розвивалась своєрідно. У 1824 р. французький фізик і інженер С. Карно в праці “Роздуми про рушійну силу вогню” сформулював принцип, за яким продуктивність теплової машини залежить не від робочої речовини, а від різниці температур нагрівника і холодильника. Надалі термодинаміка була розвинута в працях Б. Клапейрона, Дж. Джоуля, Р. Клаузіуса, Ю. Майєра, У. Томсона (Кельвіна) та ін.

Термодинаміка належить до феноменологічних теорій фізики, які мають такі загальні риси: 1) вони не розглядають атомної структури матерії; 2) використовують величини, які визначаються тільки для макроскопічної системи; 3) побудова теорії ґрунтується на відомих дослідних даних; 4) властивості речовини визначаються у формі характеристичних параметрів (густина, в'язкість тощо).

Термодинаміка вивчає теплові властивості макроскопічних систем, не використовуючи мікроскопічної будови тіл, які утворюють систему, її побудовано на базі кількох основних принципів – начал термодинаміки, які є узагальненням відомих численних дослідних даних. Властивості речовини теоретично вивчає статистична фізика, яка обґрунтувала закони термодинаміки і визначила межу їх застосування.

Вивчаючи основи термодинаміки, треба пам'ятати такі означення.

Фізична система, що складається з безлічі частинок – атомів і молекул, які здійснюють тепловий рух і, взаємодіючи, обмінюються енергіями, називається термодинамічною системою.

Стан термодинамічної системи визначається *макроскопічними параметрами*, наприклад питомим об'ємом, тиском, температурою.

Термодинаміка розглядає тільки *рівноважні стани, тобто стани, в яких параметри термодинамічної системи не змінюються з часом.*

Термодинамічним процесом називається перехід системи з початкового стану в кінцевий через послідовність проміжних станів. Процеси бувають оборотні і необоротні.

Оборотним називається такий процес, при якому можна здійснити оборотний перехід системи з кінцевого стану в початковий через ті самі проміжні стани, щоб у навколишніх тілах не сталося жодних змін. Обо-

ротний процес – фізична абстракція. Прикладом процесу, який наближається до оборотного, є коливання важкого маятника на довгому підвісі. У цьому разі кінетична енергія практично повністю перетворюється в потенціальну, і навпаки. Коливання внаслідок малих опору середовища та сил тертя відбуваються довго без помітного зменшення амплітуди.

Будь-який процес, що супроводиться тертям або теплопередаванням від нагрітого тіла до холодного, необоротний. Прикладом необоротного процесу є розширення газу, навіть ідеального, в пустоту. Розширюючись, газ не долає опору середовища, не виконує роботи, але для того, щоб знову зібрати всі молекули газу в попередній об'єм, тобто привести газ у початковий стан, треба затратити роботу. Отже, всі реальні процеси необоротні.

§ 52. Внутрішня енергія системи

Термодинамічна система як сукупність множини атомів і молекул має внутрішню енергію U . *Внутрішня енергія – це сума енергій молекулярних взаємодій і енергії теплового руху молекул.*

Внутрішня енергія системи залежить тільки від її стану і є однозначною функцією стану.

Зміна стану системи характеризується параметрами стану p, V, T . Тому самому стану системи відповідає певне значення внутрішньої енергії U . Від нагрівання газу збільшується швидкість руху молекул і атомів, що веде до збільшення внутрішньої енергії; отже, внутрішня енергія залежить від температури. Якщо змінюється тиск або питомий об'єм, то змінюються міжмолекулярні відстані, тобто потенціальна енергія взаємодії атомів і молекул також змінюється, а отже, змінюється і внутрішня енергія.

Початком відліку внутрішньої енергії вважають такий стан системи, при якому внутрішня енергія дорівнює нулю. Прийнято вважати, що внутрішня енергія дорівнює нулю при $T = 0$ К. Якщо система переходить з одного стану в інший, то практично нас цікавитиме зміна внутрішньої енергії ΔU , тому вибір початку відліку внутрішньої енергії не має значення.

Оскільки внутрішня енергія системи залежить від характеру взаємодій всіх частинок у системі, то, щоб точно її визначити, треба враховувати також енергію електронів, які рухаються на електронних оболонках атомів та іонів, і внутрішньоядерну енергію. Тому часто для зручності, використовуючи поняття внутрішньої енергії, мають на увазі не всю внутрішню енергію певної системи, а тільки ту її частину, яка істотна для розгляду того чи іншого явища.

Наприклад, частинки тіла перебувають у русі, тобто мають кінетичну енергію. Між частинками діють сили притягання і відштовхування, тобто

частинки мають і потенціальну енергію. Визначити енергію хаотичного руху безлічі частинок, а тим більше врахувати потенціальну енергію кожної з них, не можна. Таким чином, енергії всіх частинок додаються в загальну суму, яка визначає внутрішню енергію тіла. Зрозуміло, що виміряти можна тільки зміну внутрішньої енергії, а не всю енергію тіла.

Поняття енергії завжди стосується системи тіл.

Не можна вважати, що енергію може мати яке-небудь одне тіло або одна частинка без зв'язку з іншими тілами і з іншими частинками. Не можна говорити про потенціальну енергію каменя безвідносно до Землі, неправильно також припускати, що рухомий м'яч або снаряд має кінетичну енергію сам собою, а не відносно якого-небудь тіла. Якщо при цьому не змінюється температура (кінетична енергія частинок), то змінюється потенціальна енергія частинок тіла. Здебільшого одночасно змінюються і кінетична, і потенціальна енергії частинок тіла.

§ 53. Внутрішня енергія ідеального газу

Внутрішня енергія ідеального газу

Газ, який складається з окремих атомів, а не молекул, називається *одноатомним*. До одноатомних газів належать інертні гази – гелій, неон, аргон. У разі ідеальних газів силами взаємодії молекул нехтують, тобто припускають, що їх потенціальна енергія дорівнює нулю, тому внутрішня енергія ідеального газу є кінетичною енергією теплового руху молекул.

У § 49 було показано, що середня кінетична енергія поступального руху молекули (одноатомної) дорівнює $\langle E \rangle = \frac{3}{2}kT$. Визначимо внутрішню енергію ідеального одноатомного газу масою m . Для цього середню енергію одного атома треба помножити на кількість атомів. В 1 молі міститься N_A атомів, у газі масою $m - \nu = m/M$ молів, тому внутрішня енергія ідеального одноатомного газу

$$U = \frac{m}{M} N_A \frac{3}{2} kT,$$

або

$$U = \frac{m}{M} \frac{3}{2} RT, \quad (5.1)$$

бо $kN_A = R$.

Внутрішня енергія ідеального газу пропорційна масі газу і його термодинамічній температурі.

Степені вільності молекули

Молекулу одноатомного газу розглядають як матеріальну точку, бо маса атома зосереджена переважно в ядрі, розміри якого малі. Положення одноатомної молекули в просторі однозначно задають трьома координатами. Кажуть, що одноатомний газ має три степені вільності ($i = 3$). Ця молекула рухається тільки поступально. Оскільки молекула перебуває в хаотичному русі, то всі напрями її руху рівноправні, тобто середня кінетична енергія хаотичного руху молекули рівномірно розподілена між трьома степенями вільності.

На кожний стіпень вільності поступального руху одноатомної молекули припадає однакова кінетична енергія, яка дорівнює $\frac{1}{2}kT$.

Молекула двоатомного газу складається з двох атомів, жорстко зв'язаних між собою. Ці молекули не тільки рухаються поступально, а й обертаються.

Така молекула, крім трьох степенів вільності поступального руху, має два степені вільності обертального руху, тобто $i = 5$. Якщо газ багатоатомний, то $i = 6$.

Внутрішня енергія багатоатомного газу – це кінетична енергія всіх рухів частинок. Усі степені вільності багатоатомної молекули рівноправні, тому вони вносять однаковий вклад у її середню кінетичну енергію:

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT.$$

Внутрішня енергія багатоатомного ідеального газу масою m дорівнює

$$U = \frac{m}{M} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT.$$

§ 54. Робота і теплота

як форми передавання енергії

Способи зміни внутрішньої енергії

Змінити внутрішню енергію тіла можна по-різному. Розглянемо два способи зміни внутрішньої енергії.

1. *Механічний спосіб*. У циліндрі з рухомим поршнем є ідеальний газ (рис. 5.1). Нехай на поршень діє зовнішня сила, яка досить швидко стискає газ і виконує роботу з подолання сил опору газу.

Розглянемо довільно взятую молекулу газу, яка рухається назустріч поршню зі швидкістю v . Якщо поршень рухається зі швидкістю u , то $v + u$ – швидкість молекули відносно поршня. Після пружного удару молекули об

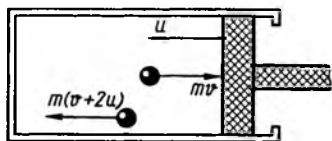


Рис. 5.1

поршень швидкість молекули становитиме $-(v + u)$ відносно поршня і $-(v + 2u)$ відносно циліндра. Таким чином, після удару об поршень швидкість молекули, а отже, і її кінетична енергія зростають, що веде до збільшення внутрішньої енергії газу.

Від стиснення газу його внутрішня енергія збільшується завдяки виконанню поршнем механічної роботи. Якщо газ розширюється, то його внутрішня енергія зменшується, перетворюючись у механічну енергію рухомого поршня.

2. **Теплообмін.** Притиснемо одне до одного два тіла з різними температурами. Нехай температура першого тіла вища, ніж другого.

Внаслідок обміну енергіями температура першого тіла зменшиться, а другого – збільшиться. У цьому прикладі кінетична енергія хаотичного руху молекул першого тіла переходить у кінетичну енергію хаотичного руху молекул другого тіла.

Процес передавання внутрішньої енергії без виконання механічної роботи називається теплообміном. Мірою енергії, яку віддає або одержує тіло в процесі теплообміну, є фізична величина, яку називають кількістю теплоти.

Теплота і робота – це не вид енергії, а форма її передавання, вони існують тільки в процесі передавання енергії.

Ці дві форми передавання енергії – якісно нерівноцінні. У процесі передавання енергії тілу через теплообмін збільшується енергія хаотичного руху атомів або молекул, що веде до зміни внутрішньої енергії тіла.

Якщо над тілом виконується робота, то це веде до збільшення будь-якого виду енергії цього тіла, у тому числі й внутрішньої.

За реальних умов обидва способи передавання енергії системі у формі роботи і у формі теплоти звичайно супроводять один одного.

Як відомо, стиснений газ, розширюючись, охолоджується. У 1807 р. Ж. Гей-Люссак, який вивчав властивості ідеальних газів, поставив дослід. В його експерименті, де ідеальний газ розширювався у вакуум, тобто в посудину, з якої спочатку було відкачано повітря, – температура зовсім не знизилась. Гей-Люссак не зміг пояснити, чому це так. Пояснив результат досліді Гей-Люссака німецький лікар Ю. Майер у праці “Органічний рух у зв’язку з обміном речовин” (1845). Розглядаючи різні енергетичні перетворення, Майер показав, що від розширення ідеального газу в пустоту газ не повинен охолоджуватись, бо він не виконує ніякої роботи проти зовнішніх сил. Якщо, розширюючись, газ виконує роботу проти зовнішніх сил, то його температура повинна знижуватись, що відбувається, наприклад, у теплових двигунах.

У СІ кількість теплоти, як і роботу, вимірюють у *джоулях* (Дж).

До введення СІ кількість теплоти вимірювали в калоріях.

Калорія – це кількість теплоти, потрібна для нагрівання 1 г дистильованої води на 1 °С, від 19,5 до 20,5 °С.

Одиницю, в 1000 разів більшу за калорію, називають *кілокалорією* (1 ккал = 1000 кал). Співвідношення між одиницями: 1 кал = 4,19 Дж.

§ 55. Теплоємність. Питома теплоємність. Рівняння теплового балансу

Теплоємність

Теплоємністю тіла називають відношення кількості теплоти, потрібної для підвищення його температури від значення T_1 до значення T_2 , до різниці цих температур $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}. \quad (5.2)$$

Отже, теплоємність характеризує ту кількість теплоти, яку треба надати тілу, щоб нагріти його на 1 К (охолоджуючись на 1 К, тіло виділяє таку саму кількість теплоти, як і поглинає, нагріваючись).

Нагріваючи тіла з однаковими масами, але такі, що складаються з різних речовин, можна встановити, що для підвищення їх температури на 1 К потрібні різні кількості теплоти; отже,

теплоємність тіла залежить від його природи.

Теплоємність тіла пропорційна його масі. Тому характеристикою теплових властивостей речовин є його питома теплоємність c – величина, яка дорівнює відношенню теплоємності тіла до його маси:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}. \quad (5.3)$$

У СІ питому теплоємність речовини вимірюють у *джоулях на кілограм-кельвін* [Дж/(кг · К)].

Знаючи теплоємність речовини, можна визначити кількість теплоти, потрібну для нагрівання тіла масою m від температури T_1 до температури T_2 :

$$Q = cm\Delta T = cm(T_2 - T_1). \quad (5.4)$$

Для вимірювання і порівняння теплоємностей різних тіл користуються *калориметром* – приладом, в якому відбувається теплообмін між тілами, ізолюваними від впливу навколишнього середовища.

Найпростіший калориметр – це металевий стакан з кришкою. Його ставлять на корки у посудину більшого об'єму так, що між стінками двох посудин є деякий проміжок. Зверху обидві посудини закривають кришкою (рис. 5.2).

Рівняння теплового балансу

Теплоємності твердих і рідких тіл звичайно вимірюють за допомогою калориметра, наповненого водою або іншою рідиною. Тверде тіло певної маси m_1 , нагріте до певної температури, швидко переносять за нагрівника в калориметр; тіло віддає калориметру деяку кількість теплоти, охолоджуючись саме і нагріваючи речовину калориметра доти, поки температура тіла і калориметра не дорівнюватиме загальному значенню T . Знаючи початкові температури, маси всіх тіл і питомі теплоємності рідини c_3 і матеріалу калориметра c_2 , можна обчислити невідому теплоємність c_x твердого тіла, виходячи з так званого *рівняння теплового балансу*, за яким кількість теплоти Q_1 , віддана тілом, дорівнює кількості теплоти, одержаної калориметром (Q_2 – посудиною, Q_3 – рідиною):

$$Q_1 = Q_2 + Q_3. \quad (5.5)$$

З (5.4) випливає, що

$$Q_1 = c_x m_1 (T_1 - T),$$

$$Q_2 = c_2 m_2 (T - T_2),$$

$$Q_3 = c_3 m_3 (T - T_2),$$

де m_2 і m_3 – відповідно маси калориметра і рідини; T_2 – їх початкова температура. Скориставшись рівнянням теплового балансу (5.5), маємо

$$c_x m_1 (T_1 - T) = c_2 m_2 (T - T_2) + c_3 m_3 (T - T_2),$$

звідки знаходимо невідому питому теплоємність тіла:

$$c_x = \frac{c_2 m_2 (T - T_2) + c_3 m_3 (T - T_2)}{m_1 (T_1 - T)}.$$

Уперше *калориметричний метод (метод змішування)* розробив колега і друг М. В. Ломоносова, професор експериментальної фізики

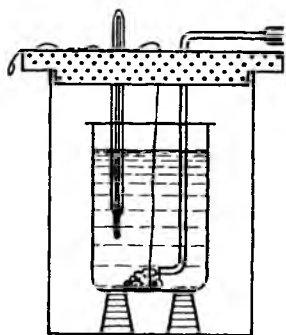


Рис. 5.2

Г. В. Ріхман, який 14 грудня 1744 р. у Петербурзькій академії наук у присутності М. В. Ломоносова прочитав доповідь на тему “Міркування про кількість теплоти, яка має утворитись у процесі змішування рідин, що мають певні градуси теплоти”. Ріхман запропонував формулу для визначення температури суміші однорідних рідин, яка потім перейшла в підручники фізики під назвою “задачі Ріхмана”.

Сучасні калориметри дають можливість точно вимірювати не тільки теплоємності, а й теплоти фазового переходу, теплоти абсорбції (*абсорбція* – це процес поглинання газу об'ємом рідини або твердого тіла).

§ 56. Перший закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки

Основу термодинаміки становлять два закони.

Історично у формулюванні першого закону термодинаміки важливе значення мали невдалі спроби людини побудувати машину, яка б виконувала роботу, не споживаючи еквівалентної кількості енергії; таку машину назвали вічним двигуном (від лат. “перпетуум мобіле”) *першого роду*. Перший закон термодинаміки формулюють у вигляді такого твердження:

не можна побудувати перпетуум мобіле першого роду.

Перший закон термодинаміки – це закон збереження і перетворення енергії:

у різних процесах, які відбуваються в природі, енергія не виникає з нічого і не знищується, а тільки перетворюється з одних видів в інші.

Щоб записати перший закон термодинаміки в математичній формі, розглянемо, як змінюється внутрішня енергія системи.

У загальному випадку внутрішня енергія тіла може зростати як за рахунок механічної роботи зовнішніх сил, так і за рахунок теплообміну.

Під час обміну енергією з навколишніми тілами внутрішня енергія тіла залежно від обставин може як зростати, так і зменшуватись: знак Q показує напрям теплообміну. Якщо в процесі теплообміну навколишні тіла нагріваються, тобто відбирають енергію від тіла, яке розглядаємо, то $Q < 0$. Якщо від зміни внутрішньої енергії ΔU тіла виконується робота A над навколишніми тілами, то роботу вважають додатною ($+A$), а якщо навколишні тіла виконують роботу над тілом, яке розглядаємо, то ця робота від'ємна ($-A$).

Оскільки в загальному випадку внутрішня енергія тіла змінюється як при наданні тілу кількості теплоти, так і при виконанні над тілом роботи,

то, враховуючи правила знаків, закон збереження енергії відповідно до процесу, який відбувається, можна записати у вигляді

$$\Delta U = Q - A. \quad (5.6)$$

Зміна внутрішньої енергії тіла дорівнює різниці наданої тілу кількості теплоти і виконаної над ним механічної роботи.

Тоді (див. (5.6))

$$Q = \Delta U + A. \quad (5.7)$$

Кількість теплоти, надана тілу, витрачається на збільшення його внутрішньої енергії і на виконання тілом роботи над зовнішніми тілами.

Так формулюють перший закон термодинаміки – закон збереження енергії в застосуванні до теплових процесів.

Якщо в замкненій системі, яка складається з кількох тіл, що мають спочатку різні температури, відбувається теплообмін, то ніяка робота всередині системи не виконується.

Оскільки система замкнена, то зміна внутрішньої енергії системи дорівнює нулю, але змінюватиметься внутрішня енергія тіл системи. Згідно з першим началом термодинаміки, зміна внутрішньої енергії тіл системи дорівнює кількості теплоти, відданої або одержаної цими тілами до настання теплової рівноваги всередині системи, тобто стану, в якому температура вже не змінюється.

Тому рівняння теплового балансу для замкненої системи має вигляд

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0, \quad (5.8)$$

де Q_1, Q_2, \dots, Q_n – кількості теплоти, одержані або віддані кожним тілом.

Ці кількості теплоти визначаються формулами (5.4), (6.10) і (9.1), якщо в процесі теплообміну речовини перетворюються з рідкого стану в газоподібний або твердий чи навпаки.

Розглянемо застосування першого закону термодинаміки до різних ізопроеців, які відбуваються в ідеальних газах.

Ізохорний процес

Об'єм газу сталий, змінюються його тиск і температура. Оскільки об'єм газу не змінюється, газ не виконує ніякої роботи проти зовнішніх сил: $A=0$, тобто в процесі ізохорного нагрівання вся надана газу теплота повністю витрачається на збільшення його внутрішньої енергії: $Q = \Delta U$.

Згідно із співвідношенням (5.3), питома теплоємність газу при сталому об'ємі

$$c_V = \Delta U / (m\Delta T),$$

звідки

$$\Delta U = mc_V \Delta T.$$

Зміна внутрішньої енергії ідеального газу в ізохорному процесі пропорційна зміні його температури.

Ізобарний процес

Тиск газу сталий, змінюються його об'єм і температура. Під час ізобарного нагрівання газ розширюється, частина наданої йому теплоти витрачається на збільшення внутрішньої енергії газу, решта – на роботу газу проти зовнішніх сил:

$$Q = \Delta U + A.$$

Обчислимо роботу, яку виконує газ під час ізобарного розширення. Нехай у циліндрі під поршнем є газ, який займає об'єм V під тиском p . Площа поршня S . Сила, з якою газ тисне на поршень, $F = pS$. У процесі розширення газу поршень підніметься на висоту Δh , при цьому газ виконає роботу

$$A = F\Delta h = pS\Delta h.$$

Але $S\Delta h = \Delta V$ – збільшення об'єму газу. Отже,

$$A = p\Delta V. \quad (5.9)$$

Робота в процесі ізобарного розширення газу дорівнює добутку тиску газу на збільшення його об'єму.

Графічно на діаграмі pV (рис. 5.3, а) робота ізобарного розширення газу зображується площею прямокутника $abcd$.

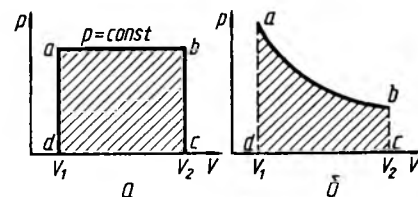


Рис. 5.3

Ізотермічний процес

Температура газу стала, змінюються об'єм і тиск газу. Оскільки температура газу не змінюється, то не змінюється і його внутрішня енергія, тобто $\Delta U = 0$. Перший закон термодинаміки для цього процесу можна записати у вигляді

$$Q = A.$$

У процесі ізотермічного нагрівання вся теплота, надана газу, витрачається на роботу газу проти зовнішніх сил.

Графічно на діаграмі pV (рис. 5.3, б) робота ізотермічного розширення газу виражається площею фігури $abcd$.

§ 57. Адіабатний процес

Адіабатний процес

Адіабатним* називають процес, який відбувається без теплообміну з навколишніми тілами.

Здійснити процес, близький до адіабатного, можна тоді, коли газ міститься всередині оболонки з дуже добрими теплоізоляційними властивостями. Наближенням до такої оболонки може бути *посудина Дьюара*. Це посудина з подвійними посрібленими стінками, з простору між якими відкачано повітря.

Адіабатними можна вважати процеси, які швидко відбуваються. Для швидкого стискання газу затрачується робота, що веде до збільшення внутрішньої енергії і підвищення температури. Тіла, температура яких підвищена, мають деяку кількість теплоти передати навколишньому середовищу, але для процесу теплопередавання потрібен деякий час, тому від швидкого стискання (або розширення) теплота не встигає поширитись з даного об'єму, тобто $Q = 0$, і процес можна розглядати як адіабатний. Прикладом такого процесу може бути вибух пальної суміші в двигуні внутрішнього згоряння.

Перший закон термодинаміки для адіабатного процесу має вигляд

$$\Delta U + A = 0, \text{ або } A = -\Delta U. \quad (5.10)$$

В адіабатному процесі робота виконується тільки за рахунок зміни внутрішньої енергії газу.

У процесі адіабатного розширення газ виконує роботу, його внутрішня енергія і, отже, температура знижуються. У процесі адіабатного стискання робота газу від'ємна, його внутрішня енергія і, отже, температура зростають. Явище охолодження газу в процесі адіабатного розширення широко використовують у техніці, наприклад у роботі холодильних установок.

Політропний процес

Реальні процеси, які відбуваються в природі, не є точно ізотермічними або адіабатними, оскільки не можна здійснити повної термічної ізоляції, не можна також створити адіабатної оболонки, яка має теплопровідність, що дорівнює нулю. *Реальні процеси, які є проміжними між адіабатним та ізотермічними процесами, називаються політропними.*

* Від грец. "адіабатос" – неперехідний.

§ 58. Принцип дії теплової машини.

Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна

Тепловий двигун

Теплові двигуни з'явилися на початку XVIII ст. у період інтенсивного розвитку металургійної і текстильної промисловості. В Росії паровий двигун був запропонований І. І. Ползуновим (1765).

У 1784 р. Дж. Уатт одержав патент на універсальний паровий двигун. У ті роки, коли жив С. Карно (1796–1832), найкращі парові машини мали коефіцієнт корисної дії (ККД) 5 %. Це спонукало його дослідити причини недосконалості теплових машин і знайти шляхи підвищення їх ККД. У 1824 р. С. Карно друкує працю "Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу". Ця праця увійшла до скарбниці світової науки і поставила її автора в ряди основоположників термодинаміки. В ній С. Карно запропонував цикл ідеальної теплової машини.

Тепловий двигун – це пристрій, який перетворює внутрішню енергію палива в механічну. Енергія, яка виділяється під час згоряння палива, через теплообмін передається газу. Газ, розширюючись, виконує роботу проти зовнішніх сил і надає руху механізму. Будову теплового двигуна подано на рис. 5.4, а.

Будь-який тепловий двигун складається з трьох основних частин: робочого тіла, нагрівника і холодильника. Робоче тіло (газ або пара) під час розширення виконує роботу, одержавши від нагрівника деяку кількість теплоти Q_n . Температура нагрівника T_1 залишається сталою за рахунок згоряння палива. У процесі стискання робоче тіло передає деяку кількість теплоти Q_x холодильнику, який має температуру $T_2 < T_1$. Тепловий двигун має працювати циклічно. Якщо тіло з початкового стану A переводиться в кінцевий стан B , а потім через інші проміжні стани повертається в початковий стан A , то кажуть, що виконується *коловий процес*, або цикл (рис. 5.4, б).

Після закінчення циклу тіло повертається у свій початковий стан, його внутрішня енергія набуває початкового значення.

Тому робота циклу може виконуватись тільки за рахунок зовнішніх джерел, які підводять теплоту до робочого тіла. Реальні теплові двигуни працюють за розімкненим циклом, тобто після розширення газ викидається, а в машину вводиться і стискається нова порція газу.

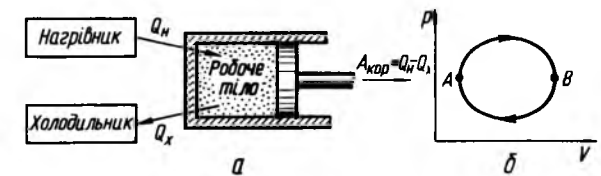


Рис. 5.4

Цикл Карно

Розрізняють *прямий цикл* (цикл теплової машини) і *зворотний цикл* (цикл холодильної машини).

Робочий цикл Карно складається з двох рівноважних ізотермічних і двох рівноважних адіабатних процесів (рис. 5.5).

Рівноважним називають процес, в якому газ проходить ряд рівноважних станів, що йдуть один за одним. Параметри двох таких сусідніх станів відрізняються на дуже малу величину. В ідеальній машині, яка працює за циклом Карно, немає жодних втрат на теплопровідність, тертя, випромінювання тощо. Робочою речовиною є ідеальний газ.

На ділянці 1–2 (ізотерма) ідеальний газ виконує роботу щодо ізотермічного розширення за рахунок теплоти, одержаної від нагрівника. Внутрішня енергія газу не змінюється, бо $T = \text{const}$. У процесі адіабатного розширення (ділянка 2–3) газ виконує роботу за рахунок зміни внутрішньої енергії, оскільки в цьому процесі газ теплоти не одержує. У процесі ізотермічного стискування (ділянка 3–4) виділена теплота повністю передається холодильнику, внутрішня енергія не змінюється. У процесі адіабатного стискування (ділянка 4–1) робота витрачається на підвищення внутрішньої енергії газу, теплоти ідеальний газ не одержує. Таким чином, ідеальний газ повертається у свій початковий стан і, отже, до початкового значення його внутрішньої енергії. Від нагрівника ідеальний газ одержав кількість теплоти Q_H , холодильнику віддав Q_X ; отже, за першим началом термодинаміки, в роботу перетворено кількість теплоти, яка дорівнює $Q_H - Q_X$. Величина

$$\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} \quad (5.11)$$

називається *коефіцієнтом корисної дії (ККД) теплової машини*.

ККД циклу Карно можна записати через температури нагрівника T_H і холодильника T_X :

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H} \quad (5.12)$$

Отже,

коефіцієнт корисної дії визначається тільки температурами нагрівника та холодильника і не залежить від роду робочої речовини.

З рівняння (5.12) випливають такі висновки:

а) для підвищення ККД теплової машини треба підвищувати температуру нагрівника і знижувати температуру холодильника;

б) ККД теплової машини завжди менший від 1.

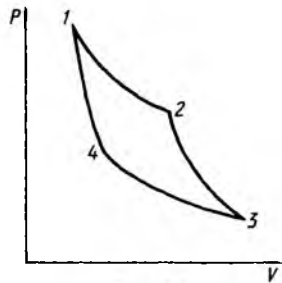


Рис. 5.5

Тепер зусилля інженерів направлені на підвищення ККД двигуна за рахунок зменшення тертя частин машини, втрат палива внаслідок його неповного згоряння і т. д. Реальні можливості для підвищення ККД тут ще великі. Так, для парової турбіни початкові і кінцеві температури пари приблизно мають бути такі: $T_1 = 800$ К, $T_2 = 300$ К. За цих температур максимальне значення ККД

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \% \approx 62 \%$$

Справжнє значення ККД через різні енергетичні втрати становитиме приблизно 40 %.

Підвищення ККД теплових двигунів, наближення його до максимально можливого – найважливіше технічне завдання для галузей промисловості та сільського господарства.

§ 59. Другий закон термодинаміки

Перший закон термодинаміки встановлює кількісне співвідношення між кількістю теплоти, роботою і зміною внутрішньої енергії тіла, але воно не визначає напрямку перебігу процесів. З точки зору першого закону термодинаміки перехід енергії у формі теплоти однаково можливий як від більш нагрітого до менш нагрітого тіла, так і навпаки.

Напрямок процесів, які відбуваються в природі і пов'язані з перетворенням енергії, визначає другий закон термодинаміки.

Перетворення теплоти в роботу можливе тільки за наявності нагрівника і холодильника; у всіх теплових машинах корисно використовується тільки частина енергії, яка передається від нагрівника до холодильника.

Інакше кажучи, жодний тепловий двигун, у тому числі й двигун внутрішнього згоряння, не може дати ККД, який дорівнює одиниці. Є кілька формулювань другого закону.

“Коефіцієнт корисної дії ідеальної теплової машини визначається тільки температурами тепловіддавача і теплоприймача” (С. Карно).

“У природі неможливий процес, єдиним результатом якого був би перехід теплоти повністю в роботу” (М. Планк).

“Теплота не може сама собою переходити від тіла з нижчою температурою до тіла з вищою температурою” (Р. Клаузіус).

Другий закон заперечує можливість використання запасів внутрішньої енергії якого-небудь джерела без переведення її на нижчий температурний рівень, тобто без холодильника. Наприклад, практично необмежені запаси внутрішньої енергії океанів не можуть бути повністю використані.

Використання теплоти океану, як тільки температура його стане нижчою, ніж температура навколишнього середовища, привело б до процесу, в якому теплота переходила б від більш холодного до більш гарячого тіла, а такий процес сам собою відбуватися не може. Отже, другий закон термодинаміки стверджує неможливість побудови вічного двигуна другого роду, тобто двигуна, який працює за рахунок охолодження якого-небудь одного тіла.

Перший і другий закони термодинаміки, з одного боку, дають можливість інженерам і технікам визначати, які проекти просто нереальні, фантастичні, і, з другого, показують їм реальний шлях до вдосконалення теплових машин.

§ 60. Термодинамічна шкала температур

Відкриття другого закону термодинаміки дало можливість побудувати термодинамічну шкалу температур, яка не залежить від термодинамічного тіла і температурного параметра.

Вимірявши роботу A і витрачену кількість теплоти Q , можна обчислити $\eta = A/Q$. З (5.11) і (5.12) випливає:

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H} = 1 - \frac{T_X}{T_H}, \quad \eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} = 1 - \frac{Q_X}{Q_H}.$$

Звідси дістаємо

$$\frac{Q_X}{Q_H} = \frac{T_X}{T_H}. \quad (5.13)$$

Отже, відношення кількості теплоти Q_X , відданої холодильнику, до кількості теплоти Q_H , одержаної від нагрівника, дорівнює відношенню відповідних температур. Це положення Кельвін узяв за основу для побудови термодинамічної шкали температур.

У СІ за основну одиницю взято *кельвін* (К).

Кельвін – це $1/273,16$ термодинамічної температури потрійної точки води. Між температурами, виміряними за термодинамічною шкалою і за шкалою Цельсія, існує простий зв'язок, виражений формулою (4.23).

Оскільки вираз (5.13) було визначено внаслідок розгляду циклу Карно, ККД якого не залежить від робочої речовини, то це визначення пов'язане не з властивостями якоїсь речовини, як це було для будь-якої емпіричної температурної шкали. Термодинамічне визначення температури не має тієї обмеженості, яка властива молекулярно-кінетичному визначенню.

§ 61. Холодильні машини

Усі теплові машини працюють за так званим прямим циклом, тобто здійснюють такий замкнений процес, при якому теплота перетворюється в роботу. Проте машину можна примусити працювати і за зворотним циклом, коли внаслідок виконаної роботи від системи віднімається деяка кількість теплоти. У цьому разі теплота переходить від менш нагрітого тіла до більш нагрітого, а машина перетворюється в холодильну машину.

Прикладом найбільш поширеної холодильної машини тепер є домашній холодильник. Розглянемо принцип його роботи. Агрегат, за допомогою якого створюється низька температура в холодильній камері і самому холодильнику (рис. 5.6), складається з компресора A , конденсатора B , крана K і випарника C , виготовленого у вигляді трубок у стінках холодильної камери.

Охолодну систему холодильника заповнюють рідиною, яка легко випаровується (фреон, аміак, сірчистий ангідрид та ін.); її називають *холодоагентом*.

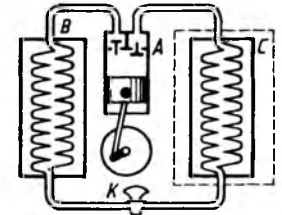


Рис. 5.6

Холодоагент за допомогою компресора, який працює від електродвигуна, стискається в конденсаторі – змійовику з трубок невеликого перерізу. Під час стискання холодоагент переходить у рідкий стан, охолоджується, віддаючи теплоту в навколишнє середовище (трубки змонтовані на задній стінці холодильника), і надходить у трубки випарника, які оточують холодильну камеру. Холодоагент випаровується тому, що трубки випарника мають діаметр, більший від діаметра трубок конденсатора, і тиск газу в них різко зменшується. Крім того, і сам конденсатор створює у випарнику нижчий тиск. Процес випаровування, як ми побачимо потім, супроводиться поглинанням теплоти від стінок змійовика-випарника, повітря і продуктів, що містяться в холодильній камері. Температура в холодильній камері і, отже, в усьому холодильнику знижується. Газоподібний холодоагент надходить знову в компресор, і процес повторюється багато разів.

§ 62. Теплові двигуни. Охорона природи

Теплові двигуни

Прикладами теплових машин можуть бути парові машини, парові турбіни, двигуни внутрішнього згоряння, реактивні двигуни.

У парових машинах і парових турбінах нагрівником є паровий котел, робочим тілом – пара, холодильником – атмосфера або пристрої для охолод-

ження спрацьованої пари – конденсатори. У двигунах внутрішнього згоряння нагрівником і робочим тілом є паливо, а холодильником – атмосфера. Як паливо звичайно використовують бензин, спирт, гас і так зване дизельне паливо. За допомогою спеціальних пристроїв (наприклад, карбюраторів у бензинових двигунів) паливо змішується з повітрям, і ця суміш подається в циліндр, де й спалюється. Продукти згоряння викидаються в атмосферу. Схему роботи теплового двигуна подано на рис. 5.7. Робоче тіло двигуна дістає від нагрівника при температурі T_1 кількість теплоти Q_1 , виконує роботу A і передає частину кількості теплоти Q_2 холодильнику, що має температуру T_2 .

Карбюраторний двигун

Розглянемо чотиритактний цикл карбюраторного двигуна і побудуємо робочу діаграму цього циклу (рис. 5.8).

У процесі руху поршня вниз (рис. 5.8, а) за рахунок роботи зовнішніх сил відкривається впускний клапан і робоча суміш надходить у циліндр. Процес ізобарний, і тиск дорівнює атмосферному. Коли поршень досягне крайнього нижнього положення, впускний клапан закривається. Перший такт (всмоктування) закінчено: на графіку процес зображено прямою $0-1$. Другий такт (стискання) (рис. 5.8, б) відбувається також під дією зовнішньої сили. Обидва клапани закриті, і газ адиабатно нагрівається. На графіку це відповідає лінії $1-2$. Третій такт – спалахування і робочий хід (рис. 5.8, в). Коли поршень досягне крайнього верхнього положення, іскра запальної свічки запалює суміш, тиск газу різко зростає. На графіку це відповідає ізохорному процесу $2-3$. Поршень потім переміщується вниз при закритих клапанах, що відбувається в процесі адиабатного розширення. Крива $3-4$ відповідає такту, який називається робочим ходом.

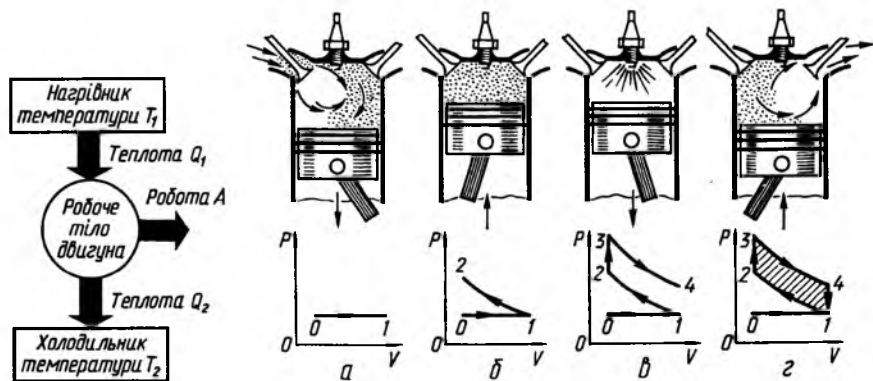


Рис. 5.7

Рис. 5.8

Як видно з графіка рис. 5.8, в, у цьому такті тиск газу спадає, об'єм зростає, температура зменшується. Робота в цьому разі додатна, вона виконується за рахунок зменшення внутрішньої енергії газу. Четвертий такт – вихлоп (рис. 5.8, г). Коли поршень досягає крайнього нижнього положення, відкривається впускний клапан і продукти згоряння через впускну трубу викидаються в навколишнє середовище. Тиск газу спадає, і в кінці такту він дорівнює атмосферному. На графіку – це ізохорний процес $4-1$. Поршень переміщується за рахунок енергії маховика у верхнє положення – такт закінчено.

У розглянутому замкненому процесі виконану роботу A можна визначити. Вона дорівнює площі заштрихованої фігури, обмеженої лініями процесів, які відбуваються.

Аналіз графіка показує, що під час робочого ходу (ділянка $3-4$) суміш розширюється при більшому тиску, ніж вона стискається під час другого такту (ділянка $1-2$). Ця обставина в кінцевому підсумку й зумовлює виконання корисної роботи двигуном.

Робота при ізохорних процесах ($3-2$ і $4-1$) дорівнює нулю ($V = \text{const}$), а додатна робота визначається лише різницею робіт при адиабатному розширенні і стисканні.

На практиці ККД двигуна внутрішнього згоряння досягає 20–30 %.

Як можна підвищити ККД такого двигуна? Досвід і розрахунки показують, що для цього треба забезпечити більше стискання суміші. Проте в двигунах карбюраторного типу це неможливо, бо вона, дуже нагріваючись, передчасно samozайматиметься.

Дизель

Німецький інженер Р. Дізель винайшов двигун, названий його ім'ям, який працює за таким циклом, що дає можливість уникнути зазначених вище утруднень і значно підвищити ККД.

Ступінь стискання в дизелях досягає значної величини, внаслідок чого температура повітря в кінці стискання підвищується до температури, достатньої для займання палива.

Паливо згоряє тут не відразу, як у карбюраторних двигунах, а поступово, протягом деякої частини ходу поршня. Внаслідок цього паливо згоряє при об'ємі робочого простору, який збільшується. Тому тиск газів під час роботи буде сталим.

Отже, суміш згоряє при сталому тиску на відміну від карбюраторних двигунів, де, як ми побачили, суміш згоряє при сталому об'ємі.

Дизель – економічніший двигун, ніж карбюраторний, його ККД досягає 40 %. Він може мати значно більшу потужність (десятки тисяч кінсь-

ких сил). Крім того, дизель може працювати на дешевих сортах рідкого палива.

Дизелі великої потужності широко застосовують як у стаціонарних установках, так і на водному, залізничному, повітряному транспорті, а дизелі малої потужності останнім часом з успіхом застосовують як двигуни автомобілів, тракторів і невеликих суден.

Реактивний двигун

На рис. 5.9 подано схему прямооточного повітряно-реактивного двигуна, який використовують в авіації. Цей двигун працює так. Під час польоту літака зустрічний потік повітря проходить через напірне сопло і захоплює паливе, яке розбризкується форсунками. Утворена робоча суміш надходить потім до камери згоряння, де від запальних свічок спалахує.



Рис. 5.9

Гази, які утворилися внаслідок згоряння робочої суміші, з величезною швидкістю викидаються через вихідний отвір – сопло. Внаслідок різкого збільшення тиску під час згоряння суміші швидкість газів на виході з сопла значно більша від швидкості повітря,

яке входить у двигун. За законом збереження кількості руху (імпульсу) внаслідок цієї різниці швидкостей і створюється реактивна тяга.

В авіації тепер широко застосовують турбогвинтові двигуни (рис. 5.10). У цьому двигуні гази, що проходять через турбіну, віддають їй велику частину своєї енергії, тому газова турбіна розвиває потужність, що значно перевищує ту, яку споживає компресор. Надлишок потужності турбіни витрачається на надавання руху повітряному гвинту, який є основним джерелом тяги двигуна. Крім того, в турбогвинтових двигунах створюється деяка додаткова тяга від реактивної дії відпрацьованих газів, що виходять із сопла.

ККД сучасних теплових машин коливається від 40 % (у двигунів внутрішнього згоряння) до 60 % (у реактивних).

Конструкторська думка вчених працює як у напрямі вдосконалення наявних двигунів (створення нових матеріалів, зменшення тертя і втрат пального при неповному згорянні), так і в напрямі створення двигунів, конструкція яких принципо-

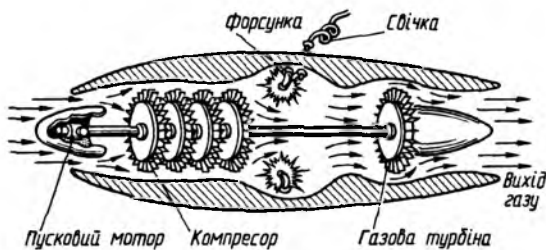


Рис. 5.10

во відрізняється від наявних (МГД-генератори, атомні, ядерні і т. д.). Важливо мати на увазі, що зростання кількості двигунів внутрішнього згоряння дедалі більше занепокоює людей у плані захисту природи і навколишнього середовища. Створення нових двигунів, продукти згоряння яких не забруднювали б навколишнє середовище, – дуже важлива проблема сучасності.

Охорона природи

Природа для людини не тільки джерело продуктів харчування і сировини для промисловості. Людина, яка сама є частиною природи, потребує сприятливого середовища життя з чистими водою і повітрям. Повітря – це фізична суміш газів, які утворюють земну атмосферу. Воно містить у завислому стані більшу чи меншу кількість пилу, диму, частинок солі та інших природних домішок. Як правило, концентрація в повітрі природних домішок не досягає таких значень, при яких вони могли б згубно впливати на організм людини. Більш шкідливим є забруднення атмосферного повітря промисловими викидами.

Повсюдне застосування теплових двигунів негативно впливає на навколишнє середовище. Підраховано, що тепер щороку спалюють приблизно 2 млрд т різних видів кам'яного вугілля і близько 1 млрд т нафти. Це призводить до поступового підвищення середньої температури на Землі, що може створити загрозу танення льодовиків і підвищення рівня Світового океану. Крім того, в атмосферу викидається не менш як 120 млн т золи і до 60 млн т отруйного сірчистого ангідриду. Понад 200 млн автомобілів у всьому світі безперервно отруюють атмосферне повітря оксидами вуглецю та азоту, вуглеводнями тощо. І це лише частина шкідливих домішок, що потрапляють в атмосферу. Із збільшенням потужностей теплових і атомних електростанцій різко зростає потреба на воду.

Тепер у багатьох країнах застосовують прямі і посередні методи захисту повітряного і водного басейнів від забруднення.

Прямі методи – це очищення і вловлювання димових і вентиляційних газів; перехід на використання палива, яке не забруднює атмосферу, наприклад природного газу, безсірчистої нафти, створення небензинових автомобільних двигунів; очищення води за допомогою фільтрообмінних смол і повторне її використання.

Застосування посередніх методів забезпечує значне зниження концентрації шкідливих речовин у найнижчому шарі атмосфери. Ці методи пов'язані зі збільшенням висоти джерел викидів і використанням фізичних закономірностей розсіювання домішок у повітрі, з раціональним урахуванням метеорологічних умов при проектуванні та експлуатації різних підприємств.

Для економії площ і водних ресурсів доцільно споруджувати цілі комплекси електростанцій із замкненим циклом водопостачання.

Заборонено введення в експлуатацію підприємств і теплоелектростанцій, які викидають в атмосферне повітря золу, кіпоть, пил, шкідливі гази без попереднього очищення. Як правило, шкідливі виробництва будують за межами міста. У великих масштабах озеленюють вулиці, закладають сквери, парки, сади.

Короткі висновки

- Усі макроскопічні тіла мають внутрішню енергію, яка є однозначною функцією температури й об'єму. Внутрішня енергія одноатомного ідеального газу залежить від температури:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

На кожний степінь вільності і поступального руху одноатомної молекули припадає однакова кінетична енергія, яка дорівнює $1/2 (kT)$.

- Перший закон термодинаміки – це закон збереження і перетворення енергії в застосуванні до теплового процесу. Згідно з ним,

$$Q = \Delta U + A.$$

- У термодинаміці робота, яку виконує система проти зовнішніх сил,

$$A = p\Delta V.$$

- При нагріванні й охолодженні кількість теплоти

$$Q = cm\Delta T.$$

- При обміні теплотою в ізольованій системі без виконання роботи виконується рівняння теплового балансу

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n = 0.$$

- Застосування першого начала термодинаміки до різних ізопроцесів, які відбуваються в ідеальному газі.

При ізохорному процесі зміна внутрішньої енергії ідеального газу пропорційна зміні його температури. Робота дорівнює нулю:

$$Q = \Delta U.$$

При ізобарному процесі теплота, яка передається системі, витрачається на зміну внутрішньої енергії і виконання роботи.

При ізотермічному процесі внутрішня енергія ідеального газу не змінюється і вся теплота витрачається на роботу газу проти зовнішніх сил:

$$Q = A.$$

При адіабатному процесі робота виконується тільки за рахунок зміни внутрішньої енергії газу:

$$\Delta Q = 0, \quad A = \Delta U.$$

- Другий закон термодинаміки визначає напрями процесів, які відбуваються в природі. Воно заперечує можливість використання запасів внутрішньої енергії якого-небудь джерела без переведення її на нижчий рівень, тобто без холодильника.

- У всіх теплових машинах корисно використовується лише частина енергії, яка передається від нагрівника до холодильника. Максимально можливе значення коефіцієнта корисної дії

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n}.$$

Найважливіше завдання науки і техніки – підвищення ККД теплових двигунів і наближення його до максимально можливого.

Відношення $\frac{Q_x}{Q_n} = \frac{T_x}{T_n}$ покладено в основу методу вимірювання температур

(термодинамічна шкала температур).

- Повсюдне застосування теплових двигунів негативно впливає на навколишнє середовище. Це ставить ряд серйозних проблем перед суспільством. Поряд з підвищенням ККД теплових двигунів треба здійснювати заходи з охорони навколишнього середовища.

Запитання для самоконтролю і повторення

- Які методи дослідження властивостей макроскопічних систем застосовують у молекулярній фізиці? У чому відмінність цих методів?
- Що називають термодинамічною системою? 3. Що таке термодинамічний процес? 4. Поясніть поняття оборотних і необоротних процесів. 5. Поясніть поняття внутрішньої енергії системи. 6. Від чого залежить внутрішня енергія ідеального газу? 7. Які форми передавання енергії вам відомі? Розкажіть про них. 8. Яка відмінність між теплоємністю тіла і питомою теплоємністю? 9. У чому зміст рівняння теплового балансу і яка його причетність до закону збереження енергії? 10. Сформулюйте перший закон термодинаміки. 11. Дайте означення адіабатного процесу. 12. Від чого залежить ККД теплової машини? 13. Сформулюйте другий закон термодинаміки. 14. Що таке термодинамічна шкала температур? 15. Наведіть приклади відомих вам теплових двигунів. 16. Чи завдає шкоди природі робота теплових двигунів?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Газ, який займає об'єм 20 л за нормальних умов, було ізобарно нагріто до 80 °С. Визначити роботу розширення газу.

Дано: $V = 20$ л = $20 \cdot 10^{-3}$ м³; $T_1 = 273$ К; $T_2 = (273 + 80)$ К = 353 К;

$$p_1 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Знайти: A .

Розв'язання. Роботу розширення газу в ізобарному процесі визначаємо за формулою (5.9): $A = p\Delta V$. З рівняння стану газу випливає

$$A = \frac{m}{M} R\Delta T.$$

З рівняння Клапейрона – Менделєєва (4.40)

$$p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT_1$$

знаходимо кількість молів газу:

$$\frac{m}{M} = \frac{p_1 V_1}{RT_1},$$

звідси

$$A = \frac{p_1 V_1 \Delta T}{T_1}$$

Обчислення:

$$A = \frac{1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot 80 \text{ К}}{273 \text{ К}} = 590 \text{ Дж}.$$

Задача 2. У калориметрі змішують три рідини, які хімічно не взаємодіють, масою $m_1 = 1$ кг, $m_2 = 10$ кг, $m_3 = 5$ кг, відповідно з температурами 6, – 40 і 60 °С і питомими теплоємностями 2000, 4000 і 2000 Дж/(кг · К). Визначити температуру θ суміші і кількість теплоти, потрібну для наступного нагрівання суміші до $t = 6$ °С.

Дано: $m_1 = 1$ кг; $m_2 = 10$ кг; $m_3 = 5$ кг; $T_1 = (273 + 6) \text{ К} = 279 \text{ К}$; $T_2 = (273 - 40) \text{ К} = 233 \text{ К}$; $T_3 = (273 + 60) \text{ К} = 333 \text{ К}$; $c_1 = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $c_2 = 4000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $c_3 = 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $T = (273 + 6) \text{ К} = 279 \text{ К}$.

Знайти: θ , Q .

Розв'язання. З рівняння теплового балансу випливає, що алгебрична сума одержаних і відданих рідинами кількостей теплоти дорівнює нулю:

$$m_1 c_1 (\theta - T_1) + m_2 c_2 (\theta - T_2) + m_3 c_3 (\theta - T_3) = 0.$$

Розв'язавши це рівняння відносно θ , маємо

$$\theta = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 + m_3 c_3 T_3}{m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3}.$$

Щоб суміш нагріти до температури T , потрібна кількість теплоти

$$Q = c_1 m_1 (T - \theta) + c_2 m_2 (T - \theta) + c_3 m_3 (T - \theta) = (c_1 m_1 + c_2 m_2 + c_3 m_3) (T - \theta).$$

Обчислення:

$$\theta = \frac{1 \text{ кг} \cdot 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 279 \text{ К} + 10 \text{ кг} \cdot 4000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 233 \text{ К} + 5 \text{ кг} \cdot 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 333 \text{ К}}{1 \text{ кг} \cdot 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) + 10 \text{ кг} \cdot 4000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) + 5 \text{ кг} \cdot 2000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})} = 254 \text{ К};$$

$$Q = \left[2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 1 \text{ кг} + 4000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 10 \text{ кг} + 2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 5 \text{ кг} \right] \cdot (279 - 254) \text{ К} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 1,3 \text{ МДж}.$$

Задача 3. Температура нагрівника ідеальної теплової машини 500 К, температура холодильника 400 К. Визначити ККД циклу Карно і корисну потужність машини, якщо нагрівник передає їй 1675 Дж теплоти за секунду.

Дано: $T_n = 500 \text{ К}$; $T_x = 400 \text{ К}$; $Q = 1675 \text{ Дж}$; $t = 1 \text{ с}$.

Знайти: η , N .

Розв'язання. ККД машини визначаємо за формулою (2.12):

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n} = \frac{500 \text{ К} - 400 \text{ К}}{500 \text{ К}} = 0,2.$$

У корисну роботу перетворюються

$$A = Q\eta = 1675 \text{ Дж} \cdot 0,2 = 335 \text{ Дж}.$$

Корисна потужність машини

$$N = \frac{A}{t}.$$

Обчислення:

$$N = \frac{335 \text{ Дж}}{1 \text{ с}} = 335 \text{ Вт}.$$

Задачі для самостійного розв'язання

- Тіло масою 10 кг упало з висоти 20 м. На скільки збільшиться внутрішня енергія в момент удару об Землю, якщо на його нагрівання витрачається 30 % кінетичної енергії тіла?
- У процесі ізотермічного розширення ідеальний газ виконав роботу $A = 20$ Дж. Яку кількість теплоти надано газу?
- Яку температуру матиме вода, якщо змішати 400 л води при 20 °С із 100 л води при 70 °С?
- Місткість системи охолодження автомобіля 6 л. У радіатор влили 2,0 л теплої води при 40 °С, а потім доповнили систему гарячою водою при 85 °С. Визначити температуру суміші, коли відомо, що теплоємність системи знижує її порівняно з розрахунковою на 14 %.
- В акваріум налито 25 л води при 17 °С. Скільки гарячої води при 72 °С треба долити в акваріум, щоб у ньому встановилась температура 22 °С?
- Для ванни треба приготувати 320 л води при 36 °С. У газовій колонці температура води 78 °С, а з водопроводу тече вода при 8 °С. Скільки гарячої і холодної води треба взяти для нагрівання ванни?
- Чому, піднімаючись у верхні шари атмосфери, повітря охолоджується?
- Чому під час випускання газу з балона вентиль вкривається росою або навіть інєєм?
- Визначити роботу ідеальної теплової машини за один цикл, якщо протягом циклу машина одержує від нагрівника 2095 Дж теплоти. Температура нагрівника 400 К, температура холодильника 300 К.
- Температура нагрівника теплової машини, яка працює за циклом Карно, 207 °С, а температура холодильника 117 °С. Якою має бути температура нагрівника (якщо температура холодильника не змінюється), щоб ККД машини збільшився в три рази?

ГЛАВА 6 ВЛАСТИВОСТІ ПАРИ

§ 63. Випаровування і конденсація

Випаровування

Вивчивши властивості ідеальних газів, перейдемо до розгляду властивостей реальних газів і рідин, зокрема їх взаємних перетворень. Тут треба мати на увазі, що молекули газів і рідин хоч і малі за розмірами, але мають скінченні розміри, певну форму і між ними діють досить значні сили взаємодії. У цьому головна відмінність реальних газів і рідин від ідеальних як спрощеної моделі реальних об'єктів.

Під час вивчення ідеального газу було зазначено, що багато його властивостей не залежать від природи газу. Проте чим менша температура і більший тиск, тим помітніша залежність властивостей газу від його природи. Газ за таких умов називають паром, тим самим підкреслюючи, що він утворився з певної рідини.

Явище переходу речовини в пару називається пароутворенням. У природі пароутворення відбувається у вигляді випаровування і кипіння. Пароутворення з відкритої поверхні рідини називається випаровуванням. Випаровуються не тільки рідини, а й тверді тіла. Випаровування твердих тіл називається сублимацією.

Розглянемо процес випаровування рідин. Як і дифузія, випаровування відбувається внаслідок безперервного хаотичного руху молекул рідини. Всяка молекула, яка рухається з глибини рідини до її поверхні, зазнає в поверхневому шарі дії сили, що перешкоджає вируванню молекули з поверхні рідини. Щоб пройти крізь поверхневий шар, молекула повинна мати достатню кінетичну енергію, щоб виконати роботу виходу з поверхні рідини. Швидкості молекул рідини, як і молекул газу, різні. Рідину залишають "найшвидші" молекули, внаслідок чого середня кінетична енергія молекул, які лишилися, зменшується, що призводить до зниження температури рідини. Щоб підтримувати сталою температуру рідини, їй треба надавати енергію ззовні, наприклад, у вигляді теплоти. *Кількість теплоти Q , потрібної для перетворення в пару 1 кг рідини при сталій температурі, називають питомою теплотою пароутворення:*

$$r = \frac{Q}{m}. \quad (6.1)$$

У СІ питому теплоту пароутворення вимірюють у джоулях на кілограм (Дж/кг).

Після того як молекула рідини перемістилась від межі поверхневого шару на відстань, більшу за радіус дії молекулярних сил рідини, вона стає молекулою пари. Молекулярні сили діють на порівняно коротких відстанях (порядку 10 нм).

Конденсація

Внаслідок хаотичного руху над поверхнею рідини молекула пари, потрапляючи в сферу дії молекулярних сил, знову повертається в рідину. Цей процес називають *конденсацією*. У процесі конденсації пари деякої маси виділяється стільки енергії, скільки витрачається під час випаровування рідини такої самої маси. Рідина випаровується при будь-якій температурі і тим швидше, чим вища температура, більша площа вільної поверхні рідини, яка випаровується, і чим швидше видаляється утворена над рідиною пара.

Якщо рідина міститься у відкритій посудині, то молекул випаровується більше, ніж конденсується, і маса рідини зменшується.

Нагадаємо, що процес пароутворення зв'язаний із збільшенням внутрішньої енергії речовини, а процес конденсації – із зменшенням її. Отже, **конденсація і пароутворення відбуваються тільки в процесі обміну енергією між навколишнім середовищем і речовиною.**

§ 64. Насичена пара і її властивості. Критичний стан речовини

Насичена пара

Нехай рідина міститься в закритій посудині, з якої відкачано повітря. Спочатку кількість молекул, які випарилися з рідини, зростає, але, чим більше буде кількість молекул пари, тим більше молекул конденсується. Якщо кількість молекул пари все-таки збільшується, то пару, яка міститься над рідиною, називають ненасиченою. Якщо за той самий час кількість молекул пари, які випаровуються і конденсуються, однакова, то кількість молекул пари над рідиною буде сталою. Такий стан називають *динамічною рівновагою пари і рідини*. Пара, яка перебуває в динамічній рівновазі з рідиною, називається *насиченою*.

Ненасичена пара підпорядковується газовим законам. Чим далі стан пари від насичення, тим краще вона підпорядковується законам Бойля –

* При підвищенні температури більшість рідин розширюється, що веде до збільшення відстані між молекулами рідини, а отже, до зменшення сил молекулярної взаємодії і зменшення енергії, яку витрачає молекула на випаровування.

Маріотта, Гей-Люссака. Із збільшенням кількості молекул пари над поверхнею рідини при незмінній температурі її тиск збільшується. Він досягає максимального значення, коли пара стає насиченою. Тиск насиченої пари визначається концентрацією (кількістю молекул в одиниці об'єму V) молекул пари і температурою.

Розглянемо, як залежить тиск насиченої пари при незмінній температурі від її об'єму. Збільшимо об'єм посудини, в якій містяться рідина і її насичена пара, тоді концентрація молекул пари і її густина зменшаться. Молекули пари рідше потраплятимуть у рідину. Динамічна рівновага порушиться. При сталій температурі кількість молекул, які випаровуються, не зміниться, тобто випаровування переважатиме над конденсацією. Це триватиме доти, поки знову встановиться динамічна рівновага. Отже, концентрація молекул, а значить, і

тиск насиченої пари над вільною поверхнею рідини при сталій температурі не залежать від об'єму.

Якщо вся рідина випарувалась, а об'єм посудини продовжує збільшуватись, то концентрація молекул зменшується, а отже, зменшується тиск пари, пара стає ненасиченою. Якщо, навпаки, ненасичену пару стискати, то нарешті уся речовина може перейти в рідкий стан, і для дальшого стискання рідини внаслідок її малої стисливості треба різко збільшити тиск. Цей процес графічно можна подати у вигляді ізотерми при температурі T_1 (рис. 6.1). Ділянка ізотерми T_1B відповідає стисканню ненасиченої пари, BC – стисканню насиченої пари і рідини, наступна ділянка – стисканню рідини.

Тиск насичувальної пари не залежить від її об'єму, але залежить від температури.

Внаслідок підвищення температури з рідини почне випаровуватись більше молекул. Динамічна рівновага порушиться. Концентрація молекул пари зростатиме, поки знову встановиться динамічна рівновага. При цьому, очевидно, концентрація, а значить, і тиск будуть більші. Отже, із підвищенням температури тиск насиченої пари збільшується.

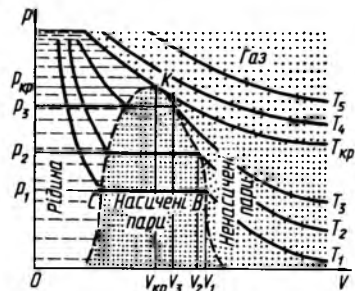


Рис. 6.1

На рис. 6.1 ізотерма, яка відповідає температурі $T_2 > T_1$, розміщена вище від ізотерми, яка відповідає T_1 .

Стан насиченої пари наближено описується рівнянням стану ідеального газу. Тиск насиченої пари можна визначити за формулою

$$p_n = nkT.$$

Якщо посудину, в якій є насичена пара, спочатку старанно було очищено від

центрів конденсації, тобто пилинок, то можна дістати так звану пересичену пару, тобто пару, тиск якої вищий, ніж це відповідає тиску насиченої пари при певній температурі.

Критичний стан речовини

Густина насиченої пари із підвищенням температури збільшується, а густина більшості рідин при нагріванні зменшується (через їх розширення). Із підвищенням температури значення цих густин зближуються і при деякій температурі, певній для кожної речовини, будуть однакові. При цій температурі зникає різниця між рідким і газоподібним станами. Такий стан речовини називають критичним, а температуру, при якій вона настає, – критичною. Поняття критичної температури вперше запровадив Д. І. Менделєєв (1860). Він назвав її “абсолютною температурою кипіння”; термін “критична температура” був запроваджений пізніше.

На графіку залежності тиску від об'єму (pV -діаграма, рис. 6.1) температурі T_1 відповідає тиск p_1 насиченої пари, температурі $T_2 > T_1$ – тиск $p_2 > p_1$. Із підвищенням температури горизонтальна ділянка ізотерми, яка відповідає двофазному стану, тобто рідині і її насиченій парі, зменшується і при температурі $T = T_{кр}$ стягується в одну точку K . Ця точка характеризується критичним тиском $p_{кр}$ і критичним об'ємом $V_{кр}$. Критичні температури різних речовин неоднакові, наприклад, для гелію $T_{кр} = 5$ К (тобто $t_{кр} = -268$ °С), а для води $T_{кр} = 647$ К (+374 °С).

Штрихова лінія на рис. 6.1 ділить pV -діаграму на три області. Справа від неї область ненасичувальної пари, зліва – область, що відповідає рідині, всередині – область, яка характеризує двофазний стан, тобто рідину і пару. Вище від ізотерми, яка відповідає температурі $T_{кр}$, розміщена однофазна область – газ. Отже, при температурі, вищій від критичної, речовина перебуває в газоподібному стані і ніяким стисканням перетворити газ у рідину при цій температурі не можна. *Критична температура – це найвища температура, при якій газ можна перетворити в рідину.*

§ 65. Зміна температури при розширенні газів. Ефект Джоуля – Томсона

У процесі розширення реального газу робота виконується або за рахунок внутрішньої енергії, або за рахунок надання газу теплоти. Розглянемо випадок, коли газ, розширюючись, не виконує роботи проти

зовнішніх сил, тобто коли газ розширюється у вакуум. При цьому зовнішній тиск дорівнює нулю. Розширення газу у вакуум має супроводитися зниженням температури, оскільки між молекулами газу діють молекулярні сили; розширюючись, газ виконує роботу з подолання цих сил, внаслідок чого його внутрішня енергія, а отже, і температура зменшуються. Проте в деяких випадках цей процес супроводиться не охолодженням, а нагріванням газу, який розширюється.

Це явище описали Дж. Джоуль і У. Томсон, і тому його назвали *ефектом Джоуля – Томсона*.

Дослід Джоуля і Томсона полягав ось у чому. В трубці, що має адіабатну оболонку, встановлювали пористу перегородку (рис. 6.2). З одного боку перегородки газ був під тиском p_1 , з другого – під тиском $p_2 > p_1$. Внаслідок різниці тисків газ повільно адіабатно переходить крізь перегородку з однієї частини трубки в іншу. При цьому змінюється температура, яку вимірювали термометрами в трубці з обох боків перегородки. Було з'ясовано, що більшість газів при кімнатній температурі в процесі розширення охолоджується ($\Delta T < 0$ K), тобто спостерігається *додатний ефект Джоуля – Томсона*, а для водню і гелію температура підвищується ($\Delta T > 0$ K), тобто спостерігається *від'ємний ефект Джоуля – Томсона*. Якщо газ, розширюючись, не нагрівається і не охолоджується, то ефект Джоуля – Томсона дорівнює нулю. Такий стан характеризується *температурою інверсії – найбільшим значенням температури, при якій може змінитися знак явища*. Вище цієї температури ефект завжди від'ємний. Інверсійна температура становить 200 K для водню, 1063 K для кисню і 2073 K для вуглекислого газу.

Явище Джоуля – Томсона є наслідком залежності внутрішньої енергії реального газу не тільки від температури, а й від об'єму і наявності в молекул реального газу потенціальної енергії взаємодії. Для ідеальних газів ефект Джоуля – Томсона дорівнює нулю.

Додатний ефект Джоуля – Томсона використовують при стисканні газів для добування низьких температур, чого можна досягти двома способами: 1) якщо газ перебуває при температурі, нижчій від інверсійної і нижчій від критичної, то його температура при розширенні знижується внаслідок виконання роботи проти молекулярних сил; 2) температура газу знижується при адіабатному розширенні внаслідок виконання роботи проти зовнішніх сил.

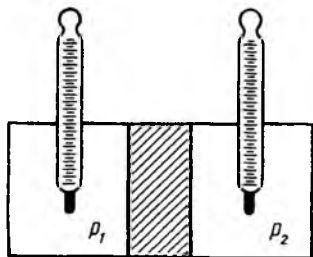


Рис. 6.2

Тепер досягнуто температур, близьких до 0 K (порядку тисячних часток кельвіна). Низькі температури широко використовують у наукових і технічних цілях.

§ 66. Зрідження газів і використання утвореної рідини в техніці

Зрідження газів

Перехід газів у рідкий стан називається *зрідженням газів*. Довгий час деякі гази, зокрема кисень і азот, не вдавалось перетворити в рідини. Вважали, що рідкий кисень і рідкий азот взагалі існувати не можуть. Причину невдачі зрідження цих газів уперше пояснив Д. І. Менделєєв: газ можна перетворити в рідину, якщо його температура нижча від критичної, а тиск вищий від критичного; отже, температуру газів перед зрідженням треба спочатку знижувати до значення $T_{кр}$.

Гази, які мають досить високу (вище 220 K) критичну температуру, звичайно зріджують, стискаючи, а потім охолоджуючи його до температури, яка нижча від температури кипіння. У такий спосіб добувають вуглекислоту ($T_{кр} = 304,25$ K), хлор ($T_{кр} = 417,15$ K), аміак ($T_{кр} = 405,55$ K) тощо.

Для добування рідкого кисню ($T_{кр} = 154,45$ K), азоту ($T_{кр} = 126,05$ K), водню ($T_{кр} = 33,25$ K) і особливо гелію ($T_{кр} = 5,25$ K) використовують спеціальні установки – *детандери*.

Детандер – це пристрій, в якому потрібної для зрідження газів температури досягають тим, що охолоджуваний газ виконує роботу не тільки проти сил молекулярної взаємодії, а й проти зовнішніх сил. Найдосконаліший турбодетандер реактивного типу розробив радянський фізик П. Л. Капіца (1938)*. У цьому пристрої спочатку стиснений газ, обертаючи турбіну і розширюючись при цьому, виконує роботу проти зовнішніх сил, дуже охолоджується і конденсується. Детандери широко застосовують у промисловості.

Використання отриманої рідини в техніці

Велике значення для розвитку техніки має отримання рідкого повітря. З рідкого повітря легко отримати азот і кисень. Якщо рідке повітря нагрівати, то першим випаровуватиметься азот при 77 K, а потім кисень при 90 K.

Оскільки рідке повітря має досить значний вміст кисню, то воно сприяє горінню. Вугільний порошок, просочений рідким повітрям, – це речовина, яка за вибуховою силою не поступається динаміту.

* П. Л. Капіца (1894–1984) – учень Резерфорда, лауреат Нобелівської премії.

Рідке повітря широко застосовують для збагачування пальної суміші двигуна літака під час польотів у стратосфері, для підсилення доменного процесу тощо.

При температурі зріджених газів різні речовини переходять у твердий стан. Так, наприклад, обливаючи рідким повітрям ртуть, можна перетворити її в твердий стан. Зануривши в посудину з рідким повітрям пробірку зі спиртом, дістають твердий спирт, температура замерзання якого 159 К.

Фізичні властивості багатьох речовин при температурі зріджених газів значно змінюються. Так, наприклад, ртуть і цинк стають ковкими, свинець – пластичний метал – стає пружним, як сталь. Деякі тіла, пружні при звичайній температурі, будучи охолодженими в зрідженому газі, стають крихкими, як скло. Так, наприклад, кусок гуми після охолодження в рідкому повітрі легко ламається. При температурах, близьких до 0 К, у багатьох речовин опір електричному струму зменшується до нуля. Це явище назвали *надпровідністю*.

Зріджені гази швидко випаровуються. Для їх збереження Дьюар сконструював спеціальні посудини з подвійними стінками, з внутрішнього простору між якими відкачано повітря. У такий спосіб майже усувається теплообмін вмісту посудин із зовнішнім середовищем через конвекцію і теплопровідність. Для зменшення нагрівання через випромінювання стінки виготовляють дзеркальними. Одна з посудин Дж. Дьюара – термос, призначений для збереження їжі в гарячому вигляді.

§ 67. Абсолютна і відносна вологість повітря. Точка роси

Абсолютна і відносна вологість повітря

У природі є багато відкритих водойм, з поверхні яких безперервно випаровується вода. Тому до складу атмосфери входить і пара води. Кількість водяної пари в повітрі характеризує його *абсолютну вологість* – величину, що показує, яка маса пари води міститься в 1 м^3 повітря. Крім абсолютної вологості, треба знати й ступінь насичення повітря паром. Він характеризується *відносною вологістю* – величиною, що дорівнює відношенню абсолютної вологості D до кількості D_0 водяної пари в 1 м^3 , яка насичує повітря при певній температурі; відносну вологість визначають у процентах:

$$f = \frac{D}{D_0} \cdot 100\%. \quad (6.2)$$

Якщо повітря не містить пари води, то його абсолютна і відносна вологості дорівнюють нулю.

Точка роси

Абсолютну вологість повітря можна визначити за точкою роси. *Точці роси відповідає температура, при якій пара, що є в повітрі, стає насиченою.* Значення D_0 для різних температур зведені в довідкову таблицю. Отже, знаючи точку роси і температуру повітря і взявши з таблиць значення D і D_0 , можна визначити f .

Гігрометр

Прилади для визначення вологості повітря називаються *гігрометрами*. Робота найпростішого гігрометра ґрунтується на тому, що знежирена людська волосина видовжується від збільшення вологості повітря.

Якщо таку волосину C (рис. 6.3) обмотати навколо легенького блока, прикріпивши один кінець його до металевої рами, а до другого підвісити тягарець P , то при зміні довжини волосини покажчик S , прикріплений до блока, рухатиметься.

Попередньо проградувавши цей прилад, можна безпосередньо по ньому визначати відносну вологість.

Волосяний гігрометр застосовують тоді, коли не потрібна велика точність визначення вологості повітря.

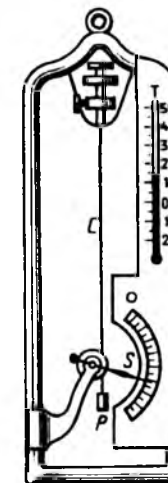


Рис. 6.3

Психрометр

Точніше вологість повітря визначають за допомогою психрометра (рис. 6.4). Він складається з двох термометрів, резервуар одного з них обгорнуто марлею M , яка опущена в посудину Π з водою. Вода, піднімаючись по капілярах марлі, змочує резервуар термометра. Якщо повітря не насичене водяною паром, то вода з марлі

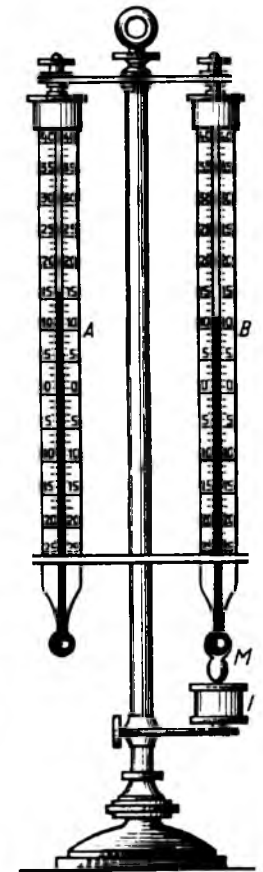


Рис. 6.4

випаровується, охолоджуючи термометр, тому термометр з вологим резервуаром покаже нижчу температуру, ніж термометр з сухим резервуаром. Чим сухіше повітря, тим більша різниця показань сухого і мокрого термометрів. За цією різницею з психрометричних таблиць визначають відносну вологість повітря. Якщо повітря насичене водяною парою, то показання термометрів будуть однакові, відносна вологість становитиме 100 %, що можливо, наприклад, під час дощу, туману тощо.

§ 68. Взаємодія атмосфери і гідросфери

Атмосфера

Повітряну оболонку Землі називають *атмосферою* (від грец. “атмос” – пара, “сфера” – куля). Атмосфера захищає рослинний і тваринний світ від згубної дії ультрафіолетового і космічного випромінювань. Без атмосфери наша планета була б такою ж позбавленою життя, як і Місяць. Сонячне проміння розжарило б освітлений бік Землі, а на неосвітленому боці був би крижаний холод. Атмосфера огортає Землю, зберігаючи теплоту, одержану від Сонця.

Основна маса атмосфери міститься в приземному шарі повітря, який називають *тропосферою*. На її частку припадає близько 90 % маси всієї атмосфери. Верхня межа тропосфери розміщена на висоті 10 км у полярних широтах і на висоті 17 км в екваторіальних.

Тепло тропосфера одержує в основному від земної поверхні. Температура тропосфери зменшується з висотою, від’ємний перепад температури становить близько 1 К на кожні 100 м. У верхній частині тропосфери – *тропопаузі* – зниження температури різко сповільнюється, і в шарі завтовшки близько 2 км температура майже не змінюється.

Усі явища, пов’язані із зміною погоди на Землі, відбуваються в тропосфері. Велике значення при цьому мають випаровування і конденсація води. З поверхні різних водойм щодоби випаровується близько $7 \cdot 10^3$ км³ води і майже стільки ж випадає у вигляді опадів, тому в середньому кількість водяної пари в атмосфері приблизно стала.

Утворена біля поверхні Землі водяна пара захоплюється конвективним рухом повітря. Піднімаючись угору на висоту 1,5–2 км і охолоджуючись, вона приходиться у стан насичення і конденсується. З утворених крапельок, які вдержуються висхідними потоками повітря, утворюються хмари. Розміри цих крапельок малі, порядку 0,01 мм.

Якщо хмари ущільнюються, то в них утворюються дощові краплі, їхні розміри досягають 1–5 мм. Такі краплі вже не можуть утриматися в хмарі, і падає влітку дощ, а взимку сніг.

Конденсація пари і утворення хмар пов’язані з виділенням теплоти. Ці процеси мають істотне значення в енергетичному режимі нижньої тропосфери.

Вище від тропосфери розміщена *стратосфера*. Стратосфера характеризується додатним градієнтом температури. Температура нижньої межі стратосфери 200–210 К, верхньої – порядку 280 К. Висота тропосфери до 50–55 км, середній тиск близько 1000 Па.

Вище від тропосфери розміщена *мезосфера*. Тропосферу і мезосферу відокремлює невеликий за товщиною шар із сталою температурою – *стратопауза*. Мезосфера сягає висоти 80 км. Температура мезосфери зменшується з висотою, і в її верхній межі вона має порядок 160 К.

Наступний шар атмосфери – *термосфера*, в ньому температура знову починає підвищуватись і на висоті 600 км досягає 1200 К вночі і 1700 К вдень. Саме на цих висотах – у термосфері – обертаються навколо Землі її штучні супутники і космічні кораблі. Тиск в термосфері порядку 10 Па, тобто концентрація газу незначна, тому висока температура не впливає на нагрівання поверхні супутників і космічних кораблів.

На висоті 800 км розміщений зовнішній шар атмосфери – *екзосфера*, який поступово переходить у міжпланетне середовище.

Гідросфера

Водна оболонка Землі – *гідросфера* – відрізняється від атмосфери тим, що вона покриває не всю земну кулю, а лише 70,8 % її поверхні. До водної оболонки належать і води суші – річки і озера, підземні води, а також гірські і покривні льодовики. Найбільше скупчення води на поверхні Землі – це *Світовий океан*, на його частку припадає 94 % всієї гідросфери. Материка і острови ділять його на окремі океани, моря, протоки і затоки. Об’єм Світового океану досягає $1,37 \cdot 10^9$ км³.

З поверхні океану щороку випаровується близько 450 тис. км³ води. Обчислення показують, що для випаровування всього об’єму океану потрібно було б 3000 років, але річки повертають океану ту кількість води, яку суша дістає за рахунок вологи, що випарилась з його поверхні. Отже, запас води в океані зовсім замінюється за 3000 років. Води в річках замінюються кожні 12 діб, тобто 30 разів за рік. Найактивніша пара атмосфери, вона замінюється кожні 10 діб. Таким чином, уся маса води на Землі перебуває в безперервному русі – у кругообігу. Вода випаровується з поверхні океану і суші, поповнюючи запаси атмосферної вологи. З атмосфери у вигляді дощу і снігу вона повертається в океан і на сушу.

У Світовому океані зародилося життя. Рослинність, яка виникла в ньому, збагатила атмосферу киснем і зробила її придатною для життя тварин.

Досі діяльність рослинних організмів в океані, які розкладають воду на водень і кисень, – основне джерело вільного кисню в атмосфері.

Океан, атмосфера і суша безперервно обмінюються речовинами. Волога, яка випарилась з поверхні гідросфери, переноситься вітрами на материки і, випадаючи у вигляді опадів, зрошує землю.

У всіх природних водах у розчиненому стані містяться різні гази, переважно азот, кисень і вуглекислий газ. Вуглекислий газ, що надходить у воду з атмосфери, використовують рослини в процесі фотосинтезу. За рік на побудову своїх тканин рослинний планктон і бактерії забирають з вуглекислого газу близько 100 млрд т вуглецю. В атмосфері міститься у 60 разів менше вуглекислого газу, ніж в океані.

Відомо, що вода має велику теплоємність: 1 м³ води, охолонувши на 1 К, може нагріти на 1 К понад 3300 м³ повітря. Внаслідок цього

океани і моря є акумулятором і розподільником сонячного тепла на поверхні нашої планети.

§ 69. Кипіння.

Залежність температури кипіння від тиску

Кипіння

У процесі випаровування найшвидші молекули рідини залишають поверхню рідини, подолавши сили молекулярної взаємодії і перетворившись у молекули пари (див. § 63).

Окремим випадком випаровування є *кипіння*. Це процес інтенсивного пароутворення не тільки з вільної поверхні, а й з усього об'єму рідини.

Нагріємо рідину у відкритій посудині. Усяка рідина містить деяку кількість розчинених газів. Із підвищенням температури розчинність газу зменшується. Газ виділяється з рідини, осідаючи у вигляді дрібних бульбашок на внутрішніх стінках посудини. З підвищенням температури розміри бульбашок зростають, а потім вони спливають.

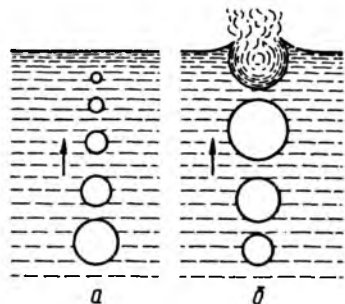


Рис. 6.5

Потрапляючи у верхні, менш нагріті шари рідини, вони зменшуються в розмірах внаслідок конденсації пари всередині їх (рис. 6.5, а).

Коли температура рідини вирівняється, об'єм бульбашок при підніманні зростає. Відбувається це тому, що тиск насиченої пари всередині бульбашки не змінюється: $p_n = nkT$, а гідростатичний тиск ρgh зменшується. При сталій температурі

тиск насиченої пари від об'єму не залежить, увесь простір усередині бульбашки в процесі її зростання заповнений насиченою паром. Коли бульбашка досягне поверхні рідини, то тиск насиченої пари в ній практично дорівнює атмосферному тиску на поверхні рідини. Насичена пара, яка заповнює бульбашку, викидається в атмосферу (рис. 6.5, б). Відбувається кипіння.

Рідина кипить при однаковій температурі всієї рідини, коли тиск насичувальної пари цієї рідини дорівнює зовнішньому тиску.

Кожна рідина за нормальних умов кипить при певній температурі, при якій тиск насичувальної пари цієї рідини дорівнює зовнішньому тиску на її поверхню. Цю температуру називають *температурою кипіння*.

Теплота, яка надходить до рідини в процесі кипіння, витрачається на збільшення потенціальної енергії молекул, на роботу проти зовнішнього тиску під час утворення і руху бульбашок пари, на компенсацію втрат теплоти, пов'язаних з процесом випаровування рідини в навколишнє середовище.

З цих міркувань зрозуміло, що температура кипіння рідини залежить від зовнішнього тиску. Чим менший зовнішній тиск, тим нижча температура кипіння рідини. Цим пояснюється добре відомий факт, що на великих висотах, де атмосферний тиск знижений, рідини киплять при температурах, нижчих, ніж на рівні моря. Навпаки, в котлах парових машин, де тиск досягає порядку 15 атм ($15 \cdot 10^5$ Па), температура кипіння води близька до 200 °С (473 К).

Коли кажуть про температуру кипіння рідини, не вказуючи тиску, мають на увазі температуру кипіння при нормальному тиску (760 мм рт. ст. = $1,02 \cdot 10^5$ Па).

Рівняння теплового балансу при пароутворенні і конденсації

Кількість теплоти, яка потрібна для перетворення на пару рідини, нагрітої до температури кипіння, визначають за формулою

$$Q = rm, \quad (6.3)$$

де r – питома теплота пароутворення; m – маса рідини, перетвореної на пару.

Із закону збереження енергії випливає, що в процесі конденсації пари в рідину виділяється кількість теплоти, яку визначають за формулою (6.3).

Питома теплота пароутворення для певної рідини зменшується з підвищенням температури. Питома теплоту пароутворення визначають на досліді. Як правило, її визначають за теплотою конденсації. Для цього

пару речовини, питому теплоту пароутворення якої визначають, впускають у холодну рідину тієї самої речовини, що міститься в калориметрі. Знаючи температуру кипіння T_k , масу рідини m_1 і її температуру до впускання пари (T_1) і після (T_2), складають рівняння теплового балансу. Нехтуючи кількістю теплоти, яка виходить у навколишній простір, дістанемо

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3,$$

де $Q = rm$ – кількість теплоти, яка виділяється при конденсації пари; $Q_1 = c_1 m (T_k - T_2)$ – кількість теплоти, яку віддала рідина, що утворилася з пари; $Q_2 = c_1 m_1 (T_2 - T_1)$ – кількість теплоти, яку одержала рідина, що міститься в калориметрі; $Q_3 = c_2 m_2 (T_2 - T_1)$ – кількість теплоти, яку одержав калориметр; c_1, c_2 – питомі теплоємності рідини і речовини калориметра. Звідси визначимо питому теплоту пароутворення:

$$r = \frac{c_1 m_1 (T_2 - T_1) + c_2 m_2 (T_2 - T_1) - c_1 m (T_k - T_2)}{m}$$

§ 70. Перегріта пара та її використання в техніці

Пара, яка має температуру, вищу від температури насичення при тому самому тиску, є перегрітою. Перегріту пару застосовують як робоче тіло в теплових двигунах, турбінах тощо.

Розвиток техніки залежить від уміння якомога повніше використовувати величезні запаси внутрішньої енергії, яка міститься в паливі. Застосовувати внутрішню енергію – це означає дістати за рахунок неї корисну роботу, а це, в свою чергу, означає, що для використання внутрішньої енергії її треба спочатку перетворити в механічну. Це можна здійснити різними способами, наприклад, перевести енергію палива в енергію газу або пари. Розширюючись, газ виконує роботу і при цьому охолоджується. Його внутрішня енергія переходить у механічну енергію рухомого поршня або обертової турбіни. Добуту в котлах перегріту пару (суху) направляють до парової турбіни. Температура перегрітої пари така велика, що ККД таких турбін перевищує 45 %. Після виконання роботи в турбіні пара має ще високу температуру і значний запас енергії, тому її використовують в опалювальних системах.

Енергію водяної пари широко застосовують для роботи парових турбін теплоелектростанцій, парових машин, для виробничих і побутових потреб.

§ 71. Поняття про атмосферу планет

Усі планети Сонячної системи оточені атмосферою – шаром газів, який утримується біля поверхні планет силами тяжіння.

Виявлена під час космічних і астрофізичних досліджень відмінність хімічного складу атмосфери планет Сонячної системи пояснюється відмінністю еволюції цих планет.

Атмосфера Землі обертається разом із Землею як єдине ціле.

Її маса приблизно дорівнює $5 \cdot 10^{18}$ кг. Склад атмосфери біля поверхні Землі: 78,1 % азоту, 21 % кисню, 0,9 % аргону, незначні частки вуглекислого газу, водню, гелію, неону та інших газів. На висоті 20–25 км розміщений шар озону, який захищає живі організми на Землі від шкідливого короткохвильового космічного випромінювання. У нижніх шарах атмосфери міститься ще водяна пара. Вище 100 км склад атмосфери починає змінюватися з висотою. На дуже великих висотах переважають гелій і водень.

Тиск і густина повітря в атмосфері з висотою також спадають.

Атмосфера відіграє важливу роль у тепловому балансі планет. Водяна пара і вуглекислий газ атмосфери Землі значною мірою поглинають теплове проміння, захищаючи Землю від охолодження. Отже, атмосфера створює *парниковий ефект* і зменшує добові й сезонні коливання температури.

Атмосфера на інших планетах значно відрізняється від земної. Так, наприклад, атмосфера Венери складається з 97 % вуглекислого газу, 2 % азоту, 1 % кисню. Такий склад атмосфери і її висока густина (тиск на поверхні досягає 100 атм) підсилюють парниковий ефект. Хоча вуглекислий газ на Венері переважає в складі її атмосфери, а на Землі становить лише незначну частку атмосфери, загальний вміст вуглекислого газу на Венері і Землі приблизно однаковий. Тільки на Землі практично вся вуглекислота зв'язана в осадових породах, а на Венері вона вивільнилася в атмосферу. На Землі є такі потужні поглиначі вуглекислого газу, як океан, рослинний світ, що разом з помірною температурою сприяє його розміщенню в поверхневих породах. На Венері поглинання вуглекислого газу регулюється лише мінералами поверхні, які при високій температурі (≈ 750 К) розкладаються і виділяють вуглекислий газ.

Малий вміст кисню в усіх досліджених атмосферах, крім земної, пояснюється тим, що він є результатом життєдіяльності рослинного світу, який на жодній планеті не дістав такого розвитку, як на Землі.

В атмосфері Марса виявлено вуглекислий газ і водяну пару, тиск атмосфери дуже малий і не перевищує 1 кПа. В атмосфері Меркурія – вуглекислий газ, але оскільки поверхня Меркурія нагрівається до 620 К, то атмосфери на планеті фактично немає.

Атмосфера планет-гігантів (Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон) значно відрізняється від атмосфери планет земної групи. У складі атмосфери планет-гігантів переважають водень, аміак, метан, гелій. Це пояснюється тим, що при утворенні планет Сонячної системи з газопилової хмари водень і гелій перемістились на периферію Сонячної системи, а важчі елементи залишилися навколо Сонця.

Короткі висновки

- Конденсація і пароутворення відбуваються тільки в процесі обміну енергією між навколишнім середовищем і речовиною.
- Між рідиною і паром над нею може бути динамічна рівновага, тобто кількість молекул, які залишають рідину, дорівнює кількості молекул, які повертаються до неї з пари за той самий час.
- Пару, яка перебуває в динамічній рівновазі з рідиною, називають насиченою. Тиск насиченої пари визначається лише температурою і не залежить від об'єму.
- До складу атмосфери Землі входить водяна пара. Величину, яка визначає кількість водяної пари в 1 м^3 повітря, називають абсолютною вологістю. Ступінь насичення повітря паром характеризує відносна вологість.
- Уся маса води на Землі перебуває в безперервному русі – кругообігу. Вода, випаровуючись з поверхні Світового океану, поповнює запаси атмосферної вологи. З атмосфери у вигляді дощу і снігу вона повертається в океан і на сушу.
- Океан, атмосфера і суша безперервно обмінюються речовинами.
- Рідина кипить при температурі, коли тиск насиченої пари цієї рідини дорівнює зовнішньому тиску.
- Температура кипіння підвищується із збільшенням зовнішнього тиску.
- Усі планети Сонячної системи мають атмосферу. Склад атмосфери планет земної групи відмінний від складу атмосфери планет-гігантів.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що називається випаровуванням? конденсацією? 2. Від яких умов залежить швидкість випаровування рідини? 3. Як пояснити випаровування з точки зору молекулярно-кінетичної теорії? 4. Наведіть приклади насиченої і ненасиченої пари. 5. Поясніть незалежність тиску насиченої пари при сталій температурі від об'єму. 6. Який стан речовини називають критичним? 7. Якими способами можна перетворити ненасичену пару в насичену? 8. Де використовують зріджений газ? 9. Що таке абсолютна вологість повітря? відносна вологість повітря? 10. Поясніть термін "точка роси". 11. Дайте поняття кипіння і залежність температури кипіння від тиску. 12. Що таке перегріта пара? її отримання і використання в техніці. 13. Який склад атмосфери Землі? Венери? 14. Що таке парниковий ефект?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Котел об'ємом $V = 5 \text{ м}^3$ заповнили водою, маса якої $m_1 = 20 \text{ кг}$, і нагріли її до температури $t = 180 \text{ }^\circ\text{C}$. Знайти тиск і масу водяної пари в котлі. Густина насиченої пари води при цій температурі $\rho = 5,05 \text{ кг/м}^3$.

Дано: $V = 5 \text{ м}^3$; $m_1 = 20 \text{ кг}$; $T = (273 + 180) \text{ К} = 453 \text{ К}$; $\rho = 5,05 \text{ кг/м}^3$;

$M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Знайти: m_2 , p .

Розв'язання. Маса пари, потрібна для насичення котла об'ємом V при температурі T ,

$$m = \rho V; \quad m = 5,05 \text{ кг/м}^3 \cdot 5 \text{ м}^3 = 25,25 \text{ кг}.$$

Ми бачимо, що $m > m_1$, тобто вся вода в котлі перетвориться в пару; отже, $m_1 = m_2$ і ця пара буде ненасиченою.

Тиск ненасиченої пари визначасмо з рівняння стану

$$pV = \frac{m_2}{M} RT,$$

звідки

$$p = \frac{m_2 RT}{MV}.$$

Обчислення

$$p = \frac{20 \text{ кг} \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 453 \text{ К}}{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \cdot 5 \text{ м}^3} = 8,4 \cdot 10^5 \text{ Па} = 840 \text{ кПа}.$$

Задача 2. Абсолютна вологість повітря при температурі $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $D_1 = 0,05 \text{ кг/м}^3$. Знайти абсолютну вологість D_2 при зниженні температури до $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Тиск насиченої пари при температурі t_2 дорівнює 1226 Па .

Дано: $T_1 = (273 + 60) \text{ К} = 333 \text{ К}$; $D_1 = 0,05 \text{ кг/м}^3$; $T_2 = (273 + 10) \text{ К} = 283 \text{ К}$; $\rho_2 = 1226 \text{ Па}$; $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Знайти: D_2 .

Розв'язання. Визначимо густину насиченої пари при температурі T_2 , виходячи з рівняння стану:

$$p_2 V = \frac{m}{M} RT_2.$$

Оскільки $m/V = \rho$, то рівняння стану набуде вигляду $p_2 = \rho RT_2/M$, звідки $\rho = p_2 M / (RT_2)$.

Обчислення:

$$\rho = \frac{1226 \text{ Па} \cdot 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}^{-1}}{8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 283 \text{ К}} = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Густина насиченої пари при температурі T_2 менша від ρ_1 , тобто $\rho < \rho_1$. Отже, при охолодженні до температури T_2 частина пари сконденсується і абсолютна вологість повітря визначатиметься густиною насиченої пари, тобто $\rho_2 = \rho$.

Задача 3. У посудину, яка містить 3 л води при 20 °С, занурили шматок заліза масою 3 кг, нагрітий до 540 °С. Від цього температура води підвищилась до 55 °С і частина її випарувалась. Знайти масу води, яка перетворилась у пару.

Дано: $V = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $T_1 = (20 + 273) \text{ К} = 293 \text{ К}$; $m = 3 \text{ кг}$; $T_2 = (540 + 273) \text{ К} = 813 \text{ К}$; $\theta = (55 + 273) \text{ К} = 328 \text{ К}$; $c_1 = 0,46 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $c_2 = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $r = 22,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$; $\rho = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Знайти: m_2 .

Розв'язання. Рівняння теплового балансу

$$cm(T_2 - \theta) = c_1 m_1 (\theta - T_1) + m_2 r,$$

звідки

$$m_2 = [cm(T_2 - \theta) - c_1 m_1 (\theta - T_1)] / r,$$

де $m_1 = \rho V$.

Обчислення:

$$m_2 = \frac{0,46 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 3 \text{ кг} (813 - 328) \text{ К} - 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 (328 - 293) \text{ К}}{22,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}} = 0,103 \text{ кг}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Тиск водяної пари при 27 °С дорівнює 1330 Па. Який буде тиск пари, якщо його температура зміниться до 127 °С, а об'єм – від 2 до 4 л (від 3 до 4 л)? Який буде тиск пари, якщо об'єм зменшиться від 2 до 0,5 л, а температура знизиться до 7 °С? Якою буде ця пара?
2. При 17 °С насичену водяну пару відокремлено від рідини і нагріто при сталому об'ємі до 27 °С. Який буде її тиск?
3. Визначити кількість теплоти, потрібну для того, щоб нагріти до кипіння 3 кг води, що має температуру 20 °С, і перетворити в пару 200 г води.
4. Яка кількість стоградусної водяної пари потрібна для нагрівання 10 кг води від 10 до 60 °С?
5. Чи може бути вода в рідкому стані при температурі 300 °С?
6. При якій температурі випадає роса, якщо абсолютна вологість повітря $7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$?
7. З якої висоти має падати крапля дощу, температура якої 20 °С, щоб під час удару об Землю вона зовсім випаровувалась? Опір повітря не враховувати.

8. Температура повітря 2 °С. Відносна вологість 60 %. Чи випаде вночі іній, якщо температура ґрунту знизиться до $-3 \text{ }^\circ\text{C}$?

9. У підвалі при 8 °С відносна вологість повітря дорівнює 100 %. На скільки треба підвищити температуру повітря у підвалі, щоб вологість зменшилась до 60 %?

ГЛАВА 7

ВЛАСТИВОСТІ РІДИН

§ 72. Характеристика рідкого стану речовини

Рідина – це агрегатний стан речовини, проміжний між газоподібним і твердим. Проте рідини внаслідок різного характеру теплового руху молекул істотно відрізняються від газів і твердих тіл. Відповідь на питання, до чого ближчі властивості рідин (до газу чи твердого тіла), залежить від того, при яких температурах і тисках їх порівнюють. Якщо сили молекулярної взаємодії в газах починають проявлятися при низьких температурах і великих тисках, то в рідинах ці сили мають основне значення. Молекулярний тиск у рідинах дуже великий. Звернемо увагу, що молекулярний тиск – це не тиск у тому розумінні, як це прийнято в газових законах, а умовне позначення величини, яка враховує дію молекулярних сил. Питомий об'єм рідин у тисячі разів менший від питомого об'єму газу; отже, молекулярний тиск у рідинах у мільйони разів більший, ніж у газах. Розрахунок молекулярного тиску для води дає значення близько 1100 МПа. Молекулярний тиск можна обчислити за тією роботою, яку виконують молекули, проходячи крізь поверхневий шар рідини. Якщо рідина перебуває в стані рівноваги, то молекули рідини коливаються навколо деякого положення рівноваги. У цьому разі сили притягання зрівноважені силами відштовхування.

Великим значенням молекулярного тиску пояснюється той факт, що рідина практично нестислива. Справді, перебуваючи під величезним молекулярним тиском, рідина практично не реагує на зміни зовнішнього тиску.

Рідина має властивість *текучості*, набирає форми посудини, в яку її налито.

Розглянемо окрему молекулу, розміщену всередині великого об'єму рідини (рис. 7.1). На цю молекулу діють сусідні молекули, розміщені на відстані $r_0 \approx 1 \text{ нм}$ (радіус молекулярної взаємодії). Якщо радіусом молекулярної взаємодії обмежити сферу, в центрі якої лежить молекула, що розглядається, то в цій області розмістяться

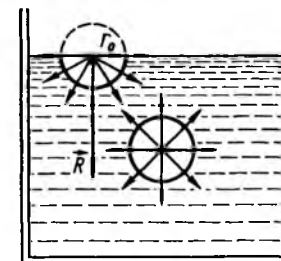


Рис. 7.1

всі молекули, впливу яких зазнає взята молекула. Оскільки густина рідини однакова в усьому об'ємі, то рівнодійна молекулярних сил, які діють на розглядувану молекулу, дорівнює нулю. Молекули рідини притягуються одна до одної, але оскільки результуюча сил притягання дорівнює нулю, то молекули під дією цих сил зовсім не переміщуються.

Під час зсування шарів один відносно одного в рідині виникають сили внутрішнього тертя, які залежать від коефіцієнта внутрішнього тертя (*динамічної в'язкості*).

Чим більша динамічна в'язкість, тим в'язкіша рідина. Наприклад, вода – більш в'язка речовина, ніж ацетон, але менш в'язка, ніж гліцерин. У більшості газів значення динамічної в'язкості у 100–200 раз менші, ніж у води. В'язкість рідини залежить від температури і тиску. З підвищенням температури в'язкість рідини швидко зменшується, зростання тиску веде до збільшення в'язкості рідини.

Численні дані свідчать про те, що за структурою рідини ближчі до твердих тіл, ніж до газів. У рідинах існує так званий *ближній порядок*, тобто в рідинах можна назвати положення молекул, близьких до першої. Дані рентгеноструктурного аналізу показують, що структура рідини подібна до структури твердого тіла, з якого вона утворилась, тільки ця структура виражена слабше.

Радянський фізик Я. І. Френкель розробив теорію, згідно з якою молекула рідини протягом деякого часу коливається навколо своїх положень рівноваги, ніби перебуваючи у вузлі кристалічних ґрат. Час “осілого життя” молекули рідини дуже малий ($\sim 10^{-10} - 10^{-12}$ с), після чого молекула рідини переходить у нове положення рівноваги (новий вузол). У найпростіших випадках пробіг молекули рідини збігається із *сталюю ґрат* – відстанню між двома сусідніми вузлами ґрат. Молекула, яка перебуває у вузлі ґрат, здійснює теплові коливання з амплітудою, яка менша за сталу ґрат. Це дає нам підстави вважати, що рідина має квазікристалічну будову (ніби кристалічну).

§ 73. Поверхневий натяг. Енергія поверхневого шару

Походження сил поверхневого натягу

На поверхні поділу рідини і її насиченої пари виникає сила, зумовлена різною молекулярною взаємодією суміжних середовищ.

Кожна молекула, розміщена всередині об'єму рідини, рівномірно оточена сусідніми молекулами і взаємодіє з ними, а рівнодійна цих сил дорів-

нює нулю (див. рис. 7.1). Проте у поверхневому шарі, товщину якого вважатимемо такою, що дорівнює радіусу молекулярної взаємодії (~ 1 нм), внаслідок неоднорідності оточення на молекулу діє сила R , не скомпенсована силами з боку інших молекул рідини. На таку молекулу діють сили, складові яких у вертикальній і горизонтальній площинах різні. Сили у вертикальній площині прагнуть втягти молекулу всередину рідини. Зазнаючи односторонньої дії, напрямленої всередину рідини, молекули поверхневого шару стискають рідину, чинять на неї тиск, який називають *молекулярним*.

Сили, які діють у горизонтальній площині, стягують поверхню рідини. Їх називають *силами поверхневого натягу**. Наприклад, якщо в розчин спирту у воді влити прованської олії (густина розчину дорівнює густині олії), то, перебуваючи в байдужій рівновазі, олія набуває форми кулі. Відомо, що з усіх можливих тіл, які мають однаковий об'єм, найменшу поверхню має куля. За реальних умов на рідину діє сила тяжіння; отже, в цьому разі їх дія скомпенсована: рідина набуває форми кулі, хоча звичайно сила тяжіння перешкоджає цьому.

Якщо на поверхню води помістити дрібні грудочки камфори, то вони швидко переміщатимуться по поверхні води, здійснюючи безладні рухи. Камфора, розчиняючись у воді, змінює поверхневий натяг води, а оскільки камфора розчиняється нерівномірно, то грудочки камфори переміщуються в бік, у якому в цей момент поверхневий натяг більший.

Поверхневий натяг

Це фізична величина, яка дорівнює відношенню сили F поверхневого натягу, прикладеної до межі поверхневого шару рідини і напрямленої по дотичній до поверхні, до довжини l цієї межі:

$$\alpha = \frac{F}{l}. \quad (7.1)$$

Одиниця поверхневого натягу – *ньютон на метр* (Н/м).

Поверхневий натяг різний для різних рідин і залежить від температури.

Як правило, поверхневий натяг зменшується із зростанням температури, і при критичній температурі, коли густини рідини і пари однакові, **поверхневий натяг рідини дорівнює нулю.**

* Під дією цієї сили поверхневий шар перебуває в стані постійної рівноваги. Сили поверхневого натягу змушують вільну поверхню скорочуватись.

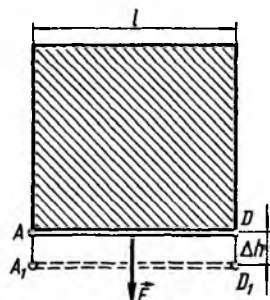


Рис. 7.2

Поверхневий натяг води при різних температурах і деяких інших рідин при 293 К

Речовина	$\alpha \cdot 10^3, \text{ Дж/м}^2$
Вода при:	
0 °С	75,5
30 °С	71,0
100 °С	58,9
Гас	24
Ефір етиловий	16,6
Мильний розчин	40
Ртуть	480
Спирт етиловий	22

На утворення поверхні рідини треба виконати певну роботу, яка є мірою вільної енергії поверхні.

Виконаємо такий дослід. На дротяну рамку (рис. 7.2) надінемо дротяну легку перекладину, яка може вільно переміщатися. Початкове положення перекладини A_1D_1 . Зануївши рамку в посудину з мильним розчином, затягнемо рамку мильною плівкою. Прагнучи скоротити свою поверхню, мильна плівка підніме перекладину вгору, і вона займе нове положення AD . Сила поверхневого

натягу, напрямлена вертикально вгору, чисельно дорівнює коефіцієнту поверхневого натягу, помноженому на $2l$, де l – ширина рамки (сили поверхневого натягу діють з двох боків плівки). Щоб зрівноважити силу поверхневого натягу, до рамки треба прикласти силу F , яка дорівнює їй і протилежно напрямлена.

За рахунок зменшення вільної енергії виконується робота $\Delta A = F\Delta h$. З (7.1) випливає, що $F = \alpha \cdot 2l$, тоді $\Delta A = F2l\Delta h$. Але $2l\Delta h = \Delta S$ – зміна площі поверхні плівки, тому $\Delta A = \alpha\Delta S$, звідки

$$\alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S}, \quad (7.2)$$

тобто *поверхневий натяг дорівнює відношенню роботи, яку треба виконати при сталій температурі, щоб утворити поверхню рідини площею ΔS , до площі цієї поверхні*. Вільна енергія поверхні рідини може переходити в інші форми енергії, або за рахунок неї може виконуватись робота щодо переміщення рідини.

§ 74. Явища на межі рідини з твердим тілом.

Капілярні явища

Змочування

Якщо рідина стискається з поверхнею твердого тіла, то можливі два випадки: рідина змочує тверде тіло і рідина не змочує його. Якщо, наприклад, краплі ртуті помістити на поверхню чистого заліза або на чисте скло, то на поверхні заліза вони розтікатимуться, а на поверхні скла



Рис. 7.3

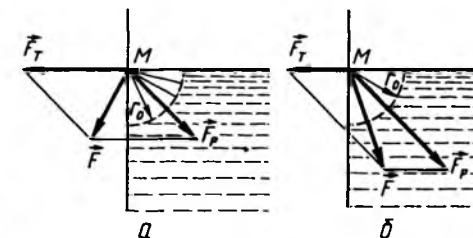


Рис. 7.4

матимуть форму, близьку до кулястої (рис. 7.3 *a, б*). Щоб з'ясувати причини цих явищ, розглянемо окрему молекулу на поверхні рідини, яка стикається із зануреним у рідину твердим тілом. Опишемо навколо молекули M (рис. 7.4) сферу дії молекулярних сил радіусом r_0 . Сила F_p дії всіх молекул рідини, що входять у сферу молекулярної дії, напрямлена по бісектрисі прямого кута, утвореного стінкою і поверхнею рідини, всередину рідини. Крім того, з боку твердого тіла на молекулу M діють молекулярні сили F_T , які напрямлені перпендикулярно до поверхні твердого тіла. Рівнодійну F цих двох сил визначають за правилом паралелограма. Залежно від співвідношення F_p і F_T рівнодійна напрямлена в бік твердого тіла (рис. 7.4, *a*) або рідини (рис. 7.4, *б*).

Якщо сили взаємодії молекул твердого тіла і молекул рідини більші від сил взаємодії між молекулами рідини, то рідина змочує тверде тіло (ртуть – залізо). В іншому випадку рідина не змочує твердого тіла (ртуть – скло).

Викривлену поверхню рідини у вузьких циліндричних трубах або біля стінок посудини називають *меніском*. Поверхня змочувальної рідини поблизу твердого тіла піднімається, і меніск – угнутий (рис. 7.5, *a*). Поверхня незмочувальної рідини поблизу твердого тіла трохи опускається, і меніск – опуклий (рис. 7.5, *б*).

За значенням крайового кута θ (кут між поверхнею твердого тіла і дотичною до поверхні рідини в точці M ; рис. 7.3 і 7.5) можна визначити, змочувальною чи незмочувальною відносно твердого тіла є рідина.

Для рідини, яка змочує поверхню твердого тіла, крайовий кут θ гострий ($\theta < \pi/2$); чим краще змочування, тим менший кут θ . Для повного змочування $\theta=0$. Для незмочувальних рідин крайовий кут змінюється в межах $\pi/2 < \theta < \pi$; при повному незмочуванні $\theta = \pi$.

У змочувальної рідини меніск угнутий, у незмочувальної – опуклий.

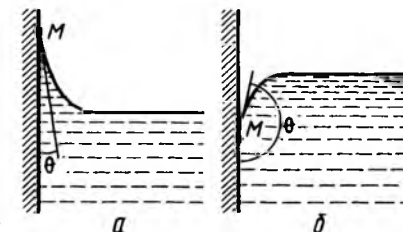


Рис. 7.5

Капілярні явища

Особливо добре спостерігати викривлення меніска рідини в тонких трубках, які називаються *капілярами*. Якщо в посудину з рідиною опустити капіляр, стінки якого змочуються рідиною, то рідина підніметься капіляром на деяку висоту h (рис. 7.6).

Це пояснюється тим, що викривлення поверхні рідини спричинює додатковий молекулярний тиск. Якщо поверхня опукла і має сферичну форму, то *додатковий тиск*

$$p_{\text{л}} = \frac{2\alpha}{r}, \quad (7.3)$$

де r – радіус кривизни поверхні.

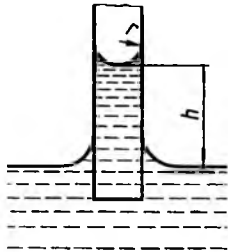


Рис. 7.6

Тиск $p_{\text{л}}$ алгебрично додається до атмосферного. Якщо меніск опуклий ($r > 0$), то сумарний тиск більший від атмосферного і рідина опускається капіляром. Якщо меніск угнутий ($r < 0$), то сумарний тиск менший від атмосферного і рідина піднімається капіляром. Рідина піднімається (або опускається) доти, поки гідростатичний тиск $p = \rho gh$ стовпа рідини заввишки h не компенсує додатковий (лапласівський) тиск $P_{\text{л}}$ (Лаплас установив залежність цього тиску від форми меніска). У цьому разі

$$\frac{2\alpha}{r} = \rho gh, \quad (7.4)$$

де ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння.

З (7.4) можна визначити

$$h = \frac{2\alpha}{\rho gr}. \quad (7.5)$$

Явище капілярності у побуті, природі і техніці

Явище капілярності відіграє величезну роль у найрізноманітніших процесах, які відбуваються в природі. Наприклад, проникнення вологи з ґрунту в рослини, стебла і листя зумовлене капілярністю. Клітини рослини утворюють капілярні канали, і, як видно з формули (7.5), чим менший радіус капіляра, тим вище по ньому піднімається рідина. Процес кровообігу також пов'язаний з капілярністю. Кровоносні судини – капіляри.

Особливо велике значення має капілярність ґрунту. Найдрібнішими судинами волога з глибини переміщується до поверхні ґрунту. Якщо треба зменшити випаровування вологи, то ґрунт розпушують, руйнуючи ка-

піляри. Для збільшення припливу вологи з глибини ґрунт коткують, збільшуючи кількість капілярних каналів. У техніці капілярні явища мають велике значення в процесах сушіння, в будівництві.

§ 75 . Внутрішнє тертя в рідині. В'язкість

Сила внутрішнього тертя

Потік рідини (газу) може бути *ламінарним* або *турбулентним*. У разі ламінарної (шаруватої) течії кожний шар потоку переміщується, не змішуючись з іншими шарами. При турбулентній (вихровій) течії утворюються вихори, різні шари рідини або газу перемішуються.

Із збільшенням швидкості ламінарна течія може перейти в турбулентну, а швидкість, при якій відбувається цей перехід, називають *критичною*.

Під час течії по трубі шари рідини ковзають один по одному, переміщуючись з різними швидкостями. При цьому шари рідини, які прилягають до стінок труби, рухаються повільніше, ніж шари, віддалені від стінок. Найбільшу швидкість мають шари, розміщені вздовж осі труби. Ця різниця швидкостей зумовлена наявністю тертя шарів рідини одного об одиний, яке називають *внутрішнім тертям*.

У різних рідинах сили внутрішнього тертя неоднакові. При цьому вважають, що рідини мають різну в'язкість.

Ньютон установив, що сила тертя між шарами рідини, які рухаються з різними швидкостями, залежить від площі стикання шарів і швидкості, з якою змінюється швидкість при переході від одного шару до другого в напрямі, перпендикулярному до осі труби. Цю величину називають *градієнтом швидкості*, його вимірюють відношенням різниці швидкостей течії двох близьких шарів рідини до найкоротшої відстані між ними:

$$\text{grad } v = \Delta v / \Delta l. \quad (7.6)$$

Отже, згідно з висновками Ньютона, сила внутрішнього тертя

$$F_{\text{тр}} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta l} S, \quad (7.7)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя (динамічна в'язкість); S – площа стикання шарів.

В'язкість

Динамічна в'язкість η чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє на одиницю площі паралельно рухомим шарам і потрібна для підтримання градієнта швидкості, що дорівнює одиниці:

$$\eta = \frac{F}{(\Delta v / \Delta l) S}. \quad (7.7 \text{ а})$$

Коефіцієнт η залежить від роду рідини або газу і температури. Одиницею в'язкості в СІ, згідно з формулою (4.7 а), є *паскаль-секунда*:

$$[\eta] = \frac{[F]}{[\Delta v / \Delta l][S]} = \frac{\text{Н}}{(\text{м/с})/\text{м} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

В'язкості різних рідин, що проходять через ту саму трубу, вимірюють за допомогою приладу, який називають *віскозиметром*.

Слід зазначити, що

в'язкість у газів при нагріванні зростає, а в рідин зменшується.

Це свідчить про те, що природа внутрішнього тертя в газах і рідинах різна. При нагріванні газу швидкість хаотичного руху молекул зростає, збільшується і в'язкість газу.

У процесі нагрівання рідини розширюються, сили взаємного притягання молекул зменшуються, зменшується в'язкість рідини. Величину $\varphi = \frac{1}{\eta}$ називають *текучістю*.

Закон Стокса

Французький учений Пуазейль установив, що під час переміщення рідини по трубці радіусом r при сталій різниці тисків $\Delta p = p_1 - p_2$ на її кінцях середню швидкість течії можна визначити за формулою

$$v = -\frac{\Delta p r^2}{\Delta x 8\eta}, \quad (7.8)$$

де $\Delta p / \Delta x$ – градієнт тиску.

Силу опору рідини, яка виникає, коли в ній рухаються тверді тіла, можна визначити і за законом, установленим Стоксом внаслідок спостереження за рухом кулі малого радіуса r . За цим законом, сила в'язкості при малих швидкостях v руху дорівнює

$$F = 6\pi\eta r v. \quad (7.9)$$

Обидва ці закони використовують у лабораторному практикумі для визначення на досліді в'язкості різних рідин.

Припустимо, що на тіло набігає потік в'язкої рідини зі швидкістю v (рис. 7.7). На тіло при цьому діють сили в'язкості в напрямі дотичної до кожного елемента поверхні і сили нормального тиску.

Можна вважати, що на поверхні контакту рідини з тілом молекули рідини нерухомі і швидкість наростає в *примежовому шарі*. Оскільки примежовий шар має невелику товщину, в ньому градієнт швидкості досягає великих значень.

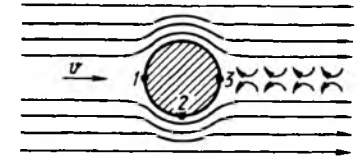


Рис. 7.7

Частинка рідини, переходячи з точки 1 в точку 2 (рис. 7.7), потрапляє в область великих швидкостей (зменшується переріз потоку) і, згідно з рівнянням Бернуллі, в область знижених тисків. При дальшому обтіканні тіла потоком у напрямі до точки 3 частинка втрачає запас кінетичної енергії внаслідок дії сил тертя і, не дійшовши до точки 3, переміщується назад, що призводить до її відривання від примежового шару і утворення вихорів.

Отже, ламінарний потік, що набігає, за певних умов після обтікання тіла стає турбулентним.

Короткі висновки

- Поверхневий натяг – термодинамічна характеристика поверхні поділу рідини і її насиченої пари – дорівнює відношенню роботи, яку треба затратити при сталій температурі, щоб створити поверхню рідини площею ΔS , до площі цієї поверхні:

$$\alpha = \Delta A / \Delta S.$$

- Капілярні явища зумовлені поверхневим натягом на межі поділу різних середовищ. Рідина, які змочують поверхню капілярів, мають угнутий меніск, а рідини, які не змочують поверхню капілярів, мають опуклий меніск. Висота підняття (опускання) рідини по капіляру

$$h = 2\alpha / (\rho g r).$$

- В'язкість (внутрішнє тертя) – властивість текучих тіл (рідин і газів) чинити опір переміщенню однієї їх частини відносно іншої.
- Основний закон в'язкої течії встановив І. Ньютон (1687):

$$F_{\text{тп}} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta l} S.$$

- Природа внутрішнього тертя в газах і рідинах різна.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Пояснити, виходячи з молекулярно-кінетичної теорії будови речовини, пружність, текучість і в'язкість рідин. 2. Від чого залежить поверхневий натяг? 3. Як напрямлена сила поверхневого натягу рідини? 4. Як визначити зміну потенціальної енергії поверхневого шару рідини при

збільшеній або зменшеній її поверхні? 5. Які явища можна спостерігати на межі рідини з твердим тілом? 6. Чому рівень однорідної рідини в різних капілярних трубках сполучених посудин різний? 7. Виведіть формулу, за якою визначають висоту підняття (опускання) рідини по капіляру. 8. Дайте поняття ламінарної і турбулентної течії. 9. Від чого залежить сила внутрішнього тертя? 10. Що характеризує внутрішній тиск і від чого він залежить?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Дві пластини занурено в спирт. На яку висоту підніметься рівень спирту, якщо відстань між пластинами зменшити з 1 до 0,5 мм? Змочування пластини вважати повним.

Дано: $\alpha = 0,022$ Н/м; $\rho = 0,8 \cdot 10^3$ кг/м³; $r_1 = 1$ мм = 10^{-3} м; $r_2 = 0,5$ мм = $0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Знайти: Δh .

Розв'язання. Згідно з (7.5),

$$h_1 = \frac{2\alpha}{\rho g r_1}; \quad h_2 = \frac{2\alpha}{\rho g r_2}; \quad \Delta h = h_2 - h_1 = \frac{2\alpha}{\rho g} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Обчислення:

$$\Delta h = \frac{2 \cdot 0,022 \text{ Н/м}}{0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2} \left(\frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} - \frac{1}{10^{-3} \text{ м}} \right) = 5,62 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,62 \text{ мм}.$$

Задача 2. Визначити радіус бульбашки повітря, яка міститься безпосередньо під поверхнею води, якщо густина повітря в бульбашці 260 кг/м³, поверхневий натяг $72 \cdot 10^{-3}$ Н/м, атмосферний тиск $1 \cdot 10^5$ Па, температура 290 К.

Дано: $\alpha = 72 \cdot 10^{-3}$ Н/м; $\rho = 260$ кг/м³; $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Н/м²; $T = 290$ К.

Знайти: r .

Розв'язання. Згідно з (6.3),

$$p = p_0 + p_{\text{л}},$$

де $p_{\text{л}} = 2\alpha/r$. Тоді

$$p = p_0 + 2\alpha/r. \quad (1)$$

З рівняння Клапейрона – Менделєєва $pV = \frac{m}{M}RT$ маємо

$$\rho = \frac{pM}{RT}. \quad (2)$$

Підставивши (1) у (2), дістанемо

$$\rho = \frac{(p_0 + 2\alpha/r)M}{RT}.$$

звідки

$$r = \frac{2\alpha M}{\rho RT - Mp_0}.$$

Обчислення:

$$r = \frac{2 \cdot 72 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м} \cdot 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{260 \text{ кг/м}^3 \cdot 8,3 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 290 \text{ К} - 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2} \approx 0,66 \cdot 10^{-8} \text{ м}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Визначити зміну вільної енергії мильної бульбашки, якщо від її роздування діаметр зростає від $3 \cdot 10^{-2}$ до $30 \cdot 10^{-2}$ м. Поверхневий натяг $30 \cdot 10^{-3}$ Н/м.
2. За допомогою піпетки відміряно 40 крапель води. Знайти поверхневий натяг води, якщо маса відлічених крапель 1,84 г, а діаметр шийки піпетки 2 мм.
3. Поверхневий натяг гасу $2,4 \cdot 10^{-2}$ Н/м. Яку роботу виконають сили поверхневого натягу, якщо поверхневий шар гасу зменшиться на 25 см^2 ?
4. Знайти додатковий тиск, який створює поверхня повітряної бульбашки діаметром 1 мм, розміщеної під водою.
5. У тій самій капілярній трубці вода піднімається на 50 мм, а гас – на 26 мм. Визначити поверхневий натяг гасу. Поверхневий натяг води $0,072$ Н/м.
6. У посудину з рідиною опущено капілярну трубку з внутрішнім діаметром 3 мм. Знайти поверхневий натяг рідини, якщо вага рідини в капілярі дорівнює $0,2$ Н. Змочування вважати повним.
7. На яку висоту підніметься вода між двома плоскопаралельними скляними пластинками, якщо відстань між ними дорівнює 1 мм? Поверхневий натяг води $0,072$ Н/м.

ГЛАВА 8

ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

§ 76. Характеристика твердого стану речовини

Анізотропія кристалів

Різні тверді тіла в природі можна поділити на дві групи, які відрізняються своїми властивостями. Першу групу утворюють *кристалічні*, другу – *аморфні* тіла.

Відмітною рисою кристалічного стану речовини є *анізотропія* – залежність ряду фізичних властивостей, таких, як швидкість поширення світла,

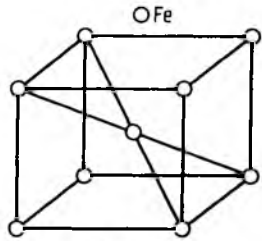


Рис. 8.1

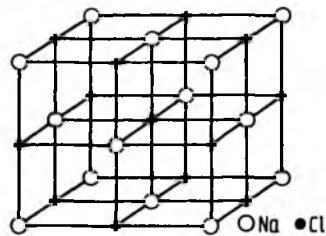


Рис. 8.2

теплопровідність, модуль пружності тощо, від напрямку. *Тіла, властивості яких однакові в усіх напрямках, називають ізотропними.* Ізотропними є гази, більшість рідин і аморфні тіла.

Причиною анізотропії кристалів є впорядковане розміщення атомів, які утворюють *просторові ґрати*. Щоб уявити собі просторові ґрати, треба в думці сполучити сусідні точки, в яких розміщені центри атомів кристала. Ці точки називають *вузлами кристалічних ґрат*. У вузлах ґрат можуть бути розміщені як поодинокі атоми (рис. 8.1), так і група атомів або іони (рис. 8.2).

Щоб пояснити анізотропію, проаналізуємо будову кристала. Як приклад розглянемо будову кристала графіту, зображеного на рис. 8.3. Атоми вуглецю в цьому кристалі розміщені в площинах, які лежать одна від одної на деякій певній відстані. Відстань між атомами, розміщеними в одній площині, менша за відстань між площинами; отже, і сили взаємодії між атомами, які лежать в одній площині, більші від сил взаємодії між атомами різних площин. Тому кристал графіту найлегше зруйнувати в напрямі, паралельному атомним площинам.

Монокристали і полікристали

Більшість твердих матеріалів – *полікристалічні*; вони складаються з безлічі безладно орієнтованих дрібних кристалічних зерен – кристалітів – дрібних монокристалів. Кожний з дрібних монокристалів анізотропний, але оскільки кристалики орієнтовані хаотично, то в цілому полікристалічне тіло ізотропне. Якщо монокристали яким-небудь способом орієнтувати в певному напрямі, наприклад прокатуванням, то кристалічне тіло стає анізотропним.

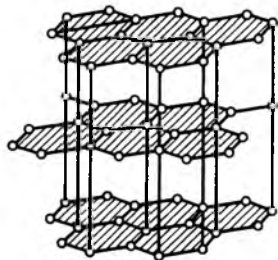


Рис.8.3

Великі поодинокі кристали називають *монокристалами*. Великі кристали в природі бувають дуже рідко. Потреба, науки і техніки в кристалах

велика, їх широко застосовують у радіотехніці, оптиці та інших галузях промисловості та сільського господарства. Наприклад, кристали рубіну використовують у квантових генераторах світла – лазерах. За допомогою кристалів сегнетової солі добувають ультразвукові коливання. Тепер штучно виготовляють монокристали багатьох речовин; кварцу, алмазу, корунду, рубіну тощо. Щоб виростити кристали, потрібні особливі умови. Наприклад, для виготовлення алмазу потрібні тиск 10^4 МПа і температура $2000\text{ }^\circ\text{C}$.

Атомам того самого хімічного елемента можуть відповідати різні за властивостями кристалічні структури. Вуглецю властиві шарувата структура графіту і просторова структура алмазу, властивості яких цілком різні. З молекул води може складатися лід п'яти різних кристалічних структур. *Властивість речовини одного складу утворювати різні кристалічні структури, які мають різні фізичні властивості, називається поліморфізмом.*

Для кристалічних тіл характерний *дальній порядок*, тобто правильна повторюваність положень вузлів кристалічних ґрат на будь-яких відстанях у кристалі.

Аморфні тіла

Крім кристалічних тіл є *аморфні тіла*. Ці тіла, хоч і вважають їх твердими, є переохолодженими рідинами.

Якщо розглядати деякий атом аморфного тіла як центральний, то найближчі до нього атоми розміщуватимуться в певному порядку, але з віддаленням від центрального атома цей порядок порушується і розміщення атомів може бути різним, тобто випадковим. В аморфних тілах на відміну від кристалічних існує тільки ближній порядок у взаємному розміщенні сусідніх атомів. До аморфних тіл належать скло, пластмаси тощо. Багато тіл, такі, як сірка, гліцерин, цукор тощо, можуть бути як у кристалічному, так і в аморфному стані або, як кажуть, у склоподібній формі. У природі аморфний стан менш поширений, ніж кристалічний.

§ 77. Типи кристалічних ґрат. Дефекти і домішки в кристалах

Типи кристалічних ґрат

Якщо температура тіла така, що середня кінетична енергія атомів (або молекул), які утворюють його, менша за потенціальну енергію їх взаємодії, утворюються кристали. У кристалічних тілах розміщення

атомів відповідає мінімальному значенню потенціальної енергії. Це є умовою стійкої рівноваги. Залежно від характеру сил взаємодії і природи частинок, розміщених у вузлах кристалічних ґрат, розрізняють чотири типи кристалічних ґрат.

1. *Атомні кристали.* У вузлах кристалічних ґрат розміщені нейтральні атоми. Між ними існує зв'язок, який має електричний характер. Цей зв'язок можна пояснити тільки з позицій квантової механіки. Він здійснюється електронними парами, причому від кожного атома бере участь тільки один електрон. Кількість зв'язків, в яких може брати участь атом, визначається його валентністю. Прикладами атомних кристалів є алмаз, графіт (див. рис. 8.3), германій і кремній.

2. *Іонні кристали.* У вузлах кристалічних ґрат цих кристалів розміщені іони різних знаків. Зв'язок між ними зумовлений електричними (кулонівськими) силами взаємодії (притягання) між різноіменними іонами. Прикладом іонних ґрат є кристал кам'яної солі NaCl (див. рис. 8.2).

3. *Металеві кристали.* У вузлах кристалічних ґрат розміщені позитивні іони металу, між якими рухаються так звані вільні (валентні) електрони, що утворюють електронний газ. Зв'язок у металевих кристалах забезпечують сили притягання між позитивними іонами, розміщеними у вузлах ґрат, і негативним електронним газом. Ці сили притягання зрівноважуються силами відштовхування, які діють між однойменними іонами. При цьому буде стійка конфігурація іонів. Іони розміщуються один відносно одного на певній відстані, яка називається *періодом ґрат*.

4. *Молекулярні кристали.* У вузлах кристалічних ґрат розміщуються певним способом орієнтовані молекули. Між молекулами діють сили притягання, характерні для взаємодії молекул. До молекулярних кристалів належать нафталін, парафін, сухий лід CO_2 , лід H_2O .

Дефекти в кристалах

Ідеально правильну структуру монокристали мають у порівняно невеликих об'ємах. Дефекти кристалічних ґрат зумовлені в основному включенням атомів інших елементів, вакансіями і дислокаціями.

Якщо у вузлі або міжвузловому просторі кристалічних ґрат розміщений атом домішки, то це веде до спотворень (рис. 8.4, а, б).

Якщо у вузлі кристалічних ґрат немає атома, то виникає дефект ґрат, який називається *вакансією*. Спотворення ґрат цього типу зображено на рис. 8.4, в.

Механічні властивості кристалів значною мірою залежать від наявності особливих дефектів – *дислокацій*. Дислокація виникає внаслідок змі-

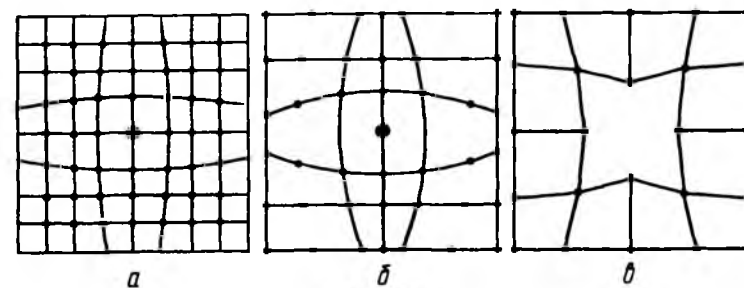


Рис. 8.4

щення атомних площин у деякій частині кристала, одна з площин розміститься в проміжку між іншими атомними площинами. Це відбувається тоді, коли кристал зазнає деформації зсуву, тобто одноатомна площина ковзає відносно іншої. Дефекти в кристалах дуже впливають на їхні фізичні властивості.

§ 78. Полімери

Полімери

Останнім часом у техніці дедалі більше застосовують речовини, які називаються *полімерами*. Вони утворюються через приєднання однієї до одної ряду молекул (мономерів) з низькою відносною молекулярною масою.

Процес утворення полімерів називається *полімеризацією*. Кількість мономерних молекул, які входять до складу молекули полімеру, – це ступінь полімеризації. Молекулярна маса полімерів дуже велика. Залежно від властивостей вихідних молекул у процесі полімеризації можуть виникати як лінійні молекулярні ланцюжки, так і розгалужені.

Полімери поділяють на два класи: природні і синтетичні. До природних полімерів належать сполуки високої молекулярної маси, наприклад білки, каучук, до синтетичних – різні пластмаси.

Механічні властивості полімерів багато в чому залежать від сил взаємодії між окремими молекулами. Наявність у полімерах упорядкованих кристалічних областей сприяє значному підвищенню їхньої міцності. Великий вплив мають довжина молекулярного ланцюжка, ступінь його розгалуженості і розміщення структурних ланок у макромолекулі. Отже, механічні властивості полімерів безпосередньо пов'язані з їхньою хімічною структурою, оскільки вона визначає розміри кристалічних областей і їхню стабільність, жорсткість ланцюжка і його довжину, просторову будову макромолекул.

Пластмаси мають найрізноманітніші фізичні властивості: корозійну стійкість, здатність формуватися у виробі складної конфігурації і витримувати різні зміни температури, добрі теплоізоляційні характеристики, високу діелектричну проникність, велику питому міцність, малу густину тощо.

Застосування полімерів

У промисловості застосування полімерів дає можливість розв'язувати багато складних завдань, з якими пов'язаний розвиток сучасної техніки. Штучно створені полімери замінюють метали в машино- і приладобудуванні, імітують різні будівельні матеріали, наприклад цінні породи дерев, є заміниками шкіри, волокна. За своїми властивостями полімерні матеріали іноді перевищують природні.

§ 79. Пружні властивості твердих тіл. Закон Гука

Деформація

Під дією зовнішніх сил при нагріванні або охолодженні змінюється об'єм тіла, що звичайно супроводиться зміною його форми, тобто тверде тіло деформується. *Деформації, які зовсім зникають після припинення дії деформуючих факторів, називають пружними. Деформації, які не зникають після припинення дії деформуючих факторів, називають пластичними.* Пружність або пластичність тіл в основному визначається матеріалом, з якого їх виготовлено. Наприклад, сталь і гума пружні, а мідь і віск пластичні.

У процесі деформації твердого тіла частинки, розміщені у вузлах кристалічних ґрат, зміщуються одна відносно одної. Цьому зміщенню перешкоджають внутрішні пружні сили, що діють між частинками твердого тіла. Сила пружності $F_{пр}$, яка виникає під час деформації тіла, завжди напрямлена в бік, протилежний зміщенню частинок тіла.

Види деформації

Пружні деформації, які виникають у тілах, дуже різноманітні. Розрізняють чотири основні види деформації: розтяг (або стиск), зсув, крутіння і згин.

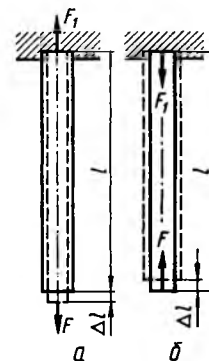


Рис. 8.5

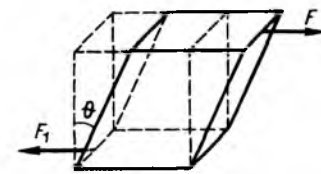


Рис. 8.6

Найчастіше в умовах експлуатації різних конструкцій доводиться розраховувати пружні деформації розтягу або стиску (рис. 8.5). Деформацію розтягу (стиску) тіла характеризують його відносним подовженням ε – відношенням абсолютного подовження $\Delta l = l - l_0$ до початкової довжини l_0 .

При деформації (рис. 8.6) зсуву $\varepsilon = \operatorname{tg} \theta$.

Прикладена до тіла зовнішня сила F створює всередині нього *нормальну механічну напругу*

$$\sigma = \frac{F}{S}; \quad (8.1)$$

тут S – площа перерізу тіла.

Закон Гука

Р. Гук установив, що в межах пружних деформацій нормальна напруга і відносне подовження зв'язані співвідношенням

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \sigma. \quad (8.2)$$

Це співвідношення називають *законом Гука*. Коефіцієнт пропорційності α , який характеризує пружні властивості матеріалу, називається *коефіцієнтом пружності*. Величину, обернену до коефіцієнта пружності, називають *модулем поздовжньої пружності*, або *модулем Юнга*:

$$E = \frac{1}{\alpha}. \quad (8.3)$$

Запишемо тепер закон Гука у вигляді

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \sigma, \text{ або } \sigma = E \varepsilon. \quad (8.4)$$

З урахуванням (8.1) співвідношення (8.4) набуває вигляду

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}. \quad (8.5)$$

Чим більше E , тим меншої деформації за інших однакових умов зазнає виріб.

Деформація тіл пов'язана зі зміною їхньої внутрішньої енергії.

Незалежно від того, яка деформація відбувається – розтягу чи стиску, внутрішня енергія тіла збільшується, бо над ним зовнішні сили виконують роботу. Розглянемо, наприклад, випадок пружної деформації подовження. З подовженням розтяжна сила має збільшуватись. На початку процесу вона дорівнює нулю, в кінці – дорівнює F ; її середнє значення знаходимо як середнє арифметичне:

$$F_c = (0 + F) / 2 = F / 2.$$

Кінцевому значенню сили F відповідає подовження Δl . Щоб розтягнути тіло на Δl , треба виконати роботу

$$A = F_c \Delta l = \frac{F \Delta l}{2}.$$

Оскільки $F = ES \Delta l / l$, то

$$A = \frac{1}{2} \frac{ES}{l} \Delta l^2. \quad (8.6)$$

Із співвідношення (8.6) випливає, що робота, затрачена на деформацію тіла, пропорційна Δl^2 .

§ 80. Пружність, міцність, пластичність, крихкість

Міцність матеріалу

Для розрахунку різних конструкцій треба знати міцність матеріалу. *Міцністю матеріалу називається його здатність витримувати навантаження, не руйнуючись. Границею міцності σ_m називають значення нормальної механічної напруги, якому відповідає найбільше навантаження, що витримується тілом; границею пружності (пропорційності) $\sigma_{пр}$ – значення σ , до якого зберігається пропорційність між деформацією і прикладеною силою, тобто виконується закон Гука.*

Діаграма розтягу

На рис. 8.7 подано залежність між напругою σ і відносною деформацією ϵ , яку назвали *діаграмою розтягу*.

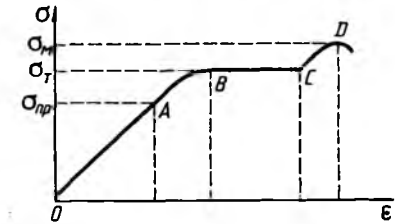


Рис. 8.7

Ділянка OA , на якій виконується закон Гука, відповідає пружній деформації, $\sigma_{пр}$ – границя пружності. Границя

пружності залежить від матеріалу, наприклад для сталі вона дорівнює 500 МПа, а для міді – 120 МПа.

Ділянка $ABCD$ відповідає пластичній деформації. На ділянці AB виникає явище текучості твердого тіла, тобто відносна деформація зростає швидше від механічної напруги. На ділянці BC механічна напруга стала, відносна деформація збільшується. Цій ділянці відповідає σ_t – границя текучості. Точка D відповідає границі міцності – σ_m . Так, для сталі вона дорівнює $7,85 \cdot 10^8$ Па, а для міді – $2,45 \cdot 10^8$ Па.

Пластичність матеріалу

Границя міцності багатьох матеріалів значно більша від границі пружності. Такі матеріали називають *в'язкими*. Вони мають і пружні, і пластичні деформації. До них належать мідь, цинк, залізо тощо.

Матеріали, які не мають області пружних деформацій, належать до *пластичних*, наприклад віск, глина, пластилін.

Здатність виробу протистояти руйнуванню залежить не тільки від якості матеріалу, а й від форми виробу і виду дії. Наприклад, стрижень легше зруйнувати однобічним стиском, ніж розтягом.

Крихкість матеріалу

Крім міцності, в техніці матеріали розрізняють за їх *твердістю*. Вважають, що з двох матеріалів той твердіший, який дряпає інший. Різці і свердла для різання металів повинні, очевидно, мати більшу твердість, ніж матеріал, який обробляють. У сучасній техніці для різців і свердел застосовують надтверді сплави. З природних матеріалів найбільшу твердість має алмаз.

На практиці велике значення має властивість твердих тіл, яку називають *крихкістю*. Виріб називають крихким, якщо він руйнується від невеликої сили.

ликих деформацій. Наприклад, вироби із скла, фарфору – крихкі. Чавун, мрамур, бурштин мають підвищену крихкість, а сталь, мідь, свинець – не крихкі. Границя пружності і границя міцності крихких матеріалів майже однакові. Крихкі матеріали мало проявляють пластичних властивостей.

§ 81. Теплове розширення твердих тіл і рідин

Теплове розширення

Відомо, що з підвищенням температури лінійні розміри твердих тіл збільшуються, а із зниженням – зменшуються. *Тепловим розширенням називається збільшення лінійних розмірів тіла і його об'єму, яке відбувається з підвищенням температури.*

У процесі нагрівання твердого тіла збільшуються середні відстані між атомами.

На рис. 8.8 подано залежність потенціальної енергії E_n двох атомів від відстані r між ними. З підвищенням температури зростає повна енергія атомів. При температурі T_1 атом має енергію E_1 і коливається між точками 1 – 1 навколо положення рівноваги r_0 . Якщо температура тіла зростає до $T_2 > T_1$, то збільшується й енергія атома $E_2 > E_1$ і він коливається вже між точками 2 – 2. Отже, з нагріванням зростає середня відстань між положеннями рівноваги частинок твердого тіла, тобто відбувається теплове розширення.

Лінійне розширення

Лінійне теплове розширення характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення α . Припустимо, що тверде тіло з початковою температурою T_0 має довжину l_0 . При нагріванні тіла до температури T його довжина збільшиться до l , тобто на $\Delta l = l - l_0$. Відносне подовження тіла становитиме $\Delta l / l_0$. Величина, яка дорівнює відношенню відносного подовження тіла до зміни його температури на $\Delta T = T - T_0$, називається температурним коефіцієнтом розширення:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (8.7)$$

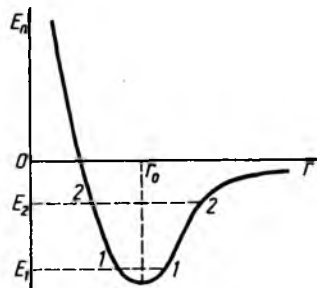


Рис. 8.8

З формули (8.7) визначасмо залежність довжини твердого тіла від температури:

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T). \quad (8.8)$$

Для більшості тіл можна вважати, що ці коефіцієнти практично не залежать від температури.

Температурні коефіцієнти лінійного розширення деяких матеріалів при 273 К

Речовина	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	Речовина	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$
Алюміній	24	Свинець	29
Вольфрам	4	Скло:	
Дерево:		звичайне (приблизно)	10
уздовж волокон	6	кварцове	0,7
поперек "	30	Суперінвар (сплав заліза і нікелю з добавкою хрому)	0,03
Залізо	12	Цинк	30
Інвар (сплав заліза і нікелю)	0,9	Фарфор	3
Латунь	18		
Мідь	17		

Об'ємне розширення

Із зростанням температури змінюється і об'єм тіла. У межах не дуже великого температурного інтервалу об'єм збільшується пропорційно температурі. Об'ємне розширення твердих тіл характеризується температурним коефіцієнтом об'ємного розширення β – величиною, яка дорівнює відношенню відносного збільшення об'єму $\Delta V / V_0$ тіла до зміни температури ΔT :

$$\beta = \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (8.9)$$

де $\Delta V = V - V_0$, V_0 і V – об'єми тіла відповідно при температурах T_0 і T . З (8.9) дістанемо

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta T). \quad (8.10)$$

Між температурними коефіцієнтами лінійного і об'ємного розширення існує зв'язок

$$\beta = 3\alpha, \quad (8.11)$$

який легко встановити із співвідношення між довжиною l тіла і його об'ємом ($V = l^3$).

Теплове розширення рідин

У процесі нагрівання рідини зростає середня кінетична енергія хаотичного руху її молекул. Це веде до збільшення відстані між молекулами, а отже, і до збільшення об'єму. Теплове розширення рідин, як і твердих тіл, характеризується температурним коефіцієнтом об'ємного розширення. Об'єм рідини при нагріванні визначають за формулою (8.10).

Температурні коефіцієнти об'ємного розширення деяких рідин при 293 К

Речовина	$\alpha \cdot 10^{-3}, \text{K}^{-1}$	Речовина	$\alpha \cdot 10^{-3}, \text{K}^{-1}$
Ртуть	0,18	Спирт	1,1
Гас	1,0	Ефір	1,7

Якщо об'єм тіл збільшується, то зменшується їх густина. Позначивши через ρ і ρ_0 густини тіл відповідно при температурах T і T_0 і врахувавши, що $\rho = m/V$, дістанемо

$$\rho = \rho_0 / (1 + \beta \Delta T). \quad (8.12)$$

§ 82. Особливості теплового розширення води

Об'єм більшості тіл у процесі плавлення збільшується, а в процесі тверднення зменшується, при цьому змінюється й густина речовини.

Густина речовини при плавленні зменшується, а при твердненні збільшується. Але є такі речовини, як, наприклад, кремній, германій, вісмут, густина яких при плавленні збільшується, а при твердненні зменшується. До таких речовин належить і лід (вода).

Дослід показує, що вода має найбільшу густину при 4 °С. Це пояснюється особливостями будови кристалічних ґрат льоду. Якщо в рідкому стані молекули H_2O розміщені щільно одна до одної, то при кристалізації відстань між найближчими молекулами збільшується і в кристалі між молекулами утворюються порожнини. Тому густина води більша, ніж льоду, і досягає найбільшого значення при 4 °С. З підвищенням або зниженням температури від 4 °С густина води зменшується, об'єм збільшується.

Внаслідок того, що майже 80 % поверхні Землі вкрито водою, особливості її теплового розширення значною мірою впливають на клімат Землі. Вода у відкритих водоймах з температурою 1–2 °С нагрівається сонячним промінням, внаслідок чого шари води, які мають різну температуру, безперервно замінюються. Це триває доти, поки не буде досягнуто темпера-

тури, яка відповідає максимальній густині. Від подальшого нагрівання верхні шари стають менш густі, а тому залишаються вгорі. Цим пояснюється той факт, що в глибоких водоймах температура води, починаючи з деякої глибини, близька до температури води найбільшої густини.

Саме через цю особливість теплового розширення води водойми не промерзають до дна. В процесі охолодження, коли температура поверхневого шару досягне 4 °С, густина теплішої води менша за густину холоднішої, тому тепліша вода піднімається вгору, а холодніша опускається вниз.

В інтервалі температур від 0 до 4 °С значення густини змінюються: тепер уже вода, яка має вищу температуру, опускається вниз, а холодніша переміщується вгору і, охолоджуючись, замерзає.

Розширення води під час замерзання спричинює руйнування гірських порід та посудин, в яких вона міститься.

§ 83. Значення теплового розширення тіл у природі і техніці

Конструюючи прилади і машини, треба враховувати теплове розширення матеріалів, з яких їх виготовляють. Так, виготовляючи різні електричні вводи, де метал будуть спаювати із склом, треба брати такі метали, щоб їхні температурні коефіцієнти лінійного розширення були сумірні з температурними коефіцієнтами лінійного розширення скла. Якщо ці коефіцієнти значно відрізняються, то в процесі нагрівання або охолодження спаю виникають великі механічні напруги, які можуть вивести з ладу прилад. Деталі багатьох машин і механізмів, для яких теплове розширення небажане, виготовляють з особливого сплаву нікелю і заліза, який називають інваром ($\alpha = 10^{-6} \text{K}^{-1}$). Инвар застосовують у точних приладах, наприклад для маятників годинників, показання яких не повинні залежати від температури. З інвару виготовляють еталони довжини, які застосовують під час особливо точних вимірювань, наприклад геодезичних.

Найменший температурний коефіцієнт лінійного розширення має кварц ($\alpha = 4 \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$). У посудинах, виготовлених з кварцу, навіть при значному перепаді температур практично не виникають механічні напруги. Кварцова посудина не тріскається від дуже різких змін температури, наприклад, розжарена до червоного посудина буде цілою, якщо її занурити у воду.

Будуючи лінії газо- і трубопроводів, на певних відстанях роблять угнуті ділянки з труб (компенсатори). Ці ділянки зберігають труби від розривів, якщо довжина труб змінюється внаслідок нагрівання або охолод-

ження. Прокладаючи лінії електропередачі, проводи між фермами не натягують, а залишають помітний прогин; величина цього прогину залежить від температурного коефіцієнта лінійного розширення матеріалу, з якого виготовлено проводи. Проводи електрифікованих залізниць не закріплюють нерухомо, їх натягують тягарі через систему блоків, бо із зміною температури довжина їх змінюється. Можна навести чимало прикладів з галузі зварювального, ливарного та інших виробництв, де треба враховувати лінійне розширення.

Як було зазначено в § 81, більшість рідин від нагрівання розширюється, з цим явищем доводиться рахуватись у техніці. Якщо рідину нагрівати в закритій посудині, то вона може розірвати посудину. Тому, заповнюючи різні місткості, їх не закривають герметично або ж залишають простір, потрібний для збільшення об'єму рідини.

Короткі висновки

- Більшість твердих тіл перебуває в кристалічному стані. Кристали мають тривимірну періодичну атомну структуру, тобто утворюють просторові ґрати. Кристали анізотропні, тобто фізичні властивості кристалів залежать від обраного напрямку.
- Аморфний стан – твердий стан речовини. На відміну від кристалів в аморфних тіл немає точного порядку в розміщенні атомів.
- Внаслідок зовнішніх дій конфігурація твердого тіла змінюється, тобто воно деформується. Деформацію називають пружною, якщо вона зникає після зняття навантаження, і пластичною, якщо вона після знімання навантаження не зникає.
При малих деформаціях у пружному середовищі виконується закон Гука $\epsilon = \alpha\sigma$. Механічні властивості твердих тіл відображені на діаграмі розтягу (див. рис. 8.7).
- У процесі нагрівання розміри тіла змінюються, тобто відбувається теплове розширення.
- У більшості речовин густина в процесі плавлення зменшується, а в процесі тверднення – збільшується. Винятком є, наприклад, кремій, германій, вісмут і вода. Особливості теплового розширення води відіграють важливу роль у природі і техніці.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. На які дві групи можна поділити тверді тіла? Охарактеризуйте кожну з них. 2. Які тіла називають анізотропними, які – ізотропними? 3. Дайте поняття просторових ґрат. 4. Які типи кристалічних ґрат вам відомі? 5. Як дефекти кристалів впливають на їх фізичні властивості? 6. Наведіть приклади природних і синтетичних полімерів. 7. Які види деформацій ви знаєте? 8. Поясніть причину виникнення пружних сил при деформації. 9. Сформулюйте закон Гука. 10. Чи змінюється внутрішня

енергія деформованих тіл? 11. Розкажіть за діаграмою розтягу про пружність, міцність, пластичність і їх границі. 12. Поясніть теплове розширення тіл з точки зору молекулярно-кінетичної теорії. 13. Поясніть особливості теплового розширення води. 14. Яке значення має теплове розширення тіл у природі і техніці?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. До дроту з вуглецевої сталі підвішено вантаж масою 100 кг. Довжина дроту 1 м, діаметр 2 мм. Модуль Юнга для сталі $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, границя міцності $\sigma_m = 330$ МПа. На скільки збільшиться довжина дроту? Чи перевищує прикладена напруга границю пропорційності?

Дано: $l = 1$ м; $d = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $m = 100$ кг; $\sigma_m = 3,3 \cdot 10^8$ Па.

Знайти: Δl , σ .

Розв'язання. З формули закону Гука (8.5) знаходимо

$$\Delta l = lF / (ES),$$

де Δl – зміна довжини; l – довжина дроту; $F = mg$ – сила, яка діє на дрот; $S = \pi d^2 / 4$ – площа поперечного перерізу дроту. Отже,

$$\Delta l = \frac{4lmg}{\pi d^2 E}.$$

Обчислення:

$$\Delta l = \frac{1 \text{ м} \cdot 100 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с} \cdot 4}{2 \cdot 10^{11} \text{ Па} \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3} = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,57 \text{ мм}.$$

Знайдемо прикладену нормальну напругу (див. (5.1)):

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4mg}{\pi d^2};$$

$$\sigma = \frac{100 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 4}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 3,12 \cdot 10^8 \text{ Па} = 312 \text{ МПа}.$$

Знайдене значення σ не перевищує заданої границі пропорційності.

Задача 2. Трубка з міді має довжину 0,5 м при температурі 200 °С. Яка довжина цієї трубки при температурі 10 °С?

Дано: $l_1 = 0,5$ м; $t_1 = 200$ °С; $t_2 = 10$ °С; $\alpha = 17 \cdot 10^{-6}$ °С = $17 \cdot 10^{-6}$ К.

Знайти: l_2 .

Розв'язання. Оскільки значення температурного коефіцієнта лінійного розширення подано в § 81 для рідин при температурі 0 °С, а довжина l_0 трубки при температурі 0 °С невідома, то, щоб визначити довжину l_2 трубки при температурі 10 °С, треба записати дві рівності ($\Delta l = \Delta T$):

$$l_1 = l_0(1 + \alpha t_1), \quad l_2 = l_0(1 + \alpha t_2).$$

Розв'язавши сумісно систему цих рівнянь, дістанемо

$$t_2 = t_1 \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1}$$

Обчислення:

$$t_2 = 0,5 \text{ м} \frac{1 + 17 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} \cdot 10 \text{ }^\circ\text{С}}{1 + 17 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1} \cdot 200 \text{ }^\circ\text{С}} = 0,5 \text{ м} \frac{1,00017}{1,0034} = 0,495 \text{ м}.$$

Задача 3. Сполучені посудини заповнені рідиною, яка має температуру t_1 . При нагріванні рідини в одній з посудин до температури t_2 рівень рідини встановився в ній на висоті h_2 , а в другій посудині – на висоті h_1 . Знайти температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини.

Дано: t_1 ; t_2 ; h_1 ; h_2 .

Знайти: β .

Розв'язання. Густина рідини обернено пропорційна її об'єму. Отже, якщо при температурі $0 \text{ }^\circ\text{С}$ густина рідини становить ρ_0 , то при температурах t_1 і t_2 (див. § 81) відповідно маємо ($\Delta t \text{ }^\circ\text{С} = \Delta T \text{ К}$):

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{1 + \beta t_1}, \quad \rho_2 = \frac{\rho_0}{1 + \beta t_2}.$$

Звідси

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1 + \beta t_2}{1 + \beta t_1}.$$

З умови гідростатичної рівноваги ($p_1 = p_2$ або $\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$) одержимо, що $\rho_1 / \rho_2 = h_2 / h_1$. Отже,

$$\frac{1 + \beta t_2}{1 + \beta t_1} = \frac{h_2}{h_1}.$$

Таким чином,

$$\beta = \frac{h_2 - h_1}{h_1 t_2 - h_2 t_1}.$$

Задача 4. Яку кількість теплоти затрачено на нагрівання алюмінієвої кулі від $0 \text{ }^\circ\text{С}$, якщо її об'єм збільшився на 15 см^3 ?

Дано: $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{С}$; $\Delta V = 15 \text{ см}^3 = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; $c = 880 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\rho = 2,7 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $\alpha = 24 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Знайти: Q .

Розв'язання. Кількість теплоти, надана кулі в процесі нагрівання,

$$Q = cm(t_2 - t_1), \quad (1)$$

де t_2 – кінцева температура; m – маса алюмінієвої кулі. З формули (8.10) для об'ємного розширення маємо

$$V = V_0(1 + \beta \Delta t),$$

де $\Delta t = t_2 - t_1 = t_2$ (бо $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{С}$). Тоді

$$t_2 = \frac{V - V_0}{V_0 \beta} = \frac{\Delta V}{V_0 \beta}. \quad (2)$$

Оскільки за умовою задачі приріст об'єму ΔV відомий, а $V_0 = m / \rho_0$, де ρ_0 – густина алюмінію при $0 \text{ }^\circ\text{С}$, то формула (2) набуває вигляду $t_2 = \Delta V \rho_0 / (m \beta)$. Виходячи з того, що $\beta = 3\alpha$ (див. (8.11)), дістанемо

$$t_2 = \frac{\Delta V \rho_0}{3m\alpha}.$$

Тоді

$$Q = c \Delta V \rho_0 / (3\alpha).$$

Обчислення:

$$Q = \frac{880 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3}{3 \cdot 24 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}} = 4,9 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 4,9 \text{ МДж}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

- Мідний стрижень завдовжки 3 м і перерізом $1,5 \text{ мм}^2$ розтягують. Чому дорівнює робота розтягу, якщо відносне подовження дорівнює $0,001$?
- Яку найменшу довжину повинен мати свинцевий дріт, щоб він, підвішений за один кінець у вертикальному положенні, розірвався від власної ваги? Границя міцності свинцю $19,6 \text{ МПа}$.
- Стальна струна діаметром $0,5 \text{ мм}$ і завдовжки 80 см розтягується на 1 мм . Яку силу прикладено до струни? Обчисліть роботу при розтягуванні струни.
- Довжина мідного дроту в процесі нагрівання від 0 до $100 \text{ }^\circ\text{С}$ збільшилась на $0,17 \text{ м}$. Визначити температурний коефіцієнт лінійного розширення міді, якщо початкова довжина дроту 100 м .
- Мідний стрижень, узятий при температурі $10 \text{ }^\circ\text{С}$, щільно вставили між двома нерухомими площинами. Стрижень нагрівається до $80 \text{ }^\circ\text{С}$. Визначити напругу, яка виникає в ньому.
- Яку силу треба прикласти до сталюго дроту діаметром 2 мм , щоб дістати таке саме подовження, як при нагріванні його на 100 К ? Для сталі $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, $E = 21,6 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.
- Стальний стрижень при температурі $0 \text{ }^\circ\text{С}$ має довжину $0,2 \text{ м}$. При якій температурі його довжина дорівнюватиме $0,213 \text{ м}$?
- Який об'єм має нафта при $0 \text{ }^\circ\text{С}$, якщо при температурі $20 \text{ }^\circ\text{С}$ її об'єм дорівнює 65 м^3 ?
- Чому посудини для перевезення і зберігання рідкого палива не можна заповнювати до країв, якщо вони розміщені в умовах температури, яка змінюється?
- Нафту наливо в циліндричну цистерну заввишки 2 м . При температурі $0 \text{ }^\circ\text{С}$ нафта на $0,1 \text{ м}$ не досягає краю цистерни. Визначити, при якій температурі нафта може вилитися з цистерни.
- Маса $1,0 \text{ л}$ спирту при $0 \text{ }^\circ\text{С}$ дорівнює $0,80 \text{ кг}$. Визначити густину спирту при температурі $15 \text{ }^\circ\text{С}$.

ГЛАВА 9

ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ НА ЗЕМЛІ І В КОСМОСІ

§ 84. Плавлення і кристалізація

Плавлення

Речовина існує в твердому кристалічному стані при певних значеннях тиску і температури. У цьому стані речовина перебуває доти, поки кінетична енергія атомів недостатня, щоб подолати сили взаємного притягання. Ці сили утримують атоми на деякій відстані один відносно одного, не даючи можливості їм переміщатись. При цьому атом коливається навколо положення своєї рівноваги. В процесі нагрівання твердого тіла кінетична енергія атомів (або молекул) зростає. При цьому амплітуди коливань можуть стати такими великими, що вже будуть порівнянні з періодом ґрат, далекий порядок порушиться, кристалічні ґрати почнуть руйнуватись. Із збільшенням температури *тверді тіла плавляться, тобто речовина переходить з твердого стану в рідкий*. Цей процес ізотермічний. Під час плавлення температура тіла не змінюється. Уся теплота, яка підводиться ззовні, витрачається на руйнування кристала. Після руйнування кристала й утворення рідини теплота, яка підводиться ззовні, витрачається на нагрівання рідини.

Діаграму плавлення кристалічного тіла подано на рис. 9.1. На осі абсцис відкладено час, на осі ординат – температуру. Ділянка *OA* відповідає нагріванню твердого тіла до температури плавлення $T_{пл}$. Нагрівання тіла на цій ділянці супроводжується підвищенням його температури (яка зростає приблизно пропорційно часу нагрівання). Ділянка *AB* відповідає процесу плавлення.

Під час плавлення кристалічне тіло перебуває одночасно в твердому і рідкому станах.

Температура плавлення залежить від роду кристалічного тіла. Для більшості кристалічних тіл температура плавлення підвищується від збільшення атмосферного тиску.

У процесі плавлення густина речовин зменшується (виняток становлять, наприклад, вісмут і лід – їх густина під час плавлення збільшується).

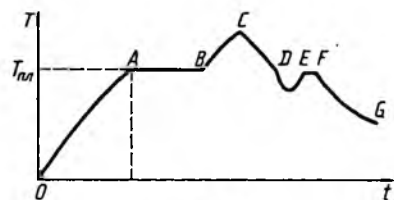


Рис. 9.1

Точка *B* діаграми плавлення відповідає закінченню процесу плавлення. Тверде тіло перетворилось у рідину.

Відношення кількості теплоти Q , потрібної для того, щоб перетворити тверде тіло в рідину при температурі плавлення, до маси цього тіла називають питомою теплотою плавлення:

$$\lambda = Q / m, \quad (9.1)$$

звідки

$$Q = \lambda m.$$

У СІ питому теплоту плавлення виражають у джоулях на кілограм (Дж/кг).

Зазначимо, що

в процесі плавлення внутрішня енергія тіла збільшується.

Кристалізація

Ділянка *BC* діаграми відповідає нагріванню рідини. Якщо в деякий момент часу припинити нагрівання рідини, а потім її охолодити, то крива йтиме вниз (ділянка *CD*). Коли температура зменшиться до значення, яке дорівнює $T_{пл}$, розпочинається кристалізація (ділянка *EF*) – перехід речовини з рідкого стану в твердий кристалічний. Цей процес супроводжується виділенням теплоти кристалізації, яка дорівнює теплоті плавлення. Під час цього процесу рух молекул рідини упорядковується, внаслідок чого вони починають коливатися навколо вузлів кристалічних ґрат. Процес кристалізації ізотермічний. Температура кристалізації $T_{кр}$ і питома теплота кристалізації дорівнюють відповідно температурі плавлення і питомій теплоті плавлення для того самого тіла при одному і тому самому тиску. Коли кристалізація закінчиться (точка *F*), тіло почне охолоджуватись (ділянка *FG*).

Процес кристалізації відбувається у двофазній системі, поблизу центрів кристалізації. Такими центрами можуть бути пилінки, найдрібніші домішки, неоднорідності. Якщо рідина чиста, тобто в ній немає центрів кристалізації, то від її швидкого охолодження можна дістати переохоложену рідину (тобто рідину з температурою, нижчою від температури кристалізації). Цей процес на рис. 9.1 зображено лінією *DE*. Стан переохолодження – нестійкий; від значного переохолодження утворюються центри кристалізації і рідина перетворюється в тверде тіло.

Рідкі кристали

Це стан, в якому виявляються структурні властивості, проміжні між властивостями твердого кристала і рідини. Рідкі кристали утворюють речовини, молекули яких мають подовжену паличкоподібну форму. Рідкі кристали утворюються у вузькому інтервалі температур. З охолодженням кристали перетворюються в тверді.

§ 85. Зміна об'єму і густини речовини під час плавлення і кристалізації

У процесі плавлення густина більшості речовин зменшується. Наприклад, якщо в розплавлений парафін кинути шматочок твердого парафіну, то він потоне. Отже, густина розплавленого парафіну менша від густини твердого. Парафін під час плавлення збільшує свій об'єм. Так само поведуть себе і багато інших речовин. Це явище показує, що при правильному впорядкованому розміщенні молекул у кристалі об'єм, який вони займають, менший, ніж при безладному їх розміщенні в рідині. Винятком є чавун, кремній, вісмут і вода. Як відомо, лід плаває у воді; його густина помітно менша від густини води. Ця обставина має велике значення у природі. Шар льоду на поверхні води, покритий зверху снігом, який погано проводить тепло, добре захищає воду, розміщену під ним, від охолодження. Отже, водойма не промерзає до дна, і це рятує риб від загибелі.

Розширення води під час замерзання – одна з причин й іншого, важливого в житті Землі явища – руйнування гірських порід.

Відомо, що воду у водопровідних трубах не можна доводити до замерзання – при цьому труби лопають. Так само лопають на морозі пляшки з водою. Отже, при замерзанні вода збільшує свій об'єм.

Зазначимо, що в усіх речовинах, які при плавленні розширюються, збільшення зовнішнього тиску підвищує точку плавлення. У води збільшення тиску, навпаки, знижує точку замерзання.

Зміну об'єму рідини в процесі тверднення треба враховувати в техніці. Особливо важливо це в ливарному виробництві під час виготовлення форм, які потім заливають рідкою речовиною. Залежно від поведження рідини під час тверднення розміри форм мають бути або більші, або менші від справжніх розмірів виробу на величину усадки (від 1 до 2,5 %).

§ 86. Поняття фази речовини

Поняття фази

Під час розгляду явищ випаровування і конденсації води ми встановили, що можуть існувати два різні стани води – рідкий і газоподібний (водяна пара) – за тих самих температур і тиску. Ці стани відрізняються своїми властивостями, у цьому разі – густиною.

Якщо система поділяється на однорідні частини, що межують одна з одною і перебувають у фізично різних станах, то ці частини називають *фазами системи*.

Якщо дві або більше різних фаз речовини за даних температури і тиску існують одночасно, стикаючись одна з одною, і якщо при цьому маса однієї з фаз не збільшується за рахунок зменшення маси другої, то кажуть, що існує *фазова рівновага*.

Фазові переходи

Перехід речовини з одного стану (фази) в інший називають фазовим переходом. Фазовий перехід пов'язаний з якісною зміною властивостей речовини. Наприклад, газоподібний, рідкий і кристалічний стани речовини відрізняються характером руху атомів або молекул, наявністю або відсутністю упорядкованої структури.

Кипіння, плавлення – приклад *фазових переходів першого роду*. Для фазових переходів першого роду характерна стрибкоподібна зміна властивостей речовини, тобто така, що відбувається у вузькому інтервалі температур. Ці переходи супроводжуються стрибкоподібною зміною енергії, густини та інших параметрів.

Фазові переходи першого роду – дуже поширене в природі явище. До них належать випаровування і конденсація, плавлення і тверднення. Є такі фазові переходи, за яких внаслідок безперервної зміни кристалічних ґрат, тобто взаємного розміщення частинок у ґратах, перетворення відбуваються відразу в усьому об'ємі. Це призводить до того, що при певній температурі змінюється симетрія ґрат. Така температура – *точка фазового переходу другого роду*. Температуру, при якій відбувається фазовий перехід другого роду, називають *точкою Кюрі*, за ім'ям французького фізика П. Кюрі, що виявив фазовий перехід другого роду в феромагнетиках. Питання про феромагнетика розглянуто далі.

§ 87. Внутрішня будова Землі і планет

Гіпотеза походження Землі

Радянський учений О. Ю. Шмідт (1891–1956) висунув гіпотезу про походження Землі та інших небесних тіл. Він припускав, що Земля і планети ніколи не були розжареними газовими тілами, подібно до Сонця і зір, а повинні були утворитися з холодних твердих частинок речовин, які утворювали величезну хмару з газу і пилу, що оберталася навколо Сонця.

Ближче до Сонця температура пилинок була вищою, і тут утворились порівняно невеликі планети земної групи (Меркурій, Венера, Земля, Марс). Вони складаються з тугоплавких кам'янистих речовин, металів та їх оксидів і містять дуже мало легких газів і води.

Далі від Сонця було набагато холодніше, на пилинках намерзло багато льоду, вуглекислого газу, метану, аміаку. Так утворились планети-гіганти (Юпітер, Сатурн, Уран, Нептун). У них значно більше води, аміаку і метану, ніж металу і кам'янистих речовин.

Тепер вважають, що Земля з газопилової хмари утворювалась близько 100 млн років. Цей строк невеликий порівняно з усією історією Землі, яка триває близько 4,7 млрд років.

Будова Землі

Фізичні властивості і фізичний стан земної кулі вивчає наука *геофізика*, яка поділяється на фізику атмосфери, фізику моря і фізику твердої Землі.

На основі всіх відомостей, добутих тепер різними науками, побудовано фізико-математичну модель Землі. “Тверда” Земля має кілька геосфер або оболонок: тонку зовнішню – *кору*, величезну – *мантію*, яка займає 5/6 об'єму всієї Землі (2/3 маси Землі), і *ядро*.

Для пізнання глибоких надр Землі тепер найбільше знань дає *сейсмологія* – наука про землетруси.

Від епіцентра землетрусу розходяться пружні сейсмічні хвилі двох видів: поздовжні та поперечні. Швидкість поздовжніх хвиль майже вдвічі більша від швидкості поперечних. За допомогою сейсмографа записують коливання ґрунту. За сейсмограмами вдається встановити шлях пружної хвилі в товщі Землі та її швидкість у кожній точці шляху. Швидкість хвилі залежить від складу гірської породи, від температури і тиску, під яким ця порода перебуває. Сейсмічні хвилі, як й інші, можуть відбиватися і заломлюватися. Їх шляхи в Землі, як правило, викривлені.

З аналізу змін швидкостей сейсмічних хвиль роблять висновок про склад кори і мантії. Розподіл густини в мантії і ядрі визначають обчисленнями.

Виходячи із змін густини з глибиною, обчислюють зміну сили тяжіння. У корі і мантії вона приблизно однакова. У ядрі сила тяжіння зменшується з глибиною і в його центрі дорівнює нулю.

Знаючи зміну густини і сили тяжіння, обчислюють зміну тиску з глибиною, він швидко зростає і в центрі Землі досягає порядку 3,7 млн атм.

Кора

Як показують дослідження, поділ земної поверхні на материки і океани не випадковий, а залежить від будови земної кори.

Материкова кора побудована інакше і відрізняється за товщиною від океанічної. Дрібні моря і затоки завглибшки до 200 м – це частини материків,

тимчасово залиті морем. Їх називають *шельфом*. На шельфі розміщені Азовське, Біле і Східно-Сибірське моря, Гудзонова затока та ін. Геологічні дослідження показують, що в різні епохи море заливало інші частини материків.

Океанічна кора розміщена лише там, де глибина моря перевищує 4 км.

Решта площі Землі покрита корою проміжного типу. Вся кора займає 1 % Землі за об'ємом і близько 0,5 % за масою.

Материкова кора складається в основному з трьох шарів: осадового, гранітного і базальтового. *Гранітним* і *базальтовим* шари назвали тому, що швидкості сейсмічних хвиль у них такі самі, як і в граніті і базальті.

Океанічна кора побудована інакше, ніж материкова, гранітного шару в неї немає зовсім, осадовий шар дуже тонкий.

Проміжна кора в різних місцях має різну будову. Товщина материкової кори 30–40 км, океанічної – від 3 до 7 км.

Мантія

Об'єм мантії становить 83 % об'єму Землі, маса – 67 % маси нашої планети. Швидкості сейсмічних хвиль у мантії зростають з глибиною, але, починаючи з глибини 80–100 км під материком і 50 км під океанами, вони зменшуються на відстані близько 100 км. Тут речовина перебуває в рідкому стані. Починаючи з глибини 400 км швидкість сейсмічних хвиль знову збільшується.

Тиск і температура в Землі зростають з глибиною. Збільшення температури веде до збільшення об'єму і нарешті до плавлення речовини, а збільшення тиску – до підвищення температури плавлення. У всіх інших зонах мантії вирішальну роль відіграє тиск, і речовина перебуває в твердому стані, а на відстані 100 км речовина перебуває в рідкому стані. Густина речовини мантії на межі з ядром досягає $9,4 \cdot 10^3$ кг/м³. Це пояснюється, з одного боку, підвищенням вмістом важких елементів – заліза, нікелю, а з другого – величезним тиском.

Ядро

Ядро займає 16 % земної кулі за об'ємом і 31,5 % за масою. Його поділяють в основному на дві частини: *зовнішнє ядро* і *внутрішнє ядро*, або *суб'ядро*. Поперечні хвилі крізь зовнішнє ядро не проходять, припускають, що воно має рідкий стан. Дані сейсмології свідчать про те, що суб'ядро тверде.

Тиск на межі мантії і ядра порядку 1,5 млн атм, у центрі ядра – порядку 3,7 млн атм, середня густина речовини в земному ядрі близько 11 т/м³. Склад суб'ядра невідомий. За однією з гіпотез, суб'ядро – залізне.

Отже, модель будови земної кулі дуже складна. Земля, як і інші планети, утворилася з газопилової хмари. Щоб з'явилась атмосфера, гідросфера і земна кора і щоб надра Землі розшарувались на різні геосфери, в ній мали відбутися якісь гігантські процеси, вони відбуваються і тепер, про що свідчить динаміка життя земної кори.

Ми могли б розв'язати багато питань, якби точніше знали склад земного ядра і розподіл температури Землі по глибині; припускають, що температура ядра дорівнює не менше 2000 °С і не більше 5000 °С. Якби ми добре знали механізм розвитку Землі, то зрозуміли б закони утворення руд та інших корисних копалин. Але розгадати причини всього цього, зрозуміти всі складні взаємозв'язки різних процесів у земній кулі досі не вдалося.

Будова планет

Моделі планет земної групи багато в чому повторюють внутрішню будову Землі.

Моделі планет-гігантів відрізняються від моделі Землі.

Основною своєрідністю внутрішньої будови Юпітера і Сатурна є перехід водню з молекулярної фази в металічну, який відбувається на глибині 1500 км під тиском 1 млн атм. Металічний водень – рідина, густина якої дорівнює густині води. У центрі планети – ядро, стан речовини якого близький до твердого. Тиск у ядрі порядку 80 млн атм, температура 25 000 К. За таких умов речовина перебуває в незвичайній фазі.

У Сатурна мантія з металічного водню розпочинається на глибині 4000 км, ядро Сатурна складається з більш легких компонентів, ніж у Юпітера. Температура в ядрі порядку 20 000 К, тиск 50 млн атм.

Ядра планет-гігантів – металосилікатні, найбільші в Урана і Нептуна.

Розраховано також моделі супутників Юпітера – Ганімеда, Каллісто і Європи. За цими моделями, під крижаною корою лежить шар рідкої води завтовшки близько 100 км.

§ 88. Сублімація. Сублімація поверхневого шару ядер комет при їх зближенні з Сонцем

Сублімація. Десублімація

У деяких твердих тіл, таких, наприклад, як нафталін, йод, камфора, тверда вуглекислота (сухий лід), спостерігається перехід речовини відразу з твердого стану в газоподібний, тобто відбувається випаровування.

Перехід твердого стану в газоподібний, минаючи рідкий, називається сублімацією. Зворотний процес називають десублімацією. Усі тверді тіла сублімують, але процес сублімації у рідких тіл відбувається з різною швидкістю. При кімнатній температурі швидкість перебігу цього процесу така мала, що сублімацію практично виявити не можна.

Процес сублімації відбувається як при нагріванні твердого тіла, так і без підведення теплоти ззовні. В останньому випадку внутрішня енергія перерозподіляється між твердим і газоподібним станами. При сублімації тіло охолоджується, бо його залишають найшвидші молекули, що мають кінетичну енергію, достатню для подолання молекулярного притягання і їх відривання від поверхні твердого тіла. Середня кінетична енергія молекул, які залишаються, зменшується; отже, тіло охолоджується. Щоб температура тіла, яке сублімує, була стала, до нього ззовні треба підводити теплоту.

Сублімація поверхневого шару ядер комет

Процес сублімації відбувається і у Всесвіті. При зближенні з Сонцем поверхневий шар ядер комет сублімується. Маленьке ядро діаметром у кілька кілометрів – єдина тверда частинка комети, і в ньому практично зосереджена вся маса комети. Маса комет дуже мала і зовсім не впливає на рух планет. А планети вносять значні збурення в рух комет.

Ядро комети, очевидно, складається з суміші пилинок, твердих частинок речовини і замерзлих газів, таких, як вуглекислий газ, аміак, метан. У далеких від Сонця областях комети не мають хвостів. При наближенні комети до Сонця ядро прогрівається і з нього виділяються гази і пил. Вони утворюють навколо ядра газову оболонку, яка разом з ядром є головою комети. Гази і пил, які викидаються з ядра в голову комети, відштовхуються під дією тиску сонячного світла і корпускулярних потоків від Сонця і утворюють хвіст комети, завжди спрямований у бік, протилежний від Сонця (рис. 9.2). Найчастіше він прямий, тонкий, струменястий. Великі та яскраві комети іноді мають широкий, зігнутий віялом хвіст.

Чим ближче до Сонця підходить комета, тим вона яскравіша і тим довший її хвіст (див. рис. 9.2) внаслідок більшого її опромінення та інтенсивного виділення газів. Довжина хвоста комети іноді досягає відстані від Землі до Сонця, а голова комети – розмірів Сонця. З віддаленням від Сонця вигляд і яскравість комети змінюються в зворотному порядку і комета зникає, досягнувши орбіти Юпітера.



Рис. 9.2

§ 89. Діаграма фазових переходів. Потрійна точка

Фазові переходи

Вище були розглянуті процеси плавлення, кристалізації, випаровування, які називають *фазовими переходами першого роду*. Вони характеризуються тим, що під час їх перебігу поглинається або виділяється теплота. Щоб описати стан речовини і фазові переходи, які відбуваються в ній, користуються діаграмою стану. Як правило, ці діаграми будують у координатах $p - T$ (тиск – температура). Кожна точка на діаграмі зображає певний рівноважний стан речовини. Як приклад розглянемо діаграму станів води (рис. 9.3). У стані динамічної рівноваги може перебувати рідина, яка стикається зі своєю насиченою парою. Цей стан на діаграмі зображено кривою AM . Якщо, не змінюючи об'єму цієї системи, віднімати від неї теплоту, то цей процес супроводжуватиметься зниженням температури і зменшенням тиску. Температура знижуватиметься доти, поки не досягне значення температури кристалізації.

У процесі кристалізації температура і тиск не змінюються. Область, розміщена на діаграмі нижче від MA (нижчі тиски або вищі температури), є областю газоподібного стану; область, розміщена вище від MA , – областю рідкого стану речовини. Лінія BM відповідає рівноважному стану твердого тіла і рідини (льоду і води), тобто вона являє собою криву плавлення твердого тіла, коли тверде тіло (кристали льоду) і рідина (вода) перебувають у стані рівноваги. В області BMA вода перебуває лише в рідкому стані.

Потрійна точка

Крива CM є лінією рівноважного стану твердого тіла і газу, тобто це – крива сублимації. В області CMA вода може перебувати лише в газоподібному стані (пара води). В області CMB вода перебуває в твердому стані і є однією з модифікацій льоду. Три криві рівноваги перетинаються в одній точці M . Цю точку називають *потрійною точкою*. Вона характеризується тим, що при значеннях T_M і p_M речовина одночасно перебуває в рівновазі в трьох фазах: твердій, рідкій і газоподібній. Для води $T_M = 273,16$ К.

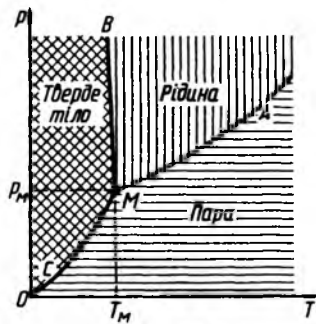


Рис. 9.3

Діаграму станів для кожної речовини будують за експериментальними даними. За діаграмою станів можна визначити, в якому стані перебуває речовина при заданих параметрах (тиску і температури).

§ 90. Розчини і сплави

Розчини

Під *розчином* розуміють *однорідні речовини, які складаються з двох або більшої кількості компонентів*. Розчини можуть бути в різних агрегатних станах: газоподібному, рідкому і твердому. Розчини газів, рідин або твердих тіл у рідині називають *рідким розчином*, а рідина, яка розчиняє газоподібні, рідкі та тверді речовини, – *розчинником*. Особливе місце серед розчинників займають рідкі метали, наприклад ртуть, яка утворює амальгами – розчини заліза, кобальту і нікелю в ртуті, що мають феромагнітні властивості; розплавлене залізо використовують як розчинник для добування штучних алмазів.

Найбільш поширеним розчинником для більшості речовин є вода.

Кухонна сіль добре розчиняється у воді, але у воду можна насипати стільки солі, що вона перестане розчинятись; такий розчин називають *насиченим*. *Концентрація речовини в його насиченому розчині називається розчинністю*. Розчинність багатьох речовин залежить від температури, наприклад, від її підвищення розчинність повітря у воді зменшується, і в такий спосіб можна дістати перегріту рідину, а розчинність цукру у воді збільшується.

Розчинники дуже впливають на фізичні та хімічні властивості речовин. Наприклад, залежно від розчинника при охолодженні або випаровуванні насиченого розчину твердої речовини вона може кристалізуватись у різних структурах. Розчинники впливають на колір речовини в розчині та інші властивості.

Сплави

У техніці дуже широко застосовують матеріали, які називають сплавами. Під *сплавом* розуміють *макроскопічні однорідні системи з двох (або більше) металів або неметалів, що мають характерні властивості металів*. Таке застосування сплавів зумовлене тим, що залежно від складу сплаву і методів його обробки можна дістати матеріал з різноманітними властивостями. У різних галузях промисловості використовують безліч сплавів, властивості яких відрізняються від властивостей “чистих” металів. Сплави поділяють на дві групи залежно від основного металу, що входить до їх складу, і призначення: 1) залізни, нікелеві, кобальтові і т. д. Наприклад, різні сталі – це сплави, основним металом в яких є залізо; крім того, до них входять вуглець, хром, вольфрам, марганець та інші метали. У літакобудуванні використовують сплави алюмінію або магнію з міддю, залізом, цинком та ін.; 2) будівельні, інструментальні, конструкційні і сплави з особливими фізичними властивостями. Наприклад, дюралю-

лі – це сплави, які одночасно мають такі властивості, як легкість і міцність. Ніхром – сплав, що має великий електричний опір; інвар – сплав, який майже не розширюється від нагрівання.

Чому властивості сплавів відрізняються від властивостей елементів, які входять до складу сплавів? На це запитання не можна дати однозначної відповіді, оскільки сплави можуть мати різну, іноді дуже складну будову, особливо якщо між елементами, що утворюють сплав, можливі хімічні сполуки. Тому вивчення фізичних властивостей сплавів має дуже велике практичне і теоретичне значення.

§ 91. Метеорити

Метеорити – це камені або куски заліза, що впали на Землю з міжпланетного простору. Метеорит, що має невеликі розміри, іноді зовсім випаровується в атмосфері Землі. Здебільшого маса метеорита за час польоту значно зменшується. До Землі долітають тільки рештки метеорита, які звичайно встигають охолонути, коли космічну швидкість його вже погасив опір повітря.

Від сильного опору повітря метеорит нерідко розколюється і з гуркотом падає на Землю у вигляді осколків. Іноді випадає метеоритний дощ. Під час польоту метеорити оплавляються і покриваються чорною кіркою. Один такий «чорний камінь» у Мецці вбудований у стіну храму і є предметом релігійного поклоніння.

Буває три види метеоритів: *кам'яні, залізні і залізокам'яні*. Іноді метеорити знаходять через багато років після їхнього падіння. Особливо багато знаходять залізних метеоритів. Метеорит є власністю держави і підлягає передаванню в музей для вивчення. За вмістом радіоактивних елементів і свинцю визначають вік метеоритів. Вік різний, але найстаріші метеорити не старші від земної кори.

Деякі дуже великі метеорити при значній швидкості падіння вибухають і утворюють метеоритні кратери, які нагадують місячні. Часто метеорит майже зовсім випаровується. Це трапилось у 1908 р. з Тунгуським метеоритом, який зруйнував повітряною хвилею, що супроводжувала його, ліс на величезній площі.

Найбільший з добре вивчених кратерів знаходиться в Арізоні (США). Його діаметр 1200 м і глибина 200 м. Цей кратер утворився, очевидно, близько 5000 років тому. Знайдено сліди ще більших і давніших метеоритних кратерів. Усі метеорити – це члени Сонячної системи.

Судячи з того, що кількість астероїдів зростає із зменшенням їхніх розмірів, і з того, що відкрито вже дуже багато дрібних астероїдів, які перетинають орбіту Марса, можна вважати, що метеорити – це дуже дрібні астероїди з орбітами, які перетинають орбіту Землі. Структура метеоритів

свідчить про те, що на них впливали високі температури й тиски і, отже, метеорити могли існувати в надрах зруйнованої планети.

Метеорити містять лише відомі на Землі хімічні елементи, що знову свідчить про матеріальну єдність Всесвіту. Це спростовує релігійне вчення про відмінність земного й небесного.

Короткі висновки

- Перехід речовини з кристалічного твердого стану в рідкий називають плавленням. Плавлення відбувається з поглинанням теплоти. Головними характеристиками плавлення є температура плавлення і теплота плавлення:

$$Q = \lambda m.$$

- Наявність певної температури плавлення – важлива ознака кристалічної будови твердих тіл. Температура плавлення залежить від зовнішнього тиску.
- Перехід речовини з одного стану в інший називають фазовим. Під час фазового переходу першого роду властивості речовини (випаровування, конденсація, плавлення, тверднення) стрибкоподібно змінюються.
- Згідно з фізико-математичною моделлю, «тверда» Земля складається з кількох оболонок: кори, мантії, ядра. Моделі планет земної групи багато в чому повторюють внутрішню будову Землі.
- На діаграмі станів зображено рівноважні стани термодинамічної системи при різних значеннях параметрів – тиску і температури. Точка на діаграмі стану, яка відповідає рівноважному існуванню трьох фаз речовини, називається потрійною точкою.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Поясніть процес плавлення з точки зору молекулярно-кінетичної теорії.
 2. Як залежить температура плавлення від тиску?
 3. Що називають питомою теплотою плавлення?
 4. Як змінюються об'єм і густина речовини під час плавлення?
 5. Дайте поняття фази речовини.
 6. Які фазові переходи першого роду вам відомі?
 7. Розкажіть про внутрішню будову Землі.
 8. Дайте поняття процесу сублімації.
 9. За діаграмою станів води розкажіть, в якому стані перебуває речовина при заданих параметрах (тиску і температурі).
-

Приклад розв'язування задач

Задача. Яка кількість теплоти витрачається на плавлення алюмінієвої болванки масою 200 кг, що має температуру 20 °С?

Дано: $m = 200$ кг; $c = 880$ Дж/(кг·К); $\lambda = 3,9 \cdot 10^5$ Дж/кг; $T_1 = (20 + 273)$ К = 293 К; $T_{пл} = (660 + 273)$ К = 933 К.

Знайти: Q , T .

Розв'язання. На нагрівання алюмінію масою m від T_1 до $T_{\text{пл}}$ потрібна кількість теплоти

$$Q_1 = cm(T_{\text{пл}} - T_1),$$

а для його плавлення витрачається кількість теплоти

$$Q_2 = \lambda m.$$

Звідси

$$Q = Q_1 + Q_2 = cm(T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda m.$$

Обчислення:

$$Q = 880 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 200 \text{ кг} (933 - 293) \text{ К} + \\ + 3,9 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot 200 \text{ кг} = 19 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 190 \text{ МДж}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Яка кількість теплоти потрібна для перетворення 5 кг льоду, взятого при температурі -20°C , на пару, температура якої 100°C ?
2. Яку кількість теплоти треба затратити, щоб розплавити при температурі плавлення 20 кг свинцю?
3. Щоб охолодити 5 л води від 20 до 8°C , в неї кидають лід при температурі 0°C . Визначити масу льоду, необхідну для охолодження води.
4. Суміш, яка складається з 5 кг льоду і 15 кг води при загальній температурі 0°C , нагрівають до температури 80°C , пропускають через неї водяну пару при 100°C . Визначити потрібну для цього масу пари.
5. У посудині міститься суміш 0,5 л води і 0,5 кг льоду при 0°C . Теплоємність посудини 1680 Дж/К. Яку кількість водяної стоградусної пари було пропущено у воду, якщо весь лід розтанув і температура води встановилась 30°C ?

РОЗДІЛ 3 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

Поданий тут матеріал присвячений одному з найважливіших розділів курсу фізики – вченню про електрику і магнетизм. Якщо в механіці вивчають різні види руху макроскопічних тіл і взаємодії між ними, а в молекулярній фізиці – властивості тіл залежно від їх будови, від сил взаємодії між молекулами й атомами і від характеру теплового руху цих частинок, то в електродинаміці розглядають взаємодії, які спричинюються електромагнітним полем.

Сучасна фізика розглядає чотири види взаємодії: гравітаційну, електромагнітну, ядерну і слабку.

Гравітаційна взаємодія помітна лише між тілами астрономічних масштабів. Ядерна (сильна) взаємодія проявляється лише між елементарними частинками від їх зближення на відстань порядку 10^{-15} м, а слабка – при взаємоперетвореннях певних елементарних частинок. Особливу роль у природі відіграє електромагнітна взаємодія – взаємодія між електрично зарядженими частинками або макроскопічними зарядженими тілами. Розгляд електромагнітних взаємодій ґрунтується на принципі близькодії. Згідно з цим принципом, взаємодія між зарядженими частинками або тілами поширюється із скінченною швидкістю, яка дорівнює швидкості світла. У вакуумі ця швидкість становить $3 \cdot 10^8$ м/с.

Народженню електродинаміки як науки передували численні відкриття і експерименти. У 1785 р. французький фізик Ш. Кулон експериментально встановив закон взаємодії двох нерухомих точкових зарядів. У 1820 р. датський фізик Х. К. Ерстед показав, що струми, які проходять по проводах, створюють навколо себе магнітне поле. Потім А. М. Ампер, Ж. Б. Біо і Ф. Савар експериментально, а згодом і теоретично визначили силу дії магнітного поля на провідник із струмом. У 1851 р. М. Фарадей відкрив електромагнітну індукцію (виникнення електричного поля від усякої зміни магнітного).

Фундаментом електродинаміки стала теорія англійського вченого Дж. Максвелла, опублікована в 1867 р. Виходячи з дослідних даних, він запропонував рівняння, достатні для описування всіх електромагнітних явищ, в яких не проявляються квантові закономірності. Фізичний зміст рівнянь Максвелла полягає в тому, що в природі існує єдине електромагнітне поле, яке можна поділити на електричне і магнітне тільки умовно.

Практичного розвитку теорія Дж. Максвелла набула в працях Г. Р. Герца і О. С. Попова – великого російського фізика, винахідника радіо.

ГЛАВА 10 ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

§ 92. Електричні заряди. Закон збереження заряду

Електричний заряд

Усі тіла в природі складаються з найдрібніших частинок, які умовно назвали елементарними. Елементарні частинки характеризуються масою і електричним зарядом. Сила електромагнітної взаємодії частинок на багато порядків перевищує силу їхньої гравітаційної взаємодії. Значення сили електромагнітної взаємодії частинок визначається їхніми електричними зарядами.

За сучасними уявленнями, *електричний заряд є фізичною величиною, яка визначає інтенсивність електромагнітних взаємодій.*

Два знаки електричних зарядів

У природі існують частинки з електричними зарядами протилежних знаків. Заряд електрона вважають негативним, а заряд протона – елементарної частинки, яка входить до складу ядра атома, – позитивним. Більшість тіл *електрично нейтральні*; кількість електронів у них дорівнює кількості протонів. Атом будь-якої речовини нейтральний. Якщо порушити електричну нейтральність тіла, то воно стає *наелектризованим*. Тіло, заряджене негативно, означає, що воно має надлишок електронів. Тіло, в якого електронів менше, ніж позитивно заряджених частинок, заряджене позитивно. Позитивний заряд утворюється, наприклад, на склі, натертому шкірою, негативний – на бурштині, натертому шерстю.

Елементарний заряд

Під час електризації електричний заряд змінюється не безперервно і довільно, а тільки на точно певне значення, що дорівнює або кратне мінімальній кількості електрики, яка називається *елементарним електричним зарядом*. Отже,

електричний заряд має дискретний характер і змінюється на цілу кратну величину (квантується).

Найменшу за масою стабільну частинку, яка має елементарний електричний негативний заряд, називають *електроном*. Заряд електрона $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Маса електрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг. Заряд *протона* позитивний і за модулем дорівнює заряду електрона, його маса $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

Заряд тіла, яке складається з N заряджених частинок, кратний цілим значенням заряду електрона: $Q = \pm Ne$. Елементарний заряд уперше виміряв Р. Е. Міллікен у 1909 р.

Чи існують дробові заряди? Це припущення виникло в зв'язку з передбаченням існування кварків – частинок, з яких побудована більшість важких елементарних частинок, наприклад протонів. Припускали, що заряд кварків $\pm 1/3e, \pm 2/3e$. Кварки шукали багато вчених різними методами, але всі вони мали негативний результат. Отже, тепер експериментально з великою точністю встановлено, що **дробових зарядів у вільному стані не існує.**

Закон збереження заряду

Значення заряду, яке вимірюють у різних інерційних системах відліку, завжди однакове і не залежить від того, рухається він чи перебуває в спокої.

Сумарний заряд електрично ізольованої системи не змінюється.

Електричні заряди не створюються і не зникають, а тільки переміщуються від одного тіла до іншого або перерозподіляються всередині даного тіла:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \text{const.} \quad (10.1)$$

Це твердження називається *законом збереження електричного заряду*. Крім протонів і електронів, існує безліч інших елементарних заряджених частинок. Усі вони беруть участь у різних процесах взаємоперетворень, але, який би не був процес взаємоперетворень, сумарний заряд частинок до взаємоперетворення дорівнює сумарному заряду після взаємоперетворення.

Отже, заряд не є самостійною суттю, що не залежить від матерії, він – одна з властивостей матерії. Закон збереження заряду має таке своє фундаментальне значення у фізиці, як і інші закони збереження (енергії, імпульсу, моменту імпульсу та ін.).

§ 93. Закон Кулона

Розділ електродинаміки, в якому вивчають взаємодію нерухомих електричних зарядів, називають електростатикою. Така взаємодія здійснюється через *електростатичне поле*.

Основний закон електростатики – закон взаємодії двох нерухомих точкових зарядів (електрично заряджених тіл, розміри яких малі порівняно з від-

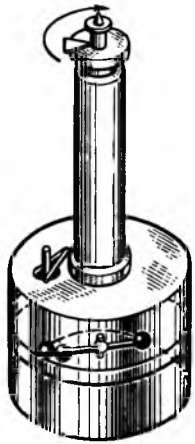


Рис. 10.1

станями між ними) – експериментально встановив французький фізик Ш. Кулон (1736–1806) у 1785 р., і тому його назвали законом Кулона*.

Щоб визначити силу взаємодії двох зарядів, Кулон скористався *крутильними терезами* (рис. 10.1) – установкою, яка складається зі скляної палички, підвішеної на тонкому пружному дроті і поміщеному у скляну циліндричну посудину. На одному кінці палички закріплюють маленьку металеву кульку, а на другому – противагу. Верхній кінець нитки кріплять до шкали з поділками. За допомогою цієї шкали визначають кут закручування нитки. Крізь отвір у кришці посудини вводять другу таку саму кульку. Якщо кулькам надати заряду, то вони взаємодіють між собою. Про силу взаємодії роблять висновок з кута закручування нитки. У загальному випадку сили взаємодії залежать від форми і розмірів наелектризованих

тіл і характеру розподілу зарядів на них. У випадку нерухомих точкових зарядів, тобто зарядів, розподілених на тілах, лінійні розміри яких малі порівняно з відстанями, на яких розглядають їх взаємодію, слушним є закон Кулона. Кулон експериментально встановив, що коли заряд кульки, яку вносять у прилад, збільшити в n разів, залишивши заряд кульки, закріпленої на скляній паличці, сталим, то сила їх взаємодії збільшується в n разів. Якщо відстань між кульками збільшувати в n разів, то сила їх взаємодії зменшиться в n^2 разів. Отже,

сила електричної взаємодії між двома нерухомими точковими електрично зарядженими тілами у вакуумі пропорційна добутку їх зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

В умовах взаємодії однойменні заряди відштовхуються, різнойменні – притягуються. Сили Кулона напрямлені по прямій, яка сполучає ці заряди.

Закон Кулона для взаємодії точкових зарядів Q_1 і Q_2 , розміщених на відстані r один від одного у вакуумі, записують у формі

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \frac{r}{r}, \quad (10.2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від вибору системи одиниць фізичних величин.

Сила відштовхування F , яка діє на заряд Q_2 з боку однойменного заряду Q_1 , збігається за напрямом з радіусом-вектором r , проведеним з Q_1 до цього заряду (рис. 10.2, а). Сила притягання, яка діє на заряд Q_2 з боку

різнойменного заряду Q_1 , має протилежний напрям (рис. 10.2, б). Сили відштовхування вважають додатними, сили притягання – від’ємними.

У скалярній формі закон Кулона записують у вигляді

$$F = k \frac{|Q_1| |Q_2|}{r^2}. \quad (10.3)$$

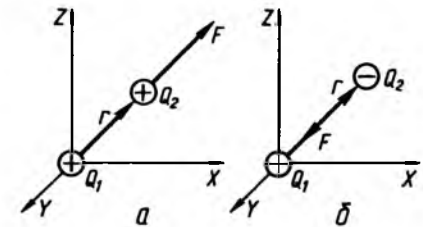


Рис. 10.2

Знак модуля в позначенні заряду далі не ставитимемо.

У СІ заряд – довільна величина, яку визначають через основну величину – силу струму. Одиниця електричного заряду в СІ – **кулон** (Кл).

Кулон дорівнює електричному заряду, що проходить за 1 с через поперечний переріз провідника при струмі 1 А.

Коефіцієнт пропорційності в законі Кулона (10.2) у СІ визначають за формулою

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (10.4)$$

Закон Кулона в СІ записують у вигляді

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (10.5)$$

Величину ϵ_0 називають *електричною сталою*, це одна з фізичних констант. Щоб визначити її числове значення, розглянемо випадок взаємодії зарядів по 1 Кл кожний, розміщених на відстані 1 м один від одного. Відомо, що сила взаємодії зарядів у цьому разі дорівнює $9 \cdot 10^9$ Н. З формули (10.5) знайдемо

$$\epsilon_0 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi r^2 F} = \frac{1 \text{ Кл}^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ Н}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2), \quad (10.6)$$

або $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

§ 94. Електричне поле. Напруженість поля

Електричне поле

Електричне поле – це особливий вид матерії, що пов’язаний з електричними зарядами і передає дії зарядів один на одного.

Електричне поле не виникає при взаємодії зарядів. Будь-який заряд незалежно від наявності інших зарядів завжди має електричне поле. *Якщо заряд нерухомий, то електричне поле називають електростатичним.*

* Цей закон відкрив англійський вчений Г. Кавендіш за 13 років до відкриття його Кулоном.

Воно не змінюється в часі і створюється тільки електричними зарядами.

Вивчаючи основи електродинаміки, ми розглядатимемо і електричне поле, яке змінюється в часі, але не пов'язане із зарядами нерозривно. Багато властивостей статичних і змінних полів збігаються, але між ними є й істотні відмінності. Надалі поле називатимемо електричним, якщо дана властивість однаковою мірою притаманна як статичним, так і змінним полям.

У сучасній фізиці електричне поле розглядають як особливу форму матерії, що має специфічні фізичні властивості. Основна з них така: на електричні заряди, розміщені в цьому полі, діють сили, пропорційні цим зарядам. Електричне поле можна виявити, якщо в простір, який оточує заряд Q , внести інший заряд. Звичайно для дослідження властивостей поля користуються позитивним зарядом, який називають *пробним* і позначають $Q_{\text{пр}}$. При цьому вважають, що пробний заряд не спотворює поля, яке вивчають, тобто нехтують його власним полем. На пробний заряд, вміщений в яку-небудь точку поля, створеного зарядом Q , діє сила

$$F = \frac{QQ_{\text{пр}}}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Напруженість електричного поля

Якщо в ту саму точку поля вносити різні заряди Q_1, Q_2, Q_3, \dots , то на них діятимуть різні сили F_1, F_2, F_3, \dots , але відношення $F_1/Q_1 = F_2/Q_2 = F_3/Q_3$ для цієї точки поля завжди буде сталим.

Для різних точок поля можна скласти точно такі самі відношення, тобто цією величиною можна кількісно характеризувати поле в різних точках. Відношення $E = F/Q_{\text{пр}}$ називають *напруженістю електричного поля*:

$$E = \frac{F}{Q_{\text{пр}}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (10.7)$$

де r – відстань від заряду Q , який створює поле, до точки поля, в якій визначають напруженість.

У СІ напруженість електричного поля визначають у *ньютон на кулон* (Н/Кл).

Напруженість – силова характеристика поля, вона чисельно дорівнює силі, яка діє на одиничний позитивний заряд:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Напруженість – величина векторна. Напрямом вектора напруженості E є напрям сили, з якою поле діє на пробний заряд, вміщений у певну точку поля.

Лінії напруженості

Електричне поле графічно зображають *силовими лініями*, або *лініями напруженості поля*. Ними називають лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з вектором напруженості в даній точці поля.

Лінії напруженості електростатичного поля ніколи не можуть бути замкнені самі на себе. Вони мають обов'язково початок і кінець або йдуть у нескінченність.

Це свідчить про наявність у природі двох родів електричних зарядів. Умовились вважати, що

лінії напруженості електричного поля напрямлені від позитивного заряду до негативного, тобто виходять з позитивного, а входять у негативний заряд.

Лінії напруженості ніколи не перетинаються.

Перетин ліній означав би, що вектор напруженості електричного поля в точці перетину не має певного напрямку. Густиною ліній напруженості характеризують напруженість поля. У місцях, де напруженість поля менша, лінії проходять рідше. Приклади найпростіших електричних полів подано на рис. 10.3, а – з.

Електричне поле, у всіх точках якого напруженість поля однакова за модулем і напрямом ($E = \text{const}$), є *однорідним*. Прикладом такого поля можуть бути електричні поля рівномірно зарядженої площини (рис. 10.4, а) і плоского конденсатора на відстані від країв його обкладок (рис. 10.4, б).

Кількість силових ліній, що проходять перпендикулярно до площини S , або потік вектора напруженості електричного поля обчислюють за формулою

$$\Phi_E = E_n S.$$

Якщо силові лінії проходять перпендикулярно до поверхні сфери, то

$$\Phi_E = E \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}.$$

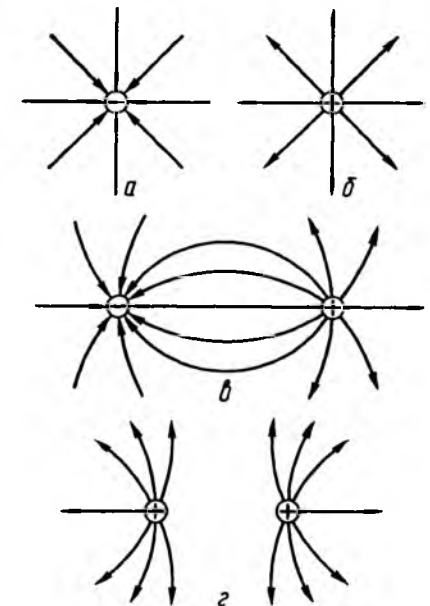


Рис. 10.3

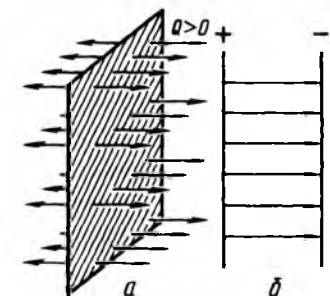


Рис. 10.4

§ 95. Принцип суперпозиції полів

Принцип суперпозиції

Результуюча сила, яка діє на точковий заряд Q з боку двох інших зарядів Q_1 і Q_2 , дорівнює геометричній сумі сил F_1 і F_2 з боку кожного із зарядів Q_1 і Q_2 . Оскільки

$$F_1 = QE_1 \text{ і } F_2 = QE_2,$$

де E_1 і E_2 – напруженості полів, створених зарядами Q_1 і Q_2 , то

$$F = QE_1 + QE_2 = Q(E_1 + E_2).$$

З цієї рівності випливає, що геометрична сума $E_1 + E_2$ – результуюча напруженість поля в точці, де розміщений заряд Q (рис. 10.5):

$$E = \frac{F}{Q} E_1 + E_2.$$

У цьому полягає *принцип накладання, або суперпозиції полів*.

Якщо поле створене двома зарядами Q_1 і Q_2 , то модуль вектора E визначають за теоремою косинусів (рис. 10.5):

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha}, \quad (10.8)$$

де E_1 , E_2 – напруженості електричного поля в точці A , які створюють заряди Q_1 , Q_2 ; α – кут між E_1 , E_2 . Загальний принцип суперпозиції:

якщо в певній точці простору різні заряджені частинки створюють поля напруженості E_1 , E_2 , E_3 і т. д., то результуюча напруженість поля в цій точці поля дорівнює

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad (10.9)$$

Принцип суперпозиції полів полягає в тому, що поля, накладаючись, ніяк не впливають одне на одне. Завдяки цьому принципу, за (10.7) для напруженості поля точкового заряду, можна знайти напруженість поля системи заряджених частинок у будь-якій точці.

У разі векторного поля обчислення напруженості системи електричних зарядів спрощують, використовуючи *теорему Остроградського–Гаусса*:

потік вектора напруженості електричного поля у вакуумі крізь замкнену поверхню довільної форми дорівнює відношенню алгебраїчної суми зарядів всередині цієї поверхні до електричної сталі ϵ_0 :

$$\Phi_E = \left(\sum_{l=1}^n Q_l \right) / \epsilon_0.$$

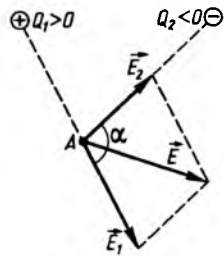


Рис. 10.5

Диполь

Систему, яка складається з двох однакових за значенням, але різнойменних точкових зарядів, розміщених на деякій відстані l один від одного, називають *електричним диполем* (рис. 10.6). Відрізок прямої l , який сполучає обидва заряди, називається *віссю диполя*.

Основною характеристикою диполя є його *електричний* (або *дипольний*) *момент* – вектор, який чисельно дорівнює добутку Ql і напрямлений від негативного заряду до позитивного:

$$p = Ql. \quad (10.10)$$

Якщо диполь помістити в однорідне електричне поле напруженістю E (рис. 10.7), то на кожний з його зарядів діє сила: на позитивний $F_+ = +QE$, на негативний $F_- = -QE$. Ці сили однакові за модулем, але протилежні за напрямом. Вони утворюють пару сил, плече якої дорівнює $l \sin \alpha$, і створюють момент пари сил M .

Вектор M напрямлений перпендикулярно до векторів p і E (на рис. 10.7 – від нас). Модуль M визначається співвідношенням $M = QEl \sin \alpha$, де α – кут між векторами p і E . В однорідному полі момент пари сил прагне повернути диполь так, щоб вектори p і E були паралельні.

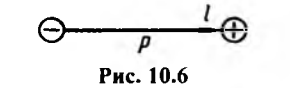


Рис. 10.6

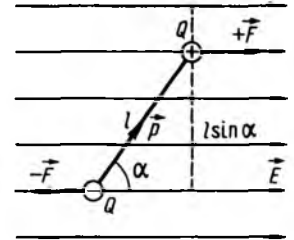


Рис. 10.7

§ 96. Робота сил електростатичного поля

На заряд, розміщений у стаціонарному (такому, що не змінюється з часом) електричному полі, діє сила, внаслідок чого можливе переміщення заряду. Внаслідок переміщення заряду в електричному полі виконується робота. Якщо заряд Q переміщується на Δs , то під дією сили F виконується робота

$$\Delta A = F \Delta s \cos \alpha = QE \Delta s \cos \alpha,$$

де Δs – модуль вектора переміщення; α – кут між напрямками векторів E і Δs . Якщо поле однорідне ($E = \text{const}$), то сила $F = QE$, яка діє на заряд з боку поля, також стала. У цьому разі робота

$$A = QEs \cos \alpha. \quad (10.11)$$

Якщо поле неоднорідне, як, наприклад, поле точкового заряду, то напруженість поля в різних його точках різна. Щоб обчислити роботу в

цьому випадку, з'ясуємо, чи залежить робота електричних сил при переміщенні заряду з однієї точки поля в іншу від форми шляху.

Нехай заряд Q переміщується з точки 1 у точку 2 в однорідному електричному полі напруженістю E (рис. 10.8). З точки 1 у точку 2 заряд може переміститись різними траєкторіями, наприклад 1-2 і 1-3-2. Порівняємо роботи сил поля в обох випадках.

За формулою (10.10), робота сил поля на шляху 1-2

$$A_{12} = QE(x_2 - x_1),$$

оскільки $s \cos \alpha = x_2 - x_1$. Робота сил поля на шляху 1-3-2 дорівнює сумі робіт A_{13} і A_{32} , але $A_{32} = 0$. Оскільки вектори напруженості і переміщення взаємно перпендикулярні і скалярний добуток їх дорівнює нулю, то

$$A_{132} = A_{13} + A_{32} = QE(x_2 - x_1).$$

Отже, $A_{12} = A_{132}$, тобто

робота сил електростатичного поля при переміщенні заряду не залежить від форми шляху, а залежить тільки від взаємного розміщення початкової і кінцевої точок траєкторії.

Це – *властивість потенціальних полів*. З неї випливає (рис. 10.9), що робота, яка виконується в електричному полі по замкненому контуру, дорівнює нулю ($x_1 = x_2$).

При переміщенні зарядів змінюється взаємне розміщення їх, тому робота, яку виконують електричні сили, у цьому разі дорівнює зміні потенціальної енергії заряду, який переміщується:

$$A = -\Delta\P. \quad (10.12)$$

Це твердження є слушним як для однорідного, так і для неоднорідного поля.

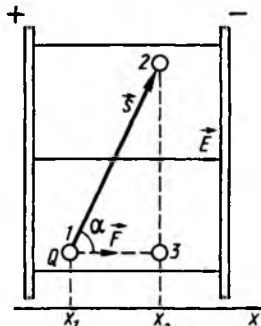


Рис. 10.8

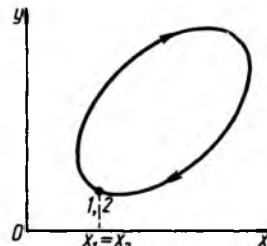


Рис. 10.9

Робота електричних сил відштовхування однойменних зарядів додатна, якщо заряди віддаляються один від одного, і від'ємна, якщо заряди зближуються. Робота електричних сил притягання різнойменних зарядів додатна, якщо вони зближуються, і від'ємна, якщо вони віддаляються один від одного. Оскільки робота електричних сил завжди дорівнює зменшенню потенціальної енергії, то потенціальна енергія відштовхування однойменних зарядів, які наближаються один до одного, додатна і збільшується (рис. 10.10, крива 1). Якщо різнойменні заряди віддаляються один від одного, то потенціальна енергія їх притягання від'ємна і прямує до нуля при $r \rightarrow \infty$ (крива 2).

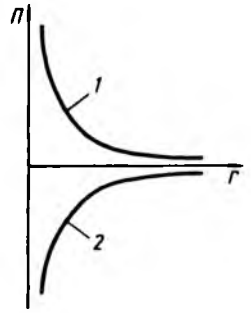


Рис. 10.10

Потенціальна енергія заряду в однорідному полі зв'язана з напруженістю поля співвідношенням

$$\Pi = -QEx, \quad (10.13)$$

де x – координата заряду, коли вважати, що $\Pi = 0$ при $x = 0$.

§ 97. Потенціал.

Різниця потенціалів. Еквіпотенціальні поверхні

Потенціал

Візьмемо в електричному полі яку-небудь точку за початкову і відлічуватимемо від неї потенціальну енергію. Щоб перемістити заряд з початкової точки в певну точку поля при будь-якій формі шляху, треба затратити одну й ту саму роботу A (див. § 96). Тому

в будь-якій точці поля потенціальна енергія Π заряду чисельно дорівнює роботі, яку треба затратити для переміщення заряду в цю точку.

Подібно до того, як потенціальна енергія в полі сил тяжіння пропорційна масі тіла, потенціальна енергія електричного поля пропорційна заряду:

$$\Pi = \varphi Q. \quad (10.14)$$

Величину

$$\varphi = \frac{\Pi}{Q} \quad (10.15)$$

називають *електричним потенціалом поля*. Вона характеризує потенціальну енергію, яку мав би позитивний одиничний заряд, вміщений у дану точку поля.

Щоб обчислити повну потенціальну енергію заряду, треба знайти роботу сил поля для переміщення заряду з певної точки поля в точку, де поля немає, наприклад на нескінченно велику відстань від зарядів, які створюють поле.

Згідно з (10.12), роботу сил можна обчислити як різницю потенціалів початкової і кінцевої точок траєкторії:

$$A = \Delta\Pi = -(\Pi_2 - \Pi_1) = Q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (10.16)$$

Величину $(\varphi_1 - \varphi_2)$ називають *різницею потенціалів* електростатичного поля. Поняття різниці потенціалів (або напруги) застосовне тільки до двох різних точок поля.

У СІ різницю потенціалів вимірюють у *вольтах*: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

Потенціал є енергетичною характеристикою електростатичного поля і як скалярна величина може набувати додатних або від'ємних значень. Треба звернути увагу, що фізичний зміст має різниця потенціалів, бо через неї виражають роботу сил поля по переміщенню заряду. Говорячи про потенціал у певній точці поля, завжди розуміють різницю потенціалів, маючи на увазі, що одну з точок взято наперед і вона лежить на "нескінченності". Оскільки значення потенціальної енергії залежить від вибору нульового рівня енергії, то значення потенціалу можна визначити тільки відносно деякого рівня, взятого за нульовий.

Точку з нульовим потенціалом звичайно визначають залежно від умов задачі. Розв'язуючи задачі, доцільно вважати, що нулю дорівнює потенціал Землі, а не нескінченно віддалених точок електричного поля. Вибір нульового рівня потенціалу не впливає на значення різниці потенціалів.

Для розв'язування задач часто треба знати потенціал електростатичного поля точкового заряду Q у точці на відстані r від заряду:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (10.17)$$

Ця формула справедлива за умови, що потенціал прямує до нуля при $r \rightarrow 0$.

Формулою (10.17) можна користуватися і для визначення потенціалу електричного поля кулі з радіусом R і зарядом Q , рівномірно розподіленим по його поверхні ($r > R$). Всередині кулі потенціал поля сталий і дорівнює

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}. \quad (10.18)$$

Графічно електричне поле можна зображати не тільки силовими лініями, а й за допомогою *еквіпотенціальних поверхонь* – сукупностей точок, які мають однаковий потенціал. Перетинаючись з площиною рисунка, еквіпотенціальні поверхні дають *еквіпотенціальні лінії*.

На рис. 10.11 зображено потенціальні лінії поля точкового позитивного заряду. Навколо цього заряду можна провести безліч еквіпотенціальних ліній, їх проводять так, щоб різниця потенціалів для двох будь-яких сусідніх ліній була однаковою (наприклад, 1 В). Таке зображення еквіпотенціальних ліній дає наочне уявлення про те, як змінюється різниця потенціалів у даному полі.

На рис. 10.12 зображено ділянку еквіпотенціальної лінії. У точці 1 розмішений заряд Q . В однорідному електричному полі перенесемо цей заряд Q на відстань x з точки 1 у точку 2 уздовж лінії однакового потенціалу ($\varphi = \text{const}$). У цьому разі роботу визначають за формулою $A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Водночас $A = Fx \cdot \cos \alpha = QEx \cos \alpha$; отже, $Q(\varphi_1 - \varphi_2) = QEx \cos \alpha$.

Оскільки $\varphi = \text{const}$, то $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ (ліва частина рівняння дорівнює нулю, а отже, і права частина має дорівнювати нулю). Оскільки Q , x і E не можуть дорівнювати нулю, то $\cos \alpha = 0$, звідки $\alpha = 90^\circ$. Отже,

вектор напруженості електричного поля E завжди перпендикулярний до поверхні однакового потенціалу.

Спинимось на двох важливих властивостях еквіпотенціальних поверхонь:

1) у кожній точці еквіпотенціальної поверхні вектор напруженості поля перпендикулярний до неї і напрямлений у бік спадання потенціалу;

2) робота переміщення заряду по еквіпотенціальній поверхні дорівнює нулю.

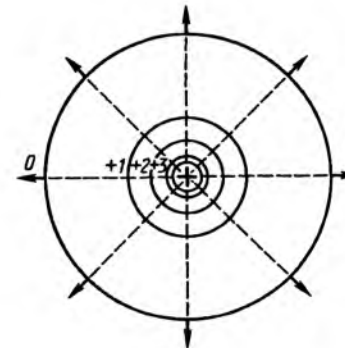


Рис. 10.11

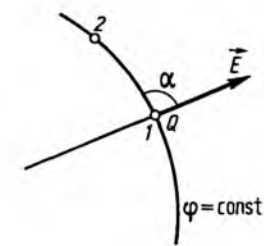


Рис. 10.12

Виходячи з властивостей еквіпотенціальних поверхонь, за відомим розміщенням еквіпотенціальних поверхонь у кожній точці поля можна визначити напрям вектора напруженості \vec{E} , навпаки, за відомим розміщенням ліній напруженості можна побудувати еквіпотенціальні поверхні.

Якщо електричне поле утворене кількома зарядами, то потенціал в якій-небудь точці поля дорівнює алгебричній сумі потенціалів, створених кожним зарядом:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

§ 98. Зв'язок між напруженістю і різницею потенціалів електричного поля

Зв'язок між напруженістю і різницею потенціалів

Електричне поле має дві характеристики: силову (напруженість \vec{E}) і енергетичну (потенціал φ). Напруженість і потенціал – різні характеристики тієї самої точки поля; отже, між ними повинен існувати однозначний зв'язок.

Якщо відомо розподіл потенціалу, тобто його значення в кожній точці поля, то можна знайти і напруженість цього поля в кожній точці. Розглянемо роботу електричних сил в однорідному полі при переміщенні позитивного заряду з точки 1 у точку 2 (рис. 10.13):

$$A = QE_x \Delta x,$$

де E_x – проекція вектора напруженості \vec{E} на напрям x .

З другого боку, цю роботу можна визначити через різницю потенціалів на кінцях відрізка Δx :

$$A = Q(\varphi_1 - \varphi_2) = -Q\Delta\varphi,$$

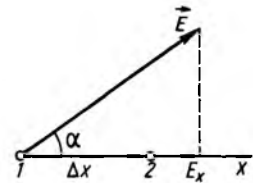


Рис. 10.13

де $\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$. Прирівнявши обидва вирази для роботи, дістанемо $QE_x \Delta x = -Q\Delta\varphi$, звідки

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}. \quad (10.19)$$

Аналогічно

$$E_y = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta y}, \quad E_z = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta z}.$$

Отже, знаючи напруженість поля в кожній точці, можна обчислити різницю потенціалів між будь-якими точками.

Гradient

У математиці користуються поняттям “gradient”. Gradientом називають вектор, який показує напрям найбільшого зростання скалярної функції. Цей вектор позначають символом $\text{grad } \varphi$. Отже, формулу (10.19) можна записати у вигляді

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi.$$

Напруженість у якій-небудь точці поля дорівнює швидкості зміни потенціалу в цій точці поля, взятій з оберненим знаком. Знак мінус свідчить про те, що напрями векторів \vec{E} і $\text{grad } \varphi$ протилежні, тобто вектор \vec{E} напрямлений у бік спадання потенціалу.

Якщо поле однорідне (наприклад, поле плоского конденсатора; див. рис. 10.4, б), то напруженість визначають за формулою

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \quad (10.20)$$

де d – відстань, а $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – різниця потенціалів між обкладками конденсатора.

Різницю потенціалів (електричну напругу) у СІ вимірюють у *вольтах* (В).

Вольт – це різниця потенціалів (електрична напруга), при якій переміщення заряду в 1 Кл супроводжується роботою в 1 Дж, тобто $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

Напруженість електричного поля, згідно з (10.20), вимірюють у *вольтах на метр* (В/м).

§ 99. Діелектрики в електричному полі. Поляризація діелектриків

Діелектрики

Діелектриками називають речовини, які не проводять електричного струму. Термін “діелектрик” ввів М. Фарадей для позначення середовища, в якому на відміну від металів може тривалий час існувати електричне поле. Діелектрики використовують для ізоляції електричних кіл, а також для надання електричним установкам особливих властивостей, що дають можливість повніше використовувати об’єм і масу матеріалів, з яких вони виготовлені. Діелектриками можуть бути речовини в будь-якому з трьох агрегатних станів: газоподібному (азот, водень), рідкому (продукти нафтопереробки), твердому (бурштин, фарфор, кварц).

В ідеальному діелектрику немає вільних зарядів.

Зовнішні електрони атомів діелектрика міцно зв'язані з ядрами. Якщо внутрішньоатомна відстань має порядок 10^{-10} м, то навіть елементарний електричний заряд створює поле напруженістю

$$E = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot 10^{-20} \text{ м}^2} \approx 10^{11} \text{ В/м.}$$

Це значення майже в 10 000 разів більше від досягнутих нині (10^7 В/м). І все-таки, якщо діелектрик внести в зовнішнє електричне поле, то він зазнає істотних змін, що пояснюється його молекулярною будовою.

Усяка молекула – це система з сумарним зарядом, який дорівнює нулю. Проте молекули мають електричні властивості, і їх у першому наближенні можна розглядати як електричні диполі. Позитивний заряд диполя дорівнює сумарному заряду ядер і розміщений у “центрі тяжіння” позитивних зарядів; негативний заряд дорівнює сумарному заряду електронів і розміщений у “центрі тяжіння” негативних зарядів.

Усі діелектрики поділяють на три групи. До першої належать нейтральні, *неполярні діелектрики*, що мають симетричну будову. Центри тяжіння позитивних і негативних зарядів, якщо немає зовнішнього електричного поля в них, збігаються; отже, такі молекули не мають власного дипольного моменту. До неполярних діелектриків належать бензол, парафін, поліетилен, фторопласт, H_2 , O_2 , N_2 тощо.

Дипольні полярні діелектрики мають асиметричну будову молекул, тому центри тяжіння позитивних і негативних зарядів не збігаються.

Молекула в цьому разі є жорстким диполем. Електричний момент такого диполя (дипольний момент) є $\vec{p} = Q\vec{l}$ (рис. 10.14). Якщо зовнішнього поля немає, дипольні моменти молекул орієнтовані хаотично і їх сумарний дипольний момент дорівнює нулю. До полярних діелектриків належать фенол, нітробензол тощо.

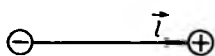


Рис. 10.14

Кристалічні діелектрики, які мають іонну структуру, – це слабополярні діелектрики.

До них належать кристали NaCl , KCl , CsCl тощо.

Поляризація

Якщо діелектрики помістити в зовнішнє електричне поле, то вони поляризуються. *Електричною поляризацією називають особливий стан речовини, в якому електричний момент деякого об'єму цієї речовини не дорівнює нулю.*

Розрізняють три види поляризації.

1. *Електронна поляризація.* Якщо неполярну молекулу (рис. 10.15, а) помістити в зовнішнє електричне поле E_0 , то під дією електричного поля електронна хмара пружно зміщується (рис. 10.15, б) і в молекулі з'являється дипольний момент. Час встановлення електронної поляризації $t_{\text{ел}} = 10^{-15}$ с.

2. *Дипольна (орієнтаційна) поляризація.* В разі накладання зовнішнього поля E_0 хаотично і безладно орієнтовані (рис. 10.16, а) жорсткі диполі полярних діелектриків прагнуть повернутися (див. § 95) в напрямі дії електричних сил (рис. 10.16, б). Ця поляризація встановлюється за час порядку $t_{\text{п}} = 10^{-10}$ с.

3. *Іонна поляризація.* Якщо кристалічний діелектрик типу NaCl , CsCl , що має іонні кристалічні ґрати, у вузлах яких правильно чергуються позитивні і негативні іони, помістити в зовнішнє електричне поле, то позитивні іони ґрат змістяться вздовж напрямку поля, а негативні – в протилежний бік. Отже, діелектрик поляризується. Це відбувається за час $t_{\text{п}} = 10^{-13}$ с.

Поляризованість

Ступінь поляризації діелектрика характеризується *поляризованістю* \mathbf{P} – відношенням векторної суми дипольних моментів \mathbf{p}_i молекул, які входять в об'єм V речовини, до об'єму:

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{p}_i}{V} \quad (10.21)$$

Тут n – кількість молекул (або атомів) в об'ємі.

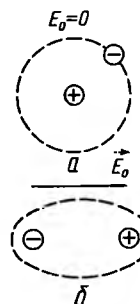


Рис. 10.15

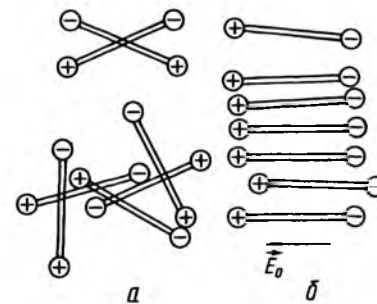


Рис. 10.16

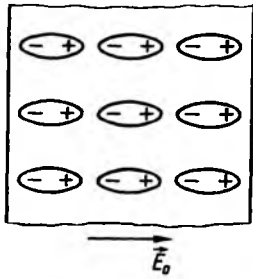


Рис. 10.17

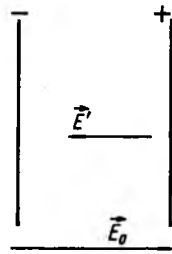


Рис. 10.18

Діелектрична проникність деяких речовин

Речовина	ϵ
Вода (чиста)	81
Кераміка радіотехнічна	До 80
Слюда	6–8
Скло	4–7
Кварц	4,5
Ебоніт	3
Бурштин	2,8
Парафін	2,3
Масло трансформаторне	2,2
Повітря	1,0006

Для ізотропного діелектрика поляризованість пропорційна напруженості поля всередині нього:

$$P = \epsilon_0 k E, \quad (10.22)$$

де k – відносна діелектрична сприйнятливість, яка залежить від будови речовини і температури (величина безрозмірна). Вектор P напрямлений уздовж зовнішнього електричного поля E_0 , в якому розміщений діелектрик.

Внаслідок поляризації на гранях діелектрика виникають заряди, які не компенсуються сусідніми диполями. Це призводить до того, що на одній його поверхні виникають позитивні заряди, а на другій – негативні (рис. 10.17). Ці електричні заряди називають зв'язаними.

Зв'язані заряди належать молекулам діелектрика і не можуть бути видалені з його поверхні.

Якщо напруженість зовнішнього поля зростає, то орієнтація електричних моментів диполів ще більше впорядковується.

Напруженість електричного поля E' , яке створюється зв'язаними зарядами всередині діелектрика, напрямлена протилежно напруженості зовнішнього електричного поля E_0 (рис. 10.18), яке поляризує діелектрик. Напруженість сумарного поля всередині діелектрика $E = E_0 + E'$. Результируюча напруженість E поля залежить від електричних властивостей середовища, вона пропорційна прикладеній до діелектрика напруженості E_0 зовнішнього поля:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}. \quad (10.23)$$

Діелектрична проникність $\epsilon = E_0 / E$ середовища показує, у скільки разів напруженість поля у вакуумі більша, ніж у діелектрику. Ця величина безрозмірна.

§ 100. Електричне зміщення

Електричне зміщення

У діелектрику, розміщеному в зовнішньому полі E_0 , напруженість поля зменшується. Стрибокподібна зміна вектора напруженості електричного поля на межі поділу двох середовищ створює певні труднощі для розрахунку полів, тому вводять поняття електричного зміщення

$$D = \epsilon \epsilon_0 E. \quad (10.24)$$

Електричне зміщення – векторна величина, вона не залежить від властивостей середовища; оскільки в (10.24) $\epsilon E = E_0$, то $D = \epsilon_0 E_0$, тобто електричне зміщення всередині діелектрика збігається з електричним зміщенням зовнішнього поля D_0 .

З означення електричного зміщення випливає, що для поля D , як і для поля E , застосовний принцип суперпозиції полів:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i.$$

Електричне зміщення, яке створюється в певній точці поля системою електричних зарядів, дорівнює алгебричній сумі електричних зміщень, які створюються в цій точці кожним із зарядів окремо.

Лінії електричного зміщення

Поле D графічно позначають лініями електричного зміщення так само, як поле E – лініями напруженості.

Лінії електричного зміщення – це лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються за напрямом з електричним зміщенням D .

Лінії електричного зміщення проводять так, щоб кількість ліній, які проходять крізь одиничну площадку, перпендикулярну до них, збігалася із значенням вектора електричного зміщення в певному місці електричного поля.

З рис. 10.19 видно, що лінії напруженості зазнають розриву на межі діелектрик–вакуум (рис. 10.19, а), а лінії електричного зміщення будуть неперервними (рис. 10.19, б). Неперервність ліній електричного зміщення полегшує обчислення D при заданому розподілі зарядів.

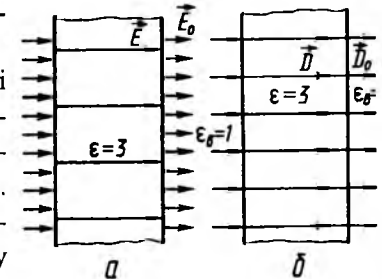


Рис. 10.19

§ 101. П'єзоелектричний ефект

П'єзоелектричний ефект

Вивчення властивостей твердих діелектриків показало, що деякі з них поляризуються не тільки в електричному полі, а й у процесі деформації від механічного впливу на них.

Явище виникнення зв'язаних поверхневих електричних зарядів на кристалі кварцу під час його деформації назвали п'єзоелектричним ефектом. Якщо кристал діелектрика помістити в електричне поле, то спостерігається зворотний процес – у кристалі виникають пружні напруги, внаслідок чого кристал деформується. П'єзо ефект буває в кварці, турмаліні, сегнетовій солі, титаніті барію та в інших речовинах.

Застосування п'єзоелектричних кристалів

П'єзоелектричні кристали широко застосовують як електро-механічні перетворювачі: стабілізатори і фільтри радіотехнічних частот, п'єзоелектричні манометри, випромінювачі та приймачі ультразвукових коливань, п'єзометри, звукознімачі тощо. Основною частиною більшості цих приладів є перетворювач, який складається з окремих або об'єднаних у групи п'єзоелементів, виготовлених з відповідних п'єзометричних матеріалів. Залежно від призначення п'єзоелементи можна поєднувати з різними механічними пристроями: мембранами, резонаторами, рупорами і т. д.

Залежно від призначення приладу використовують різні види деформації, а отже, і різні форми п'єзоелементів. Для роботи в області високих звукових і ультразвукових частот застосовують п'єзоелементи, виготовлені у вигляді пластин, криволінійних оболонок або стрижнів.

П'єзоелементи у вигляді кілець застосовують як випромінювачі та приймачі в гідроакустиці. Для роботи в області названих звукових частот також застосовують пластини, причому їх монтують так, щоб вони мали коливання згину або кручення.

§ 102. Провідники в електричному полі

Провідники в електричному полі

Залежно від характеру дії на тіла електричного поля їх можна поділити на провідники, діелектрики і напівпровідники. Властивості тіл і поведіння їх в електричному полі визначаються будовою і розміщенням

атомів у тілах. До складу атомів входять електрично заряджені частинки: позитивні – протони, негативні – електрони. У нормальному стані атом електрично нейтральний, бо кількість протонів, які входять до складу ядра атома, дорівнює кількості електронів, які обертаються навколо ядра і утворюють “електронні оболонки” атома. Електрони втримуються в атомі силами електричного притягання до ядра. Однак у металах внаслідок особливостей їх будови в разі зовнішньої взаємодії електрони легко можуть бути видалені за межі “свого” атома і вільно переміщуватись доти, доки не захопляться яким-небудь іншим атомом. Електрони, які втратили зв'язок із своїм атомом, називають вільними. Їх рух має хаотичний характер і залежить від температури: чим вища температура, тим більша швидкість руху вільних електронів. У металевих провідниках концентрація вільних електронів порядку 10^{28} м^{-3} . Рух таких електронів аналогічний тепловому руху частинок газу, тому сукупність вільних електронів називають електронним газом.

Якщо металевий провідник розміщений в електричному полі, то на хаотичний рух електронів накладається упорядкований рух у напрямі, протилежному напруженості поля. Такий рух електронів називають дрейфом. На рис. 7.20 зображено провідник, розміщений у зовнішньому однорідному електричному полі E_0 . Під дією поля електрони переміщуються в напрямі поверхні AB . Внаслідок цього на поверхні провідника AB виникає надлишковий негативний вільний заряд, на поверхні провідника CD – надлишковий позитивний заряд. Явище перерозподілу зарядів усередині провідника під дією зовнішнього електричного поля називається електростатичною індукцією. Заряди, які виникають на поверхні провідника, називаються наведеними, або індукованими. Заряди всередині провідника перерозподіляються доти, поки напруженість зовнішнього поля не дорівнюватиме протилежно напрямленій напруженості E поля індукованих зарядів. У цьому разі $|E_0| = |E|$, тобто напруженість результуючого поля дорівнює нулю і упорядкований рух зарядів у провіднику припиняється, тобто настає рівновага. Якщо на провіднику заряди перебувають у рівновазі, то потенціал усіх його точок однаковий. Отже, в разі рівноваги зарядів поверхня провідника екіпотенціальна.

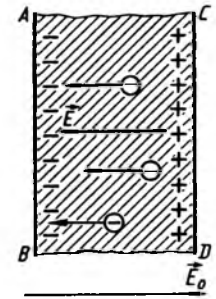


Рис. 10.20

Електростатичний захист

Якщо провіднику надати деякого заряду Q , то він розподілиться так, щоб виконувалась умова рівноваги, тобто ніде всередині провідника не буде надлишкових зарядів, а всі вони розмістяться на поверхні

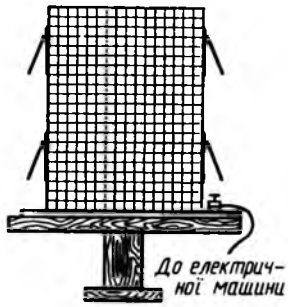


Рис. 10.21

провідника з деякою густиною σ (густиною заряду називають відношення Q/S , де S – площа поверхні провідника). Надлишковий заряд на порожньому провіднику розподіляється так само, як і на суцільному, тобто на його зовнішній поверхні. Цей висновок наочно продемонстрував Фарадей, виконавши такий дослід. Якщо виготовити замкнений порожнистий провідник з дротяної сітки (рис. 10.21) у вигляді клітки (клітка Фарадея), закріпити його на ізолюючій підставці і підвісити на його внутрішній і зовнішній поверхнях паперові смужки, які виконують роль електроскопів, то після заряджання клітки за допомогою електрофорної машини відхилляються тільки зовнішні папірці. Це свідчить про те, що електричного поля всередині клітки немає. Отже, провідна поверхня надійно захищає ту область простору, яку вона оточує, від дії електричного поля. Такі поверхні використовують як електростатичний захист.

порожньому провіднику розподіляється так само, як і на суцільному, тобто на його зовнішній поверхні. Цей висновок наочно продемонстрував Фарадей, виконавши такий дослід. Якщо виготовити замкнений порожнистий провідник з дротяної сітки (рис. 10.21) у вигляді клітки (клітка Фарадея), закріпити його на ізолюючій підставці і підвісити на його внутрішній і зовнішній поверхнях паперові смужки, які виконують роль електроскопів, то після заряджання клітки за допомогою електрофорної машини відхилляються тільки зовнішні папірці. Це свідчить про те, що електричного поля всередині клітки немає. Отже, провідна поверхня надійно захищає ту область простору, яку вона оточує, від дії електричного поля. Такі поверхні використовують як електростатичний захист.

§ 103. Електроємність. Конденсатори. З'єднання конденсаторів у батарею

Електроємність

На досліді було встановлено, що коли форма і розміри відокремленого провідника, а також середовище (наприклад, повітря), в якому він розміщений, не змінюються, то при збільшенні заряду Q на провіднику пропорційно йому збільшується потенціал провідника:

$$Q = C\varphi. \quad (10.25)$$

Коефіцієнт пропорційності $C = Q/\varphi$ називають *електроємністю*. Електроємність (ємність) провідника або системи провідників є фізичною величиною, яка характеризує здатність провідника або системи провідників нагромаджувати електричні заряди.

У загальному випадку ємність залежить як від середовища, в якому розміщений провідник, так і від розміщення навколишніх тіл, але не залежить від значення наданого йому заряду і його потенціалу.

У СІ одиницею електроємності є *фарада* (Ф).

Фарада – ємність такого провідника, потенціал якого змінюється на 1 В, якщо йому надано заряд в 1 Кл. Ця одиниця дуже велика. Наприклад, ємність такого провідника, як Земля, порядку $7 \cdot 10^{-4}$ Ф, тому на практиці використовують дольні одиниці: $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$, $1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$, $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$.

Для прикладу визначимо електроємність відокремленого провідника, який має форму сфери. За означенням, $C = Q/\varphi$. Потенціал сферичного провідника, який має радіус R , на його поверхні дорівнює $\varphi = Q/(4\pi\epsilon_0 R)$. Отже, ємність відокремленої сфери

$$C = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (10.26)$$

Електроємності провідників іншої форми обчислюють складніше. Якщо провідник помістити в діелектрик, відносна діелектрична проникність якого дорівнює ϵ , то його ємність зростає в ϵ разів.

Електроємність не залежить від матеріалу провідника і від порожнини всередині нього. За формулою електроємності провідника, який має форму сфери, можна обчислити ємності як порожнистих, так і суцільних металевих куль, внесених у середовище з діелектричною проникністю ϵ :

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R.$$

Конденсатори

Відомо, що в загальному випадку електроємність провідника залежить від середовища, в якому він міститься, і від розміщення навколишніх провідників. Систему провідників, ємність якої не залежить від розміщення навколишніх тіл, називають *конденсатором*. Конденсатори – це звичайно система з двох провідників, які називаються *обкладками*, відокремлених діелектриком, товщина якого мала порівняно з розмірами обкладок. Обкладки конденсатора розміщують так, щоб поле, яке створюють заряди, розміщені на обкладках, було зосереджене в просторі між ними.

Ємність конденсатора визначається його геометрією і діелектричними властивостями середовища, яке заповнює простір між обкладками. У процесі заряджання конденсатора на його обкладках виникають заряди, однакові за значенням, але протилежні за знаком. Різниця потенціалів між обкладками змінюється пропорційно заряду (див. (10.25)). Залежно від форми розрізняють конденсатори:

1) плоскі (рис. 10.22, а); їх ємність

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (10.27)$$

де S – площа обкладки конденсатора; d – відстань між обкладками; ϵ – діелектрична проникність середовища, яке заповнює простір між обкладками;

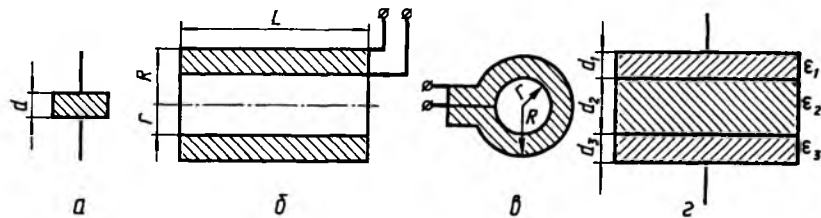


Рис. 10.22

2) циліндричні (рис. 10.22, б); їх ємність

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon L}{\ln(R/r)}, \quad (10.28)$$

де R і r – радіуси коаксіальних циліндрів; L – довжина твірної циліндрів;

3) сферичні (рис. 10.22, в); їх ємність

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon rR}{R-r}, \quad (10.29)$$

де r і R – радіуси сфер.

Ємність конденсатора, який має шаруватий діелектрик (рис. 10.22, г),

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\epsilon_i}} = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3} + \dots} \quad (10.30)$$

З'єднання конденсаторів

Щоб дістати задане значення ємності, конденсатори з'єднують у батареї. Розрізняють два види з'єднань: паралельне і послідовне.

При паралельному з'єднанні конденсаторів з'єднують їх однойменно заряджені обкладки (рис. 10.23, а). При цьому загальний заряд батареї

$$Q_{\text{зар}} = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Але оскільки $Q_1 = U_{AB} C_1$, $Q_2 = U_{AB} C_2$, $Q_3 = U_{AB} C_3$, то

$$Q_{\text{зар}} = U_{AB} (C_1 + C_2 + C_3).$$

Ємність такої батареї

$$C_{\text{зар}} = \frac{Q_{\text{зар}}}{U_{AB}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

При паралельному з'єднанні конденсаторів ємність батареї дорівнює сумі зв'язаних у неї ємностей:

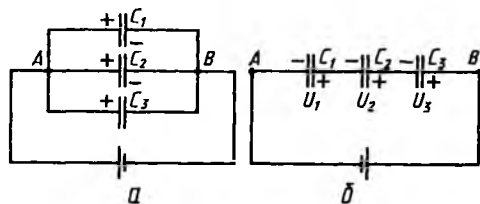


Рис. 10.23

$$C_{\text{зар}} = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (10.31)$$

При послідовному з'єднанні конденсаторів з'єднують різнойменно заряджені обкладки (рис. 10.23, б). При цьому заряд батареї

$$Q_{\text{зар}} = Q_1 = Q_2 = Q_3.$$

Напряга між точками A і B

$$U_{AB} = U_1 + U_2 + U_3 = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3} = Q_{\text{зар}} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right).$$

Звідси дістаємо, що при послідовному з'єднанні конденсаторів ємність батареї визначають за формулою

$$\frac{1}{C_{\text{зар}}} = \frac{U_{AB}}{Q_{\text{зар}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3},$$

або

$$\frac{1}{C_{\text{зар}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (10.32)$$

Якщо з'єднують n конденсаторів однакової ємності, то при паралельному з'єднанні $C_{\text{зар}} = nC$. При послідовному з'єднанні – $C_{\text{зар}} = C/n$.

§ 104. Енергія зарядженого конденсатора

Якщо обкладки зарядженого конденсатора замкнуті металевим провідником (рис. 10.24), то по колу йтиме електричний струм, лампочка спалахне і горітиме доти, поки конденсатор не розрядиться. Це означає, що заряджений конденсатор має енергію. Для обчислення енергії зарядженого конденсатора спочатку розглянемо відокремлений незаряджений провідник.

Перенесемо на провідник заряд Q багаторазовими порціями ΔQ з нескінченності на провідник. При цьому треба подолати сили відштовхування, що діють між порцією заряду ΔQ , яку переносять, і зарядом, нагромадженим на поверхні провідника. Перенесення чергової порції заряду ΔQ з нескінченності на провідник змінює його потенціал на $\Delta\phi$. Оскільки провідник раніше був незаряджений, то його початковий потенціал дорівнює нулю.

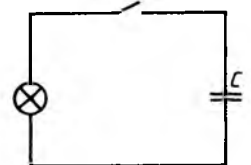


Рис. 10.24

Якщо φ – кінцевий потенціал, то середнє значення потенціалу становитиме $\varphi/2$. Робота, яку виконують проти сил поля в процесі надання провіднику заряду Q і потенціалу φ , є мірою енергії зарядженого провідника. Її можна обчислити за формулою

$$A = \frac{Q\varphi}{2}.$$

Якщо провідник не розміщений у зовнішньому електричному полі, то ця робота характеризує надану потенціальну енергію взаємодії зарядів на провіднику:

$$\Pi = A = Q\varphi/2 = C\varphi^2/2, \quad (10.33)$$

бо $Q = C\varphi$, де C – ємність провідника.

Якщо є система двох заряджених провідників (конденсатор), то *повна енергія системи дорівнює сумі власних енергій провідників і енергії їх взаємодії*:

$$\Pi = Q(\varphi_1 - \varphi_2)/2, \quad (10.34)$$

або

$$\Pi \approx C(\varphi_1 - \varphi_2)^2/2,$$

де Q – заряд однієї з обкладок конденсатора; C – ємність конденсатора; φ_1 і φ_2 – потенціали відповідних обкладок, створювані як полем іншої обкладки, так і власним полем.

Хоч яку форму і конфігурацію мав би конденсатор, він має енергію, яка дорівнює роботі, виконаній при відокремленні зарядів, зосереджених на його обкладках.

§ 105. Енергія електричного поля

Енергія електричного поля

У § 104 було показано, що заряджений конденсатор має енергію. Виникає запитання: де локалізована ця енергія? Можна припустити, що вона зосереджена на обкладках конденсатора або ж у просторі між обкладками, тобто в електричному полі конденсатора. Відповідь на це запитання може дати лише дослід. В електростатиці розглядають тільки постійні в часі поля. Якщо матеріальний об'єкт не обмінюється енергією з навколишніми об'єктами, то енергія поля не проявляє себе. Наявність енергії поля можна визначити на досліді тільки в електродинаміці, тобто

розглядаючи поля, змінні в часі. Далі буде показано, що існують електромагнітні хвилі, які являють собою електричні і магнітні поля, що змінюються в часі та поширюються в просторі з певною швидкістю. Дослід показує, що електромагнітні хвилі мають енергію і переносять її. Отже, енергія конденсатора зосереджена в електричному полі.

Об'ємна густина енергії

Об'ємна густина енергії електричного поля – фізична величина, яка дорівнює відношенню потенціальної енергії Π , запасеної в об'ємі V , до об'єму:

$$\omega = \frac{\Pi}{V}. \quad (10.35)$$

Для однорідного поля, яким є поле плоского конденсатора, $U = (\varphi_1 - \varphi_2) = Ed$, а об'єм $V = Sd$, де S – площа обкладок конденсатора; d – відстань між ними. Тоді, згідно з (10.34), (10.27), (10.35) і (10.24),

$$\omega = \frac{CU^2}{2Sd} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S E^2 d^2}{2Sdd} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (10.36)$$

Короткі висновки

- Енергія електричного поля розподілена в просторі, зайнятому полем, так, що її густина дорівнює половині добутку електричного зміщення на напруженість поля.
- Енергія, як і маса, – невід'ємна характеристика матерії. Речовина і поле – дві форми існування матерії.
- Електромагнітна взаємодія – це взаємодія між електрично зарядженими частинками або макроскопічно зарядженими тілами. Розглядаючи електромагнітні взаємодії, ґрунтуються на принципі близькодії. Інтенсивність електромагнітних взаємодій визначається електричним зарядом.
- Розрізняють два види електричного заряду, які умовно назвали позитивними і негативними.
Існує мінімальний елементарний електричний заряд, якому кратні всі елементарні заряди частинок і тіл.
Повний електричний заряд замкненої системи дорівнює алгебричній сумі зарядів елементарних частинок, які утворюють систему. Він точно зберігається в усіх взаємодіях і перетвореннях частинок цієї системи.
- Нерухомі точкові електричні заряди взаємодіють у вакуумі з силою, яку визначають за законом Кулона:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Заряди взаємодіють за допомогою електричного поля. Силовой характеристикою поля є напруженість. Вона чисельно дорівнює силі, яка діє на одиничний позитивний заряд:

$$E = \frac{F}{Q}$$

Напруженості полів, які створюються окремими зарядами, додаються геометрично (принцип суперпозиції).

- Електростатичне поле – потенціальне, тобто робота, яка виконується по переміщенню заряду, не залежить від траєкторії, а залежить лише від початкового і кінцевого положення заряду. Робота дорівнює зміні потенціальної енергії з протилежним знаком:

$$A = -\Delta\P.$$

Енергетичною характеристикою поля є потенціал. Він характеризує потенціальну енергію, яку мав би позитивний одиничний заряд, вміщений у цю точку поля.

Фізичний зміст має різниця потенціалів, через неї визначають роботу сил поля по переміщенню заряду:

$$A = Q(\Phi_1 - \Phi_2).$$

- Силові і енергетичні характеристики поля зв'язані між собою:

$$E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d}, \text{ або } E = -\text{grad}\phi.$$

- Якщо внести діелектрик у зовнішнє електричне поле, то він поляризується. Поляризований діелектрик створює електричне поле, яке всередині діелектрика ослаблює зовнішнє поле в ϵ разів:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

- Здатність провідників нагромаджувати електричний заряд характеризується електроємністю:

$$C = \frac{Q}{\Phi}$$

Електроємність не залежить від заряду провідників, а визначається лише геометричними розмірами, формою, взаємним розміщенням і електричними властивостями навколишнього середовища.

Ємність плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

- Заряджений конденсатор має енергію

$$\Pi = \frac{C(\Phi_1 - \Phi_2)^2}{2}$$

Енергія конденсатора зосереджена в електричному полі. Об'ємна густина енергії електричного поля дорівнює

$$\omega = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$$

- Енергія – невід'ємна характеристика матерії.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Які види взаємодії розглядає сучасна фізика?
2. Яку взаємодію називають електромагнітною?
3. Що таке електричний заряд?
4. Чому дорівнює заряд електрона?
5. Сформулюйте закон збереження заряду.
6. Сформулюйте закон Кулона.
7. Що таке електричне поле і які властивості воно має?
8. Що називають напруженістю поля в даній його точці?
9. Що називають електричною силовою лінією?
10. Яке поле називають однорідним?
11. Сформулюйте принцип суперпозиції полів.
12. Чи залежить робота, яку виконує електричне поле при переміщенні заряду, від форми шляху? Доведіть.
13. Що називають потенціалом поля в даній його точці?
14. Потенціал якого тіла умовно взято за нуль?
15. Що називають екіпотенціальною поверхнею? лінією?
16. Як зв'язані напруженість і різниця потенціалів електричного поля?
17. Які речовини називають діелектриками?
18. У чому полягає явище поляризації діелектриків?
19. Що показує діелектрична проникність середовища?
20. Що називають п'єзоелектричним ефектом?
21. Які речовини є провідниками?
22. Де розміщуються електричні заряди на зарядженому провіднику?
23. Що характеризує електроємність провідника, від чого вона залежить?
24. Який конденсатор називають плоским? Чому дорівнює його ємність?
25. Як визначають електроємність батареї при паралельному і послідовному з'єднаннях конденсаторів?
26. Як розподілена енергія електричного поля в просторі?
27. Які дві форми існування матерії вам відомі?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. У повітрі ($\epsilon = 1$) на відстані l одне від одного закріплено два точкові заряджені тіла відповідно із зарядами $+Q$ і $4Q$. Де треба помістити заряд $-Q$, щоб він був у рівновазі?

Дано: Q ; $4Q$; $-Q$; l ; $\epsilon = 1$.

Знайти: r_1 , r_2 .

Розв'язання. З боку зарядів $+Q$ і $4Q$ на заряд $-Q$ діють сили притягання F_1 і F_2 (рис. 10.25):

$$F_1 = \frac{|Q||Q|}{4\pi\epsilon_0 r_1^2}, \quad F_2 = \frac{|Q| \cdot 4|Q|}{4\pi\epsilon_0 r_2^2},$$

де r_1 – відстань між зарядами $+Q$ і $-Q$, а r_2 – відстань між зарядами $-Q$ і $4Q$. Заряд $-Q$ перебуває у рівновазі, якщо $|F_1| = |F_2|$, тобто

$$\frac{|Q||Q|}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} = \frac{|Q| \cdot 4|Q|}{4\pi\epsilon_0 r_2^2}$$

Звідси $4r_1^2 = r_2^2$, або $2r_1 = r_2$. Як видно з рис. 10.25, $r_1 + r_2 = l$, тобто $3r_1 = l$; отже,

$$r_1 = \frac{l}{3}, \quad r_2 = 2l/3.$$

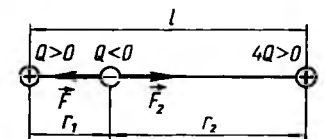


Рис. 10.25

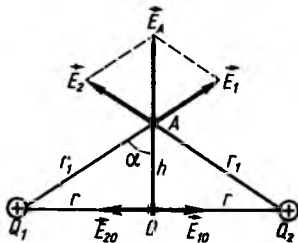


Рис. 10.26

Задача 2. Два однакових позитивних заряди 10^{-7} Кл розміщені в повітрі на відстані 8 см один від одного (рис. 10.26). Визначити напруженість поля в точці 0, що лежить на середині відрізка, який сполучає заряди, і в точці А, розміщеній на відстані 5 см від зарядів.

Дано: $Q_1 = Q_2 = 10^{-7}$ Кл; $\epsilon = 1$; $2r = 8$ см = 0,08 м; $r_1 = 5$ см = 0,05 м.

Знайти: E_0 , E_A .

Розв'язання. За принципом суперпозиції результуюча напруженість E поля, що створюється зарядами Q_1 і Q_2 , визначається векторною сумою напруженостей E_1 і E_2 , які створюються кожним зарядом у даній точці поля:

$$E = E_1 + E_2. \quad (1)$$

У точці 0 вектори E_{10} і E_{20} напрямлені від точки 0 вбік від зарядів, які створюють поле. Крім того, заряди Q_1 і Q_2 однакові і розміщені на однаковій відстані від точки 0. Тому, враховуючи напрями векторів, з (1) дістаємо:

$$E_0 = E_{10} - E_{20}, \quad E_{10} = E_{20}, \quad E_0 = 0.$$

У точці А результуючий вектор напруженості E_A є діагоналю паралелограма, утвореного E_1 і E_2 ; отже, $E_A = 2E_1 \cos \alpha$, бо $E_1 = E_2$. Оскільки $\cos \alpha = \frac{h}{r_1}$, а $h = \sqrt{r_1^2 - r^2} = 0,03$ м, напруженість поля в точці А

$$E_A = 2 \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1^2} \cdot \frac{h}{r_1}.$$

Обчислення:

$$E_A = \frac{2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot 0,03 \text{ м}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 0,05^3 \text{ м}^3} = 4,32 \cdot 10^5 \text{ В/м}.$$

Задача 3. Визначити потенціал електричного поля диполя (рис. 10.27), електричний момент якого становить $8 \cdot 10^{-14}$ Кл·м, у точці А, розміщеній на осі диполя на відстані $r = 0,2$ м від його центра з боку позитивного заряду ($l \ll r$).

Дано: $p = 8 \cdot 10^{-14}$ Кл·м; $r = 0,2$ м; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\epsilon = 1$.

Знайти: ϕ .

Розв'язання. За принципом суперпозиції повів потенціал будь-якої точки електричного поля диполя дорівнює алгебричній сумі потенціалів, які створює в цій точці кожний заряд: $\phi = \phi_+ + \phi_-$, або [див. (10.17)]

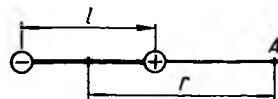


Рис. 10.27

$$\phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \left(r - \frac{l}{2}\right)} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \left(r + \frac{l}{2}\right)} = \frac{Ql}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 \left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)}, \quad (1)$$

де $p = Ql$. Оскільки $l \ll r$, величиною $l^2/4$ порівняно з r^2 можна знехтувати, і формула (1) набуває вигляду

$$\phi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Обчислення:

$$\phi = \frac{8 \cdot 10^{-14} \text{ Кл} \cdot \text{м}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 0,2^2 \text{ м}^2} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ В}.$$

Задача 4. Електрон, пролетівши поле з різницею потенціалів $U = 10\,000$ В, попадає в плоский конденсатор завдовжки 10 см і рухається паралельно пластинам на однаковій відстані від них. До пластин конденсатора, відстань між якими $d = 2$ см, прикладена різниця потенціалів $U_1 = 300$ В. Визначити вертикальне зміщення електрона при вилітанні його з конденсатора.

Дано: $U = 10^4$ В; $l = 10$ см = 0,1 м; $d = 2$ см = 0,02 м; $U_1 = 300$ В.

Знайти: S .

Розв'язання. За законом збереження енергії, набута електронем у полі кінетична енергія дорівнює роботі електричних сил поля, тобто

$$eU = \frac{mv^2}{2},$$

де e – заряд електрона; m і v – його маса і швидкість; U – прискорююча різниця потенціалів.

З цієї рівності визначаємо швидкість, з якою електрон влітає в конденсатор:

$$v = \sqrt{2eU/m}. \quad (1)$$

У полі конденсатора електрон бере участь одночасно у двох рухах:

1) у горизонтальному напрямі вздовж пластин конденсатора. При цьому електрон рухається за інерцією прямолінійно і рівномірно і пролітає шлях l (довжина пластин) за час

$$t_1 = l/v,$$

де v – швидкість електрона;

2) у вертикальному напрямі. При цьому електрон рухається рівноприскорено під дією сили електричного поля (силою тяжіння електрона можна знехтувати) і дістає зміщення

$$s = \frac{at_2^2}{2}, \quad (2)$$

де t_2 – час руху електрона у вертикальному напрямі; a – прискорення, яке за другим законом Ньютона дорівнює

$$a = F_{\text{ел}}/m \quad (3)$$

($F_{\text{ен}}$ – сила, яка діє на електрон у полі конденсатора). Але час руху електрона у вертикальному і горизонтальному напрямках однаковий, тому

$$t_1 = t_2 = \frac{l}{v}.$$

Сила, яка діє на електрон, дорівнює добутку заряду на напруженість поля конденсатора, тобто

$$F_{\text{ен}} = eE, \quad (4)$$

а напруженість визначають через градієнт потенціалу за формулою

$$E = \frac{U_1}{d}, \quad (5)$$

де U_1 – різниця потенціалів між пластинами; d – відстань між ними.

Після підстановки виразів (4) і (5) у формулу (3) дістанемо

$$a = \frac{eU_1}{md}.$$

Тоді

$$s = \frac{eU_1 l^2}{2md v^2}.$$

Враховавши вираз (1), дістанемо шукане зміщення

$$s = \frac{U_1 l^2}{2d \cdot 2U}.$$

Обчислення:

$$s = \frac{300 \text{ В} \cdot 0,01 \text{ м}^2}{2 \cdot 0,02 \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ В}} = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,75 \text{ мм}.$$

Задача 5. Ємність плоского повітряного конденсатора $C = 10^{-9}$ Ф, відстань між пластинами 4 мм. На заряд $Q = 4,9 \cdot 10^{-9}$ Кл, розміщений між пластинами конденсатора, діє сила $F = 9,8 \cdot 10^{-5}$ Н. Площа пластини конденсатора 100 см². Визначити: 1) напруженість поля і різницю потенціалів між пластинами; 2) густину енергії і енергію поля конденсатора.

Дано: $F = 9,8 \cdot 10^{-5}$ Н; $Q = 4,9 \cdot 10^{-9}$ Кл; $C = 10^{-9}$ Ф; $S = 10^{-2}$ м², $d = 4 \times 10^{-3}$ м; $\epsilon = 1$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Знайти: E , U , Π , ω .

Розв'язання. Поле між пластинами конденсатора вважаємо однорідним. Напруженість поля E можна визначити [див. (10.7)] з виразу $E = F/Q$.

Різницю потенціалів між пластинами визначимо [див. (10.20)] із співвідношення $U = Ed$.

Енергія конденсатора [див. (10.33) і (10.27)]

$$\Pi = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d}.$$

За (10.35) і врахувавши, що $V = Sd$ – об'єм поля в конденсаторі, густина енергії дорівнює $\omega = \Pi/V = \Pi/(Sd)$.

Обчислення:

$$E = \frac{9,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н}}{4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}} = 2 \cdot 10^4 \text{ В/м}; \quad U = 2 \cdot 10^4 \text{ В/м} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 80 \text{ В};$$

$$\Pi = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 (8 \cdot 10^2)^2 \text{ В}^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 7,04 \cdot 10^{-8} \text{ Дж};$$

$$\omega = \frac{7,04 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}}{10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^3.$$

Задача 6. Встановити, як змінюється ємність і енергія плоского повітряного конденсатора, якщо паралельно його обкладкам (рис. 10.28) ввести металеву пластину завтовшки $d_0 = 1$ мм. Площа обкладки конденсатора і пластини 150 см², відстань між обкладками $d = 6$ мм. Конденсатор заряджений до напруги 400 В і вимкнений від батареї.

Дано: $\epsilon = 1$; $d_0 = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$; $S = 150 \text{ см}^2 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; $d = 6 \text{ мм} = 6 \times 10^{-3} \text{ м}$; $U = 400 \text{ В}$.

Знайти: ΔC , $\Delta \Pi$.

Розв'язання. Ємність і енергія конденсатора при внесенні в нього металеві пластини зміняться. Це спричинено тим, що при цьому зменшується відстань між пластинами з d до $(d - d_0)$. Використавши формулу електроємності плоского конденсатора (10.27), дістанемо

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d - d_0} - \frac{\epsilon_0 S}{d} = \frac{\epsilon_0 S d_0}{d(d - d_0)}.$$

При внесенні металеві пластини паралельно обкладкам об'єм електричного поля зменшився на $\Delta V = S(d - d_0) - Sd$. Отже,

$$\Delta \Pi = \omega \Delta V = -\frac{\epsilon\epsilon_0 E^2 S d_0}{2}.$$

Напруженість E поля визначається через градієнт потенціалу: $E = U/d$. Отже,

$$\Delta \Pi = -\frac{\epsilon\epsilon_0 U^2 S d_0}{2d^2}.$$

Обчислення:

$$\Delta C = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 4,42 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

$$\Delta \Pi = -\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 400^2 \text{ В}^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{2 \cdot 6^2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2} = -2,95 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}.$$

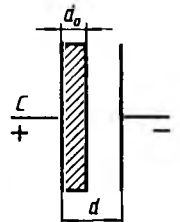


Рис. 10.28

Задачі для самостійного розв'язування

3. З якою силою ядро атома водню притягує електрон, якщо радіус орбіти електрона $5 \cdot 10^{-11}$ м? Чому дорівнюють швидкість електрона і напруженість електричного поля ядра в точках першої орбіти електрона?
2. На тонких нитках завдовжки 12 см підвісили кульки масою по 1 г. Точка підвісу спільна. Їм надали позитивного заряду, і вони розійшлися на кут 45° . Знайти електричну силу відштовхування, силу гравітаційного притягання між кульками і їх заряд.
3. У кожній вершині квадрата розміщені заряди $+Q = 10^{-7}$ Кл кожний. Який негативний заряд треба помістити в центр квадрата, щоб система була в рівновазі?
4. У вершинах квадрата розміщені негативні заряди $Q = -5 \cdot 10^{-4}$ Кл кожний. Визначити, який позитивний заряд треба помістити в центрі квадрата, щоб система зарядів була в рівновазі.
5. Визначити відношення заряду електрона до його маси, якщо електрон обертається по орбіті радіусом $5,3 \cdot 10^{-11}$ м навколо позитивного заряду $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Частота обертання $0,7 \cdot 10^{16}$ с⁻¹. Заряди вважати точковими.
6. Три заряди розміщені у вершинах прямокутного рівнобедреного трикутника. Під дією сил поля, утвореного зарядами $+3 \cdot 10^{-7}$ Кл і $+5 \cdot 10^{-7}$ Кл, які розміщені в основі трикутника, негативний заряд $-2 \cdot 10^{-7}$ Кл переміщується по медіані до центра ваги трикутника. Визначити роботу сил поля, якщо катет трикутника дорівнює $2\sqrt{2}$ см.
7. Пучок електронів напрямлений паралельно пластинам плоского конденсатора завдовжки 5 см з відстанню між пластинами 3 см. З якою швидкістю влетіли електрони в конденсатор, коли відомо, що вони відхилились за час польоту в конденсаторі на 3 мм? Різниця потенціалів між пластинами 700 В. Визначити кінетичну енергію електронів.
8. Визначити потенціал у початковій точці переміщення заряду $-6 \cdot 10^{-8}$ Кл, який рухається в полі заряду $+4 \cdot 10^{-8}$ Кл, якщо енергія, затрачена на переміщення заряду, дорівнює $6 \cdot 10^{-5}$ Дж, а потенціал кінцевої точки 1500 В. Встановити, на якій відстані були заряди на початку і в кінці переміщення.
9. Яку прискорюючу різницю потенціалів має пройти електрон, щоб набути швидкості 10 000 км/с?
10. Два точкових заряди $+4 \cdot 10^{-8}$ Кл і $+3 \cdot 10^{-8}$ Кл віддалені один від одного на відстань 40 см. Яку роботу треба виконати, щоб зблизити їх до відстані 15 см? Визначити значення потенціалів у точках, де розміщені заряди після зближення.
11. Відстань між вертикальними пластинами в плоскому повітряному конденсаторі дорівнює 6 мм. Його занурюють до половини в масло ($\epsilon = 7$). Як зміниться ємність конденсатора?
12. Пластини плоского повітряного конденсатора площею 150 м^2 розсувають так, що відстань між ними збільшується з 5 до 14 мм. Яку ро-

боту треба при цьому виконати, якщо напруга між пластинами конденсатора стала (тобто конденсатор не від'єднується) і дорівнює 380 В?

13. Між обкладками плоского конденсатора площею 100 см^2 кожна розміщена слюда. Обкладки притягуються одна до одної з силою 0,03 Н. Визначити напруженість поля конденсатора ($\epsilon_{\text{слюди}} = 6$).

14. На пластинах плоского вакуумного конденсатора рівномірно розподілений заряд $5 \cdot 10^{-6}$ Кл. Площа обкладок 100 см^2 , а відстань між обкладками 3 мм. Заряджений конденсатор від'єднаний від батареї. Яку треба виконати роботу, щоб розсунути пластини до 8 мм?

15. На пластинах плоского повітряного конденсатора з площею пластин 150 см^2 розміщений заряд $5 \cdot 10^{-8}$ Кл. Яка сила взаємного притягання між пластинами і об'ємна густина енергії поля конденсатора?

16. Два конденсатори ємністю 5 і 7 мкФ послідовно приєднані до джерела з різницею потенціалів 200 В. Які будуть заряди і різниця потенціалів батареї, якщо конденсатори від'єднати від джерела і з'єднати паралельно?

ГЛАВА 11

ЗАКони постійного струму

§ 106. Умови, необхідні для виникнення і підтримання електричного струму

Під електричним струмом розуміють упорядковане перенесення або напрямлений рух електрично заряджених частинок. Електричний струм може проходити у твердих тілах, рідинах і газах. Якщо в середовищі є велика кількість вільних електронів, то електричний струм у ньому проходить за рахунок дрейфу цих електронів. Такий струм називають *струмом провідності*, а речовини, в яких він можливий, – *провідниками*. За напрям струму беруть напрям дрейфу позитивних зарядів. Тому напрям струму в металах протилежний напрям руху електронів.

Електричний струм провідності виникає у провіднику, якщо в ньому є вільні заряди і існують сили, які забезпечують упорядкований дрейф цих зарядів. Сили електричної взаємодії між зарядами в самому провіднику струму спричинити не можуть. Вони тільки перерозподіляють заряди, внаслідок чого напруженість поля всередині провідника дорівнюватиме нулю, а потенціали всіх точок будуть однакові. Щоб підтримувати в колі тривалий струм, на вільні заряди мають діяти *сторонні сили*. Пристрої, які забезпечують виникнення і дію сторонніх сил, називають *джерелами струму*. У цих пристроях різнойменні заряди відокремлюються. Під дією сторонніх сил електричні заряди всередині джерела струму рухаються в

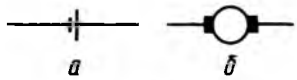


Рис. 11.1

напрямі, протилежному дії сил електричного поля. Внаслідок цього на полюсах джерела струму підтримується постійна різниця потенціалів. Схематичне зображення джерел постійного струму подано на рис. 11.1.

Позитивний полюс гальванічних елементів і акумуляторів позначають довгою рисою, негативний – короткою (рис. 11.1, а). Біля полюсів генераторів (рис. 11.1, б) ставлять знаки “+” і “-”.

§ 107. Сила і густина струму

Сила струму

Кількісною характеристикою електричного струму є його сила I і густина j . Силою струму називають скалярну величину, що дорівнює відношенню кількості електрики ΔQ , яка за час Δt переноситься через певний переріз провідника, до часу Δt :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (11.1)$$

Постійним називається електричний струм, сила і напрям якого з часом не змінюються. Для постійного струму

$$I = \frac{Q}{t}. \quad (11.2)$$

Густина струму

Це векторна фізична величина, її модуль дорівнює відношенню сили струму I до площі поперечного перерізу провідника S :

$$j = \frac{I}{S}. \quad (11.3)$$

Вектор \mathbf{j} напрямлений уздовж напрямку струму.

Якщо в коло постійного струму ввімкнено провідники з різними поперечними перерізами, то густина струму в різних перерізах обернено пропорційна площам перерізів провідників. Густина струму характеризує розподіл електричного струму по перерізу провідника.

З'ясуємо, від чого залежить густина струму. Для цього в думці виділимо всередині провідника площадку одиничної площі ($S = 1$), розміщену перпендикулярно до напрямку середньої швидкості \mathbf{v} руху зарядів. Побудуємо на цій площадці, як на основі, циліндр, висота якого дорівнює h (взагалі, $h = vt$, але $t = 1$ с, звідси $h = v$). Тоді кількість електронів, які

пройдуть крізь цю площадку за $t = 1$ с, дорівнює кількості електронів усередині циліндра. Якщо n – кількість електронів провідності в одиничному об'ємі (концентрація вільних електронів), то nV – кількість електронів провідності всередині циліндра, а nev – заряд, який вони переносять (e – заряд електрона). Густина струму можна обчислити за формулою

$$j = nev. \quad (11.4)$$

Отже, густина струму в провіднику пропорційна концентрації вільних електронів у ньому і швидкості їхнього руху.

Слід зазначити, що важливою особливістю металів є практично стала концентрація вільних електронів у них. Концентрація вільних електронів для певного металу не залежить від температури.

Використавши формулу (11.4), можна визначити швидкість напрямленого руху електронів у провіднику (швидкість дрейфу):

$$v = \frac{j}{ne}.$$

Обчислимо цю швидкість для мідного провідника, для якого $n = 8,5 \times 10^{28} \text{ м}^{-3}$. При максимально допустимій густині струму $j = 10^7 \text{ А/м}^2$

$$v = \frac{10^7 \text{ А/м}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

Середня швидкість теплового руху електронів при кімнатній температурі становить приблизно 10^5 м/с . Порівнявши ці значення із швидкістю їх дрейфу, побачимо, що швидкість дрейфу електронів набагато менша за швидкість їх теплового руху.

Треба розрізнати швидкість дрейфу електронів у металі і швидкість поширення електричного струму. Коли йдеться про швидкість поширення струму, то мають на увазі швидкість поширення електричного поля як причини дрейфу електронів. Під дією джерела струму всі електрони в металевих провідниках починають свій напрямлений рух майже одночасно, оскільки швидкість поширення електричного поля дорівнює швидкості світла c . Час установлення електричного струму в колі завдовжки l становить $t = l/c$.

Силу струму можна знайти, коли відоме значення густини струму: $I = jS$.

У СІ одиниця сили електричного струму *ампер* (А) – основна. Цю одиницю названо на честь французького фізика А. Ампера (1775–1836).

За допомогою відношення (11.2) можна вивести формулу для визначення одиниці кількості електрики:

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

Кулон – це кількість електрики, що проходить крізь поперечний переріз провідника при струмі 1 А за час 1 с.

Одиниця густини струму – *ампер на квадратний метр* (А/м²).

§ 108. Закон Ома для ділянки кола без ЕРС

Закон Ома для ділянки кола

Щоб у провіднику весь час проходив струм, необхідно підтримувати в ньому постійне електричне поле. Візьмемо металевий провідник завдовжки l (рис. 11.2). Нехай E – напруженість електричного поля всередині провідника, а $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – постійна різниця потенціалів на кінцях провідника. Тоді

$$E = (\varphi_1 - \varphi_2) / l = U / l.$$

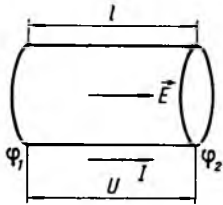


Рис. 11. 2

Якщо стан провідника не змінюється з часом, то для кожного провідника існує однозначна залежність між силою струму в провіднику і напругою, прикладеною до його кінців. Г. Ом експериментально встановив, що сила струму в металевих провідниках пропорційна прикладеній напрузі: $I = GU$. Коефіцієнт пропорційності G називають *електропровідністю провідника*, а обернену величину

$R = G^{-1}$ – його *електричним опором*. Електричний опір – одна з найважливіших характеристик електричних властивостей провідника, яка визначає впорядкованість переміщення носіїв струму.

За законом Ома, для ділянки кола сила струму в провіднику пропорційна напрузі на його кінцях і обернено пропорційна опору провідника:

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

Вольт-амперна характеристика

Графік, на якому зображено залежність струму від прикладеної напруги, називається *вольт-амперною характеристикою* даного провідника і є прямою лінією (рис. 11.3). Кут нахилу цієї прямої залежить від опору R ділянки кола:

$$\text{ctg } \alpha = \frac{U_1}{I_1} = R.$$

При зміні прикладеної напруги U змінюється сила струму I , але відношення U/I для даного провідника при даній температурі не змінюється.

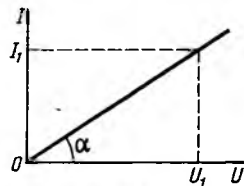


Рис. 11. 3

§ 109. Залежність електричного опору від матеріалу, довжини і площі поперечного перерізу провідника

Електричний опір зумовлений тим, що вільні електрони в процесі дрейфу взаємодіють з позитивними іонами кристалічних ґрат металу. При підвищенні температури частішають співдари електронів з іонами, тому опір провідників залежить від температури, а також від матеріалу провідника, тобто будови його кристалічних ґрат. Для однорідного циліндричного провідника завдовжки l і площею поперечного перерізу S опір визначають за формулою

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (11.6)$$

де $\rho = RS/l$ – питомий опір провідника (опір однорідного циліндричного провідника, який має одиничну довжину і одиничну площу поперечного перерізу).

Одиниця опору – ом (Ом).

Ом – *опір провідника, по якому при напрузі 1 В проходить струм 1 А*, $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А}$.

Величину $\sigma = 1/\rho$, обернену до питомого опору, називають *питомою електричною провідністю провідника*.

Одиниця електричної провідності – *сименс (См)*.

Сименс – електрична провідність провідника опором 1 Ом, тобто $1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$.

З формули (11.6) випливає, що одиницею питомого опору є *ом-метр (Ом · м)*.

Питомий опір найбільш поширених провідників

Матеріал	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом · м	Характеристика матеріалу
Срібло	1,6	Найкращий провідник
Мідь	1,7	Застосовують найчастіше
Алюміній	2,9	” часто
Залізо	9,8	” рідко

§ 110. Залежність електричного опору провідників від температури

Залежність опору провідників від температури

Питомий електричний опір провідника залежить не тільки від роду речовини, а й від її стану. Залежність питомого опору від температури визначають формулою

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

де ρ_0 – питомий опір при 0°C ; t – температура (за шкалою Цельсія); α – температурний коефіцієнт опору, який характеризує відносну зміну опору провідника при нагріванні його на 1°C або 1 K :

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 t}. \quad (11.8)$$

Температурні коефіцієнти опору речовин різні при різних температурах. Проте для багатьох металів зміна α від температури не дуже велика. Для всіх чистих металів $\alpha \approx 1/273\text{ K}^{-1}$ (або $^\circ\text{C}^{-1}$).

Залежність опору металів від температури покладено в основу будови *термометрів опору*. Термометри опору застосовують як при дуже високих, так і при дуже низьких температурах, коли рідинні термометри застосовувати не можна. З поняття провідності провідника випливає, що чим менший опір провідника, тим більша його провідність. Від нагрівання чистих металів їх опір збільшується, а від охолодження – зменшується.

Провідність чистих металів при нагріванні зменшується, а при охолодженні збільшується.

Надпровідність

У 1911 р. голландський фізик Х. Камерлінг-Оннес під час проведення дослідів із ртуттю, яку можна добути в чистому вигляді, спостерігав зовсім несподіване явище. Питомий опір при температурі $4,2\text{ K}$ (близько -269°C) різко зменшився до такої малої величини, що його практично не можна виміряти. Це явище перетворення електричного опору в нуль Камерлінг-Оннес назвав *надпровідністю*. Тепер надпровідність виявлено у більш як 25 металевих елементів, багатьох сплавів, деяких надпровідників і полімерів. Температура $T_{\text{кр}}$ переходу провідника в надпровідний стан для чистих металів лежить у межах від $0,14\text{ K}$ для іридію до $9,22\text{ K}$ для ніобію.

Рух електронів у металі, який перебуває в стані надпровідності, так упорядкований, що електрони, переміщуючись по провіднику, майже не зазнають співударів з атомами та іонами ґрат. Явище надпровідності можна пояснити з позицій квантової механіки.

§ 111. Електрорушійна сила джерела струму

ЕРС джерела струму

Якщо два заряджені тіла A і B (рис. 11.4, а), які перебувають під різними потенціалами $\varphi_1 > \varphi_2$, з'єднані провідником AaB , то по ньому проходить струм, який через короткий час, коли потенціали зрівняють-

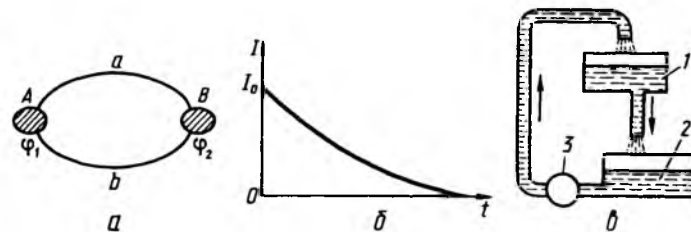


Рис. 11.4

ся, припиниться (рис. 11.4, б). Щоб струм не змінювався в часі, треба підтримувати незмінною різницю потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$, тобто весь час поповнювати заряди з'єднаних тіл. Це можна зробити, переносячи заряди тіла B назад у тіло A , забезпечивши ніби кругообіг електрики, для чого контур, по якому проходить струм, має бути замкненим ($AaBbA$).

Проте на ділянці BbA зарядам доведеться переміщуватись проти електричних сил. Це переміщення можуть виконати тільки сторонні сили (тобто сили не електричної природи, а механічної, хімічної і т. д.), які можуть діяти або на всій ділянці, або на окремих її частинах. Доврою аналогією може бути приклад, поданий на рис. 11.4, в. Щоб забезпечити постійну течію води з верхнього бака 1 в нижній 2, у трубопроводі потрібний насос 3 (механічні сили) для закачування води у верхній бак.

Сторонні сили мають виконувати роботу з переміщення зарядів, на що, природно, витрачається енергія.

Роботу, яку виконують сторонні сили при переміщенні одичного позитивного електричного заряду вздовж усього кола, називають *електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму*.

Одиниця ЕРС – *вольт (В)*.

Усередині провідника, по якому проходить постійний електричний струм, одночасно існують поля як кулонівських ($E_{\text{кул}}$), так і сторонніх ($E_{\text{ст}}$) сил. Напруженість результуючого поля визначають за принципом суперпозицій полів:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{кул}} + \mathbf{E}_{\text{ст}}. \quad (11.9)$$

Якщо електричний струм проходить по провіднику, то над зарядом Q при його переміщенні виконують роботу як кулонівські ($A_{\text{кул}}$), так і сторонні ($A_{\text{ст}}$) сили. Повна робота дорівнює сумі цих робіт:

$$A = A_{\text{кул}} + A_{\text{ст}}.$$

Поділивши обидві частини цього співвідношення на Q , дістанемо

$$\frac{A}{Q} = \frac{A_{\text{кул}}}{Q} + \frac{A_{\text{ст}}}{Q}.$$

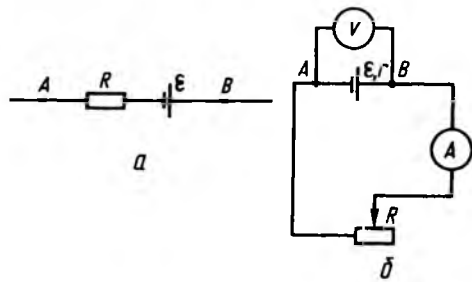


Рис. 11.5

Застосуємо це співвідношення до ділянки AB електричного кола (рис. 11.5, а), по якому проходить постійний струм:

$$\frac{A_{AB}}{Q} = \frac{A_{кул}}{Q} + \frac{A_{ст}}{Q}.$$

Величина $A_{кул}/Q = \varphi_A - \varphi_B$ характеризує різницю потенціалів у точках A і B , а величина $A_{ст}/Q = \mathcal{E}_{BA}$ – електрорушійну силу, яка діє на ділянці AB , тому співвідношення (8.9) можна переписати у вигляді

$$A_{AB}/Q = (\varphi_A - \varphi_B) + \mathcal{E}_{BA}.$$

Напруга

Фізичну величину, що чисельно дорівнює повній роботі, яку виконують кулонівські і сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду вздовж ділянки кола (наприклад, AB) з точки A в точку B , називають напругою (спадом напруги) на цій ділянці.

Отже,

$$U_{BA} = (\varphi_A - \varphi_B) + \mathcal{E}_{BA}.$$

Аналізуючи цей вираз, можна зробити висновок про те, що напруга на кінцях ділянки кола AB дорівнює різниці потенціалів тільки тоді, коли до ділянки не прикладено ЕРС:

$$U_{BA} = \varphi_A - \varphi_B \text{ при } \mathcal{E}_{BA} = 0.$$

ЕРС можна виміряти за різницею потенціалів на клеммах розімкненого джерела:

$$\mathcal{E}_{BA} = (\varphi_A - \varphi_B) \text{ при } U_{BA} = 0.$$

§ 112. Закон Ома для повного кола

Розглянемо замкнене коло, яке складається із зовнішньої частини, що має опір R , і з внутрішньої – джерела струму, опір якого r (рис. 11.5, б). За законом збереження енергії, ЕРС джерела струму дорівнює сумі спадів напруг на зовнішній і внутрішній ділянках кола, оскільки при переміщенні по замкнутому колу заряд повертається у вихідне положення в точку з тим самим потенціалом (тобто $\varphi_A - \varphi_B$):

$$\mathcal{E} = IR + Ir, \quad (11.10)$$

де IR і Ir – спади напруги відповідно на зовнішній і внутрішній ділянках кола. Звідси

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (11.11)$$

Формула (11.11) виражає закон Ома для повного кола:

сила струму в колі пропорційна ЕРС, яка діє в колі, і обернено пропорційна сумі опорів кола і внутрішнього опору джерела.

ЕРС, як і сила струму, – величина алгебрична. Якщо ЕРС сприяє руху позитивних зарядів у певному напрямі, то її вважають додатною ($\mathcal{E} > 0$). Якщо ЕРС перешкоджає руху позитивних зарядів у певному напрямі, то її вважають від'ємною.

Треба мати на увазі, що формулою (11.11) можна користуватися тільки тоді, коли струм проходить усередині джерела від негативного полюса до позитивного, а в зовнішньому колі – від позитивного полюса до негативного.

§ 113. Правила Кірхгофа. З'єднання провідників

Правила Кірхгофа

У загальному випадку на практиці часто доводиться розраховувати складні розгалужені електричні кола, які містять вузли. *Вузлом A у розгалуженому колі називають точку, в якій збігаються не менш як три провідники* (рис. 11.6).

Звичайно, значні труднощі становлять задачі, пов'язані з визначенням сили струмів у всіх ділянках розгалуженого кола, якщо задано значення опорів і ЕРС. Безпосередньо застосувати закон Ома дуже важко, і найчастіше це призводить до помилок під час розрахунку. Труднощі під час розв'язування таких задач спрощуються, якщо застосовувати правила Кірхгофа.

Наслідком закону збереження заряду, за яким у жодній точці провідника не повинні нагромаджуватись або зникати заряди (це стосується вузлів), є *перше правило Кірхгофа*:

алгебрична сума струмів, які збігаються у вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^k I_i = 0. \quad (11.12)$$

Це правило можна сформулювати й так:

кількість зарядів, які входять у дану точку провідника за деякий час, дорівнює кількості зарядів, які виходять з даної точки за той самий час.

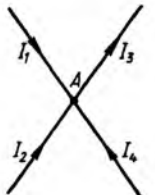


Рис. 11.6

Струми, які підходять до вузла, вважають *додатними*, а струми, які відходять від нього, – *від’ємними*. Наприклад, для вузла *A* (рис. 11.6) перше правило запишемо так:

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 = 0.$$

Узагальненням закону Ома є *друге правило Кірхгофа*, воно стосується будь-якого замкненого контуру розгалуженого електричного кола:

у будь-якому замкненому контурі розгалуженого кола алгебрична сума ЕРС дорівнює алгебричній сумі добутків струмів на опори відповідних ділянок цього контуру:

$$\sum_{i=1}^m I_i R_i = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i, \quad (11.13)$$

де m – кількість ділянок у замкненому контурі; n – кількість джерел струму.

Використовуючи правила Кірхгофа, розгалужене коло постійного струму треба розраховувати в такій послідовності:

1. Довільно вибрати напрям обходу контуру (за рухом стрілки годинника або проти).

2. Довільно вибрати і позначити на схемі стрілками напрям струмів на всіх ділянках кола, причому в межах однієї ділянки (ділянка – це частина кола між сусідніми вузлами) струм повинен мати тільки одне значення і один напрям.

3. Довільні замкнені контури виділяють так, щоб кожний новий контур мав хоча б одну ділянку кола, яка не входить до раніше розглянутих контурів.

4. Якщо вибраний напрям обходу контуру збігається з напрямом струму I_i , то добуток $I_i R_i$ беруть із знаком плюс, і навпаки.

5. Перед \mathcal{E}_i ставлять знак плюс, якщо при обході контуру доводиться йти всередині джерела від негативного полюса до позитивного (тобто, якщо на шляху обходу контуру потенціал зростає), інакше ЕРС записують із знаком мінус.

Правила Кірхгофа дають можливість визначити силу і напрям струму в будь-якій частині розгалуженого кола, якщо відомі опори його ділянок і ввімкнені в них ЕРС.

Для системи з n провідників, що утворюють r вузлів, складають n рівнянь: $k-1$ рівнянь для вузлів і $n-(k-1)$ рівнянь для незалежних замкнених контурів.

Якщо, розв’язавши рівняння, виявимо, що значення якого-небудь струму буде від’ємне, то треба змінити умовно взятий напрям цього струму на протилежний, зберігаючи його знайдене абсолютне значення незмінним.

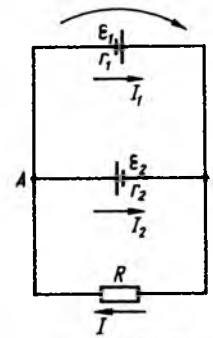


Рис. 11.7

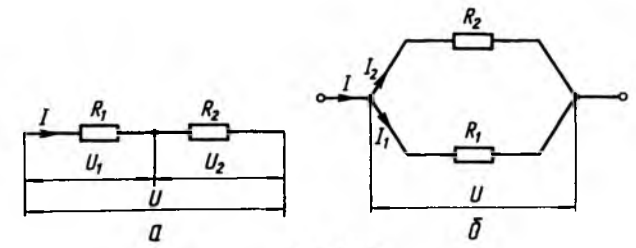


Рис. 11.8

Для прикладу розрахуємо електричне поле, зображене на рис. 11.7. Візьмемо напрям обходу контуру за рухом стрілки годинника, а напрям струмів – так, як показано на рис. 11.7. Складемо рівняння:

$$I_1 r_1 + IR = \mathcal{E}_1 \quad (\text{для контуру } A\mathcal{E}_1BRA),$$

$$I_2 r_2 + IR = -\mathcal{E}_1 \quad (\text{для контуру } A\mathcal{E}_2BRA),$$

$$I - I_1 - I_2 = 0 \quad (\text{для вузла } A).$$

Підставивши числові значення з умови задачі, можна визначити невідомі струми, опори або ЕРС.

З’єднання провідників

Провідники в електричному колі можна з’єднувати послідовно або паралельно.

При послідовному з’єднанні (рис. 11.8, а) сила струму в усіх частинах кола однакова ($I = \text{const}$), загальний опір кола, який складається з послідовно з’єднаних провідників, дорівнює сумі опорів окремих провідників:

$$R = R_1 + R_2.$$

При паралельному з’єднанні провідників сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів, які проходять у розгалужених ділянках (рис. 11.8, б):

$$I = I_1 + I_2.$$

Спади напруг у паралельно з’єднаних ділянках однакові: $U = \text{const}$. Загальний опір R паралельно з’єднаних провідників R_1 і R_2 кола визначають так:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

§ 114. З'єднання джерел електричної енергії в батарею

Часто джерела електричної енергії з'єднують між собою для живлення кола. З'єднання джерел у батарею може бути послідовним і паралельним.

При послідовному з'єднанні два сусідніх джерела з'єднують різними полюсами (рис. 11.9).

Позитивний і негативний полюси з'єднані провідником, а отже, мають однаковий потенціал. Тому різниця потенціалів між позитивним полюсом другого джерела і негативним полюсом першого дорівнює сумі ЕРС цих джерел.

Якщо всього є n однакових джерел, то різниця потенціалів крайніх полюсів при розімкненому колі в n разів більша, ніж в одного джерела. Отже,

при послідовному з'єднанні ЕРС батареї дорівнює сумі ЕРС окремих джерел, які утворюють батарею.

Це правильно й тоді, коли окремі джерела мають різні ЕРС.

Загальний опір батареї однакових джерел дорівнює сумі внутрішніх опорів окремих джерел:

$$r_6 = r_1 + r_2 + \dots + r_n = nr.$$

Тоді, за законом Ома, сила струму в такому колі

$$I = \frac{n\epsilon}{R + nr}.$$

Якщо з'єднати між собою всі позитивні і всі негативні полюси двох або n джерел, то таке з'єднання джерел енергії називають паралельним (рис. 11.10). На практиці завжди з'єднують паралельно джерела тільки з однакою ЕРС.

При паралельному з'єднанні напруга на розімкненій батареї така сама, як і на окремому джерелі. Отже,

при паралельному з'єднанні однакових джерел електричної енергії ЕРС батареї дорівнює ЕРС одного джерела.

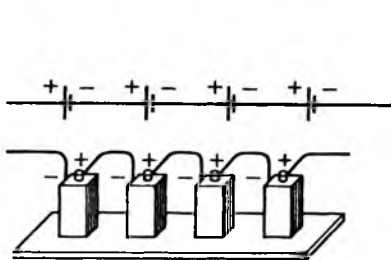


Рис. 11.9

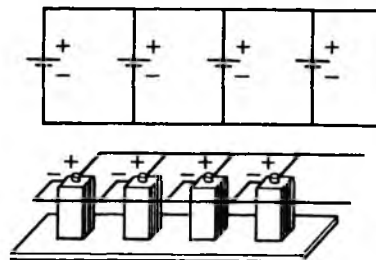


Рис. 11.10

Опір батареї при паралельному з'єднанні менший, ніж опір одного джерела. Якщо коло складається з n однакових джерел, внутрішній опір кожного r , то опір батареї

$$r_6 = r/n.$$

Тоді, за законом Ома,

$$I = \frac{\epsilon}{R + r/n}.$$

§ 115. Закон Джоуля – Ленца

Якщо по провіднику проходить струм, то провідник нагрівається. Як показують досліди, кількість теплоти, яка виділяється, тим більша, чим більша сила струму і чим більший опір провідника. Підвісимо залізний дріт і пропустимо по ньому струм, увімкнувши в коло реостата амперметр. Постійно зменшуючи опір реостата (тобто збільшуючи силу струму в колі), спостерігаємо спочатку прогинання дроту від нагрівання, а потім при дуже великій силі струму – червоне розжарення. Від подальшого збільшення сили струму дріт може перегрітися. На підставі дослідних даних можна твердити, що в електричному колі відбувається ряд перетворень енергії. Переміщуючи заряд уздовж електричного кола, кулонівські і сторонні сили виконують роботу A . Якщо електричне коло в розглядуваній системі координат перебуває в стані спокою, а струм, який проходить по ньому, сталий ($I = \text{const}$), то виконувана робота

$$A = IUt. \quad (11.14)$$

За формулою (11.14) можна обчислити роботу, яку виконує електричний струм, незалежно від того, в який вид енергії перетворюється електрична енергія. Ця робота може бути витрачена на збільшення внутрішньої енергії провідника, тобто на його нагрівання, на зміну механічної енергії, наприклад на рух провідника із струмом у магнітному полі, і т. д.

Необоротні перетворення електричної енергії в теплову можна пояснити взаємодією електронів з іонами металевго провідника. Стикаючись з іонами металевго провідника, електрони передають їм свою енергію. Внаслідок цього збільшується інтенсивність коливань іонів навколо положення рівноваги. З чим більшою швидкістю коливаються іони, тим вища температура провідника. Адже температура – це міра середньої енергії хаотичного руху атомів, з яких складається провідник.

Щоб обчислити електричну енергію, затрачену на нагрівання провідника, треба знати спад напруги на даній ділянці провідника $U = IR$. Підставивши у формулу (8.14) це значення, дістанемо

$$A = I^2 Rt, \text{ або } Q = I^2 Rt. \quad (11.15)$$

Формула (11.15) виражає *закон Джоуля – Ленца*:

кількість теплоти, яку виділяє струм у провіднику, пропорційна квадрату сили струму, часу його проходження і опору провідника.

§ 116. Робота і потужність електричного струму

Робота електричного струму

Припустимо, що нас цікавить механічна робота, яку виконує електродвигун, якщо U – напруга сітки, R – опір обмотки, I – струм, що проходить в обмотці. Очевидно, що на механічну роботу $A_{\text{мех}}$, яку виконує двигун, витрачається частина енергії електричного струму. Під час роботи двигуна його обмотка нагріватиметься. За законом збереження енергії, можна твердити, що енергія електричного струму (IUt) перетворюється в механічну ($A_{\text{мех}}$) і теплову ($I^2 Rt$) енергії:

$$IUt = A_{\text{мех}} + I^2 Rt; \quad A_{\text{мех}} = IUt - I^2 Rt.$$

Прилад, призначений для вимірювання енергії електричного струму, називається *електричним лічильником*.

Повну роботу, що виконує джерело струму, ЕРС якого \mathcal{E} , визначають за формулою

$$A = \mathcal{E} It. \quad (11.16)$$

Одиниця роботи електричного струму – *джоуль* (Дж).

Потужність електричного струму

Це відношення роботи електричного струму до часу t , протягом якого вона виконується:

$$N = A/t = IU. \quad (11.17)$$

Одиниця потужності електричного струму – *ват* (Вт).

§ 117. Теплова дія струму

Теплова дія електричного струму відіграє велику роль у сучасній техніці. Розглянемо деякі приклади її застосування.

На тепловій дії струму ґрунтується будова теплового гальванометра, схему якого подано на рис. 11.11. Кінці металевого дроту 2 закріплені нерухомо в металевих колодках 1 і 3. Дріт 2 виготовлено з пружного матеріалу, який не окислюється. Середина дроту 2 відтягується ниткою 5, яка проходить через блок 4 і скріплена з пружиною 6. Якщо по дроту 2 проходить електричний струм, то він нагрівається і подовжується, його прогин збільшується. Внаслідок цього нитка 5 переміщується і повертає блок 4. З блоком 4 скріплена стрілка гальванометра, тому поворот блока відповідає відхиленню стрілки на деякий кут. Якщо шкалу приладу проградуєвано в одиницях сили струму, то прилад називають *амперметром*.

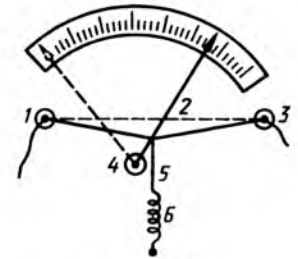


Рис. 11.11

На практиці часто використовують різні електричні нагрівальні прилади і електричні печі. До електричних нагрівальних приладів належать плавкі запобіжники (“пробки”), призначені для усунення небезпеки короткого замикання. Звичайно це тонкі мідні свинцеві дротики, які вводять послідовно в коло електричного струму, розраховані так, щоб вони плавились, якщо струм перевищує те значення, на яке розраховане коло.

До нагрівальних приладів належать і лампочки розжарювання. Першу лампочку винайшов у 1872 р. російський електротехнік О. М. Лодигін. Це був скляний балон, в якому між товстими мідними дротиками закріплювали вугільний стрижень. При пропусканні струму вугільний стрижень розжарювався і давав світло. Удосконаленням ламп розжарювання займалися Т. Едісон, І. Ленгмюр та ін.

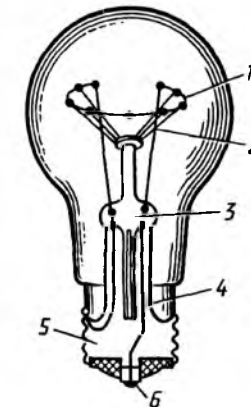


Рис. 11.12

У сучасних лампах ниткою розжарювання є вольфрамовий дріт з температурою плавлення 3 370 °С. Чим вища температура нитки, тим більша частина випромінюваної енергії віддається у вигляді світла. У 1913 р. з’явилися лампочки, балони яких наповнювали інертним газом (аргоном). Наявність аргону сповільнює випаровування нитки, і строк служби ламп збільшується.

Сучасну лампу розжарювання подано на рис. 11.12. Вона має вольфрамову нитку 1, закріплену на металевій ніжці 3, всередині якої проходять дротики 2, що підводять струм до спіралі. Повітря викачують

крізь трубочку 4, яку після цього запаюють. Лампочка має металевий цоколь 5 та ізольований від цоколя контакт 6, до якого припаюють проводи осі нитки розжарювання. Цоколь і контакт 6 при вкручуванні лампочки в патрон з'єднуються з проводами електричної мережі.

Нагрівальними побутовими приладами є електроплита, електропраска, електрочайник і т. д. У різних галузях народного господарства для створення високих температур використовують електричні печі. Температура всередині печі може досягати 2 500 – 3 000 °С. Для цього в печах як струмопровідну речовину застосовують тугоплавкі метали, наприклад молібден. Ще одним важливим застосуванням теплової дії струму є контактне зварювання, яке використовують для зварювання металів із значним питомим опором (нікель, тантал, молібден тощо).

Короткі висновки

- Електричний струм – це впорядкований рух електрично заряджених частинок. Кількісною характеристикою електричного струму є сила струму

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

і густина струму

$$j = \frac{I}{S}$$

За законом Ома для ділянки кола

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

- Електричний опір металевих провідників залежить від матеріалу, довжини і площі поперечного перерізу:

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

З підвищенням температури опір збільшується:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

Деякі провідники і сплави при температурі, близькій до 0 К, електричного опору практично не мають, тобто спостерігається надпровідність.

- Потенціальні сили електростатичного поля (сили Кулона) не можуть підтримувати постійний струм у колі, бо робота цих сил уздовж замкнутого контуру дорівнює нулю. Для підтримання в колі постійного струму мають діяти непотенціальні (сторонні) сили, що мають механічну, хімічну або іншу природу. Пристрої, які забезпечують утворення і дію сторонніх сил, називають джерелами струму. Фізичну величину, що чисельно дорівнює роботі, яку виконують сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду вздовж усього кола, називають ЕРС джерела струму:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{Q}$$

- Закон Ома для замкнутого кола встановлює залежність між силою струму, ЕРС джерела і повним опором кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

- Кількість теплоти, яка виділяється в провіднику із струмом, за законом Джоуля – Ленца дорівнює

$$A = I^2 R t$$

- При впорядкованому русі електронів у провіднику електричне поле виконує роботу

$$A = I U t$$

- Потужність електричного струму дорівнює відношенню роботи до часу, за який вона виконується:

$$N = \frac{A}{t} = I U$$

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що розуміють під електричним струмом? 2. Які умови необхідні для виникнення і підтримання електричного струму? 3. Що називають силою струму? густиною струму? 4. Від чого залежить швидкість напрямленого руху (швидкість дрейфу) електронів у провіднику? 5. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола без ЕРС. 6. Як залежить опір провідника від його довжини, площі поперечного перерізу і матеріалу? 7. Що називають питомим опором? питомою електропровідністю провідника? 8. Як залежить питомий опір провідника від температури? 9. У чому полягає явище надпровідності? 10. Що називають електрорушійною силою джерела струму? 11. Сформулюйте закон Ома для повного кола. 12. Яке з'єднання опорів називають послідовним? паралельним? Чому дорівнює опір кола при цих з'єднаннях? 13. Сформулюйте закон Джоуля – Ленца. 14. Чому дорівнює робота постійного струму на ділянці кола? 15. Чому дорівнює потужність постійного струму?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Яка кількість електронів проходить через поперечний переріз провідника площею 1 мм² за 2 хв, якщо густина струму в провіднику 150 А/см²?

Дано: $S = 1 \text{ мм}^2 = 10^{-8} \text{ м}^2$; $t = 2 \text{ хв} = 120 \text{ с}$; $j = 150 \text{ А/см}^2 = 150 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$;
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Знайти: n .

Розв'язання. Кількість електронів, які проходять через поперечний переріз провідника, дорівнює відношенню заряду, що пройшов через даний поперечний переріз, до заряду електрона:

$$n = \frac{Q}{e}. \quad (1)$$

За час t через переріз провідника при струмі $I = jS$ проходить заряд

$$Q = jSt. \quad (2)$$

Підставивши формулу (2) у вираз (1), маємо

$$n = jSt/e. \quad (3)$$

Обчислення:

$$n = \frac{150 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 120 \text{ с}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 1,15 \cdot 10^{21}.$$

Задача 2. Визначити силу струму короткого замикання батареї, ЕРС якої 15В, якщо при підключенні до неї опору 3 Ом сила струму в колі становить 4 А.

Дано: $\mathcal{E} = 15 \text{ В}$; $R = 3 \text{ Ом}$; $I = 4 \text{ А}$.

Знайти: $I_{\text{к.з}}$.

Розв'язання. Сила струму короткого замикання

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r}, \quad (1)$$

де r – внутрішній опір батареї, який можна знайти, виходячи із закону Ома для повного кола (11.11):

$$r = (\mathcal{E} - IR)/I. \quad (2)$$

Підставивши (2) у (1), дістанемо

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r} = \frac{\mathcal{E}I}{\mathcal{E} - IR}.$$

Обчислення:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{15 \text{ В} \cdot 4 \text{ А}}{15 \text{ В} - 4 \text{ А} \cdot 3 \text{ Ом}} = 20 \text{ А}.$$

Задача 3. Знайти силу струмів, які проходять у кожній гілці електричного кола (рис. 11.13), якщо $\mathcal{E}_1 = 130 \text{ В}$, $\mathcal{E}_2 = 117 \text{ В}$; $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$; $R_2 = 0,3 \text{ Ом}$; $R_3 = 12 \text{ Ом}$. Внутрішній опір джерел ЕРС не враховувати.

Дано: $\mathcal{E}_1 = 130 \text{ В}$; $\mathcal{E}_2 = 117 \text{ В}$; $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$; $R_2 = 0,3 \text{ Ом}$; $R_3 = 12 \text{ Ом}$.

Знайти: I_1 , I_2 , I_3 .

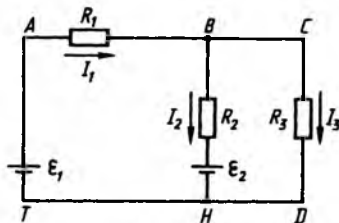


Рис. 11.13

Розв'язання. Розраховуючи розгалужені кола, які мають кілька джерел струму, раціонально користуватися правилами Кірхгофа (11.12), (11.13). Згідно з ними:

1) позначимо на схемі контури, вузли і напрями струмів;

2) визначимо кількість гілок n (у даній схемі їх три) і кількість вузлів (у даній схемі їх два – у точках B і H);

3) щоб скласти рівняння за першим правилом Кірхгофа, як ми встановили, досить взяти один з названих вузлів. Виберемо вузол B , в якому збігаються струми від трьох провідників; урахувавши напрям струмів, дістанемо

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0; \quad (1)$$

4) знайдемо кількість рівнянь, потрібних для розв'язування задач за другим правилом Кірхгофа:

$$n - k + 1 = 3 - 2 + 1 = 2.$$

Виберемо контури $BCDHB$ і $ABHTA$. Встановлюємо обхід по контуру $BCDHB$. Враховуючи правило знаків під час проходження струму всередині джерела ЕРС, вибираємо обхід за рухом стрілки годинника, при якому ЕРС \mathcal{E}_2 буде додатною.

Складаємо перше рівняння за другим правилом Кірхгофа:

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_2. \quad (2)$$

Складемо рівняння для другого контуру. Для цього встановимо напрям обходу для контуру $ABHTA$. Оскільки в цьому контурі два джерела струму і $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$, то обхід почнемо від \mathcal{E}_1 до \mathcal{E}_2 за рухом стрілки годинника. Крім того, знаки при ЕРС і спаді напруги IR встановлюємо за раніше сформульованими правилами:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2. \quad (3)$$

З рівняння (1) знаходимо

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (4)$$

Для визначення числових результатів підставляємо у формули (2) і (3) відомі числові значення опорів і ЕРС:

$$-0,3I_2 + 12I_3 = 117, \quad (5)$$

$$0,5I_1 + 0,3I_2 = 130 - 117. \quad (6)$$

Після додавання (5) і (6) дістанемо

$$0,5I_1 + 12I_3 = 130; \quad I_1 = \frac{130 - 12I_3}{0,5} = 260 - 24I_3. \quad (7)$$

Підставляючи силу струму I_1 в (4), знаходимо $260 - 24I_3 = I_2 + I_3$. Отже,

$$I_2 = 260 - 25I_3. \quad (8)$$

Підставимо (8) у (5):

$$-0,3(260 - 25I_3) + 12I_3 = 117;$$

$$19,5I_3 = 195; \quad I_3 = 10 \text{ А}.$$

Знайдене значення I_3 підставимо в (7):

$$I_1 = 260 - 240 = 20 \text{ А}.$$

Тоді [див. (4)]

$$I_2 = I_1 - I_3 = 20 - 10 = 10 \text{ А}.$$

Задача 4. Визначити час τ , потрібний для нагрівання на електричній плитці потужністю 1200 Вт при ККД 75 % 2 кг льоду, взятого при температурі -16°C , для перетворення його у воду і нагрівання утвореної води до температури 100°C .

Дано: $N = 1200$ Вт; $\eta = 0,75$; $m = 2$ кг; $t_1 = -16$ °С; $t_2 = 100$ °С; $c_n = 2,1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $\lambda = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг; $c_v = 4,19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

Знайти: τ .

Розв'язання. Електрична енергія $Q = \eta N \tau$ витрачається на нагрівання льоду від температури -16 °С до температури танення $t_0 = 0$ °С (Q_1), на танення льоду (Q_2) і на нагрівання утвореної з льоду води від температури 0 °С до температури 100 °С (Q_3):

$$Q_1 = c_n m (t_0 - t_1),$$

$$Q_2 = \lambda m,$$

$$Q_3 = c_v m (t_2 - t_0).$$

Рівняння теплового балансу:

$$\eta N \tau = c_n m (t_0 - t_1) + \lambda m + c_v m (t_2 - t_0),$$

звідки

$$\tau = \frac{c_n m (t_0 - t_1) + \lambda m + c_v m (t_2 - t_0)}{\eta N}.$$

Обчислення:

$$\tau = \frac{2,1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 2 \text{ кг} \cdot 16 \text{ К} + 3,3 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot 2 \text{ кг} + 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 2 \text{ кг} \cdot 100 \text{ К}}{0,75 \cdot 1200 \text{ Вт}} = 1740 \text{ с}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

- Через поперечний переріз провідника щосекунди проходить $12 \cdot 10^9$ вільних електронів. Визначити силу струму в провіднику.
- Яка кількість електрики проходить через поперечний переріз провідника за 1 с, якщо за цей проміжок часу сила струму рівномірно зростає від нуля до 6 А?
- Яка ЕРС джерела напруги, якщо сторонні сили виконують роботу 10 Дж для розділення зарядів $+5$ і -5 Кл?
- Акумуляторну батарею, яка складається з 60 банок, заряджають від джерела постійної напруги 110 В. Зарядний струм дорівнює 2,5 А. ЕРС кожної банки на початку зарядження 1,2 В, внутрішній опір 0,02 Ом. Який опір реостата, увімкненого між джерелом і батареєю?
- ЕРС джерела струму дорівнює 1,5 В. При замиканні джерела опором 2 Ом сила струму становить 0,3 А. Визначити силу струму короткого замикання.
- Два джерела струму з різними ЕРС ($\mathcal{E}_1 = 4$ В, $\mathcal{E}_2 = 6$ В) і однаковими внутрішніми опорами 4 Ом увімкнені паралельно із зовнішнім опором 4 Ом. Визначити струми, які йдуть через зовнішній опір і через елементи.
- Два джерела струму з різними ЕРС ($\mathcal{E}_1 = 2$ В, $\mathcal{E}_2 = 1$ В) і внутрішніми опорами (відповідно 0,5 і 0,2 Ом) увімкнені паралельно із резистором.

Визначити опір резистора. Показ амперметра, увімкненого у коло першого елемента, 1,5 А. Опір амперметра не враховувати.

8. Електричний чайник має в нагрівнику дві секції. Якщо вони з'єднані паралельно, то вода в чайнику закипає за 8 хв, а якщо послідовно – то за 50 хв. За який час закипить вода в чайнику, якщо увімкнено одну з секцій?

9. Визначити потужність нагрівника електрочайника, якщо в ньому за 10 хв можна закип'ятити 2 л води, початкова температура якої 20 °С. ККД нагрівника 70 %.

10. Для нагрівання 4,5 л води від 23 °С до кипіння нагрівник споживає 0,5 кВт·год електричної енергії. Чому дорівнює ККД цього нагрівника?

ГЛАВА 12

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ

§ 118. Класична електронна теорія електропровідності металів

Електронний газ

Електронна теорія пояснює різні властивості речовини існуванням і рухом у ній електронів.

У класичній електронній теорії електрони провідності розглядають як електронний газ, подібний до ідеального одноатомного газу. При цьому припускають, що рух електронів підпорядковується законам класичної механіки Ньютона.

Взаємодією електронів між собою нехтують і вважають, що вони взаємодіють тільки з позитивними іонами ґрат. За цією теорією електронний газ має підпорядковуватись усім законам ідеального газу. Згідно з законом рівномірного розподілу енергії за степенями вільності, на один електрон припадає середня кінетична енергія теплового руху

$$E_k = \frac{3}{2} kT, \quad (12.1)$$

де k – стала Больцмана; T – температура (на кожний степінь вільності припадає енергія, яка дорівнює $\frac{1}{2} kT$, електрон розглядають як матеріальну точку; отже, вільний електрон має три степені вільності). У процесі теплового руху електрони зазнають співударів. Шлях, який проходять електрони між двома послідовними співударами, називають *довжиною вільного пробігу* (λ). Припускають, що при кожному співударі електрон повністю передає свою енергію іонам ґрат і початкова швидкість наступного руху електрона дорівнює нулю.

Якщо провідником проходить постійний струм, то всередині провідника існує електричне поле напруженості E . На кожний електрон з боку

електричного поля діє сила $F = eE$, де e – заряд електрона. Під дією цієї сили електрон набуває прискорення a , яке можна визначити з рівності $m_e a = eE$, звідки $a = \frac{e}{m_e} E$, де m_e – маса електрона.

Якщо $\langle t \rangle$ – середній час між двома послідовними співударами, то на кінець вільного пробігу електрон набуває швидкості $v = a \langle t \rangle = \frac{e}{m_e} E \langle t \rangle$.

Середня швидкість упорядкованого руху електрона

$$\langle v \rangle = \frac{1}{2} \frac{e}{m_e} E \langle t \rangle \quad (12.2)$$

(оскільки вважаємо, що початкова швидкість дорівнює нулю, а рух є рівноприскореним).

Середній час між двома послідовними співударами можна визначити, якщо знати довжину вільного пробігу і середню швидкість теплового руху молекул $\langle v_T \rangle$:

$$\langle t \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle v_T \rangle}. \quad (12.3)$$

Взагалі, $\langle t \rangle = \langle \lambda \rangle / (\langle v_T \rangle + \langle v \rangle)$, але відношення (12.3) є слушним, бо вже було показано, що $\langle v_T \rangle \gg \langle v \rangle$.

Підставивши значення з (9.3) у формулу (9.2), дістанемо

$$\langle v \rangle = \frac{1}{2} \frac{e}{m_e} \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle v_T \rangle} E. \quad (12.4)$$

У § 112 було зазначено, що густина струму визначається [див. (8.4)] середньою швидкістю упорядкованого руху електронів: $j = ne \langle v \rangle$.

Підставивши (12.4) у (11.4), дістанемо

$$j = \frac{ne^2 \langle \lambda \rangle}{2m_e \langle v_T \rangle} E = \sigma E, \quad (12.5)$$

де

$$\sigma = \frac{ne^2 \langle \lambda \rangle}{2m_e \langle v_T \rangle} \quad (12.6)$$

питома провідність матеріалу провідника – величина, обернена до його питомого опору.

Одиниця питомої провідності в СІ – *сименс на метр* (См/м).

З формули (12.5), яка виражає закон Ома, випливає, що густина струму пропорційна напруженості електричного поля.

З формули (12.5) легко дістати закон Ома у вигляді $I = U/R$, для цього її праву і ліву частини треба помножити на S – площу поперечного перерізу провідника. Врахувавши, що $\sigma = \rho^{-1}$, дістанемо $jS = \rho^{-1} ES$, але $jS = I$, а $E = U/l$ (поле всередині провідника завдовжки l вважаємо однорідним); отже,

$$I = \frac{U}{\rho l / S} = \frac{U}{R}.$$

Залежність опору від температури

Виходячи з електронної теорії електропровідності металів, можна пояснити залежність опору провідника від температури. З підвищенням температури його питомий опір збільшується, а електропровідність зменшується. Проаналізувавши вираз (12.6), побачимо, що електропровідність пропорційна концентрації електронів провідності n і середній довжині вільного пробігу $\langle \lambda \rangle$, тобто чим більше $\langle \lambda \rangle$, тим меншою перешкодою для упорядкованого руху електронів є співудари. Електропровідність обернено пропорційна середній тепловій швидкості $\langle v_T \rangle$. Теплова швидкість при підвищенні температури зростає пропорційно \sqrt{T} , що веде до зменшення електропровідності і збільшення питомого опору провідників. Аналізуючи формулу (12.6), можна, крім того, пояснити залежність σ і ρ від роду провідника.

Закон Джоуля – Ленца

На основі класичної електронної теорії провідності металів можна пояснити закон Джоуля – Ленца.

Електрони рухаються упорядковано під дією сил поля. Як раніше, вважатимемо, що в момент співудару з позитивними іонами кристалічних ґрат електрони повністю передають їм свою кінетичну енергію. До кінця вільного пробігу швидкість електрона $v = eE \langle t \rangle / m_e$, а кінетична енергія

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{e^2 \langle t \rangle^2 E^2}{2m_e} = \frac{e^2 \langle \lambda \rangle^2 E^2}{2m_e \langle v_T \rangle^2}.$$

Потужність, яку виділяє одиниця об'єму металу (густина потужності), дорівнює добутку енергії одного електрона на кількість співударів за секунду $\langle v_{\tau} \rangle / \langle \lambda \rangle$ і на концентрацію n електронів:

$$\omega = \frac{ne^2 \langle \lambda \rangle}{2m_e \langle v_{\tau} \rangle} E^2. \quad (12.7)$$

Враховавши (12.6), маємо

$$\omega = \sigma E^2 = \frac{E^2}{\rho} \quad (12.8)$$

– закон Джоуля – Ленца.

Якщо нас цікавить енергія Q , яку виділяє провідник завдовжки l , площею поперечного перерізу S за час t , то вираз (9.8) треба помножити на об'єм провідника $V = Sl$ і час t :

$$Q = \frac{ne^2 \langle \lambda \rangle}{2m_e \langle v_{\tau} \rangle} E^2 l S t.$$

Враховавши, що $E = U/l = IR/l$ (де R – опір провідника), дістанемо закон Джоуля – Ленца в іншому вигляді:

$$Q = I^2 R t.$$

§ 119. Недоліки класичної електронної теорії

Класична теорія електропровідності металів добре пояснює закони Ома і Джоуля – Ленца, залежність електропровідності металів від температури й інші електричні та оптичні властивості речовини.

Проте є явища, які не можна пояснити з точки зору класичної теорії електропровідності металів. Основні з них такі.

З формули (12.6) випливає, що питомий опір металів $\rho = 1/\sigma$ має зростати як \sqrt{T} , бо швидкість теплового руху пропорційна \sqrt{T} (див. (4.5) – (4.7)). Цей висновок теорії суперечить дослідним даним, згідно з якими питомий опір металів зростає пропорційно першому степеню T (див. (10.7)), тобто швидше, ніж \sqrt{T} .

Згідно з класичною електронною теорією, теплоємність* металів має бути в 1,5 раза більша, ніж у діелектриків. Насправді теплоємність металів не відрізняється помітно від теплоємності неметалевих кристалів. Пояснити цю невідповідність змогла лише квантова теорія металів.

* Молярна теплоємність (C_m) – це теплоємність одного моля речовини, вона зв'язана з питомою теплоємністю співвідношенням $C_m = Mc$.

§ 120. Робота виходу

На основі класичної теорії електропровідності металів електрони провідності, які утворюють “електронний газ”, беруть участь у тепловому русі. Внаслідок того що електрони провідності вдержуються всередині металу, можна твердити, що поблизу поверхні на них діють сили, направлені всередину металу. Електрон тільки тоді може покинути метал, коли зможе виконати роботу A проти цих сил. Цю роботу A назвали *роботою виходу*.

З'ясуємо зміст поняття “робота виходу”. Якщо електрон вилетів з металу, то на поверхні металу він індукуює позитивний заряд, який негайно взаємодіє за законом Кулона з електроном, що вилетів, і повертає його назад. Робота проти цієї сили є частиною роботи виходу. Найшвидші електрони в своєму тепловому русі можуть віддалятися на кілька міжатомних відстаней від поверхні металу. Біля поверхні утворюється “хмара” негативних електронів. Густина цієї хмари швидко зменшується з віддаленням від поверхні, яка внаслідок втрати електронів стає позитивно зарядженою. Позитивно заряджена поверхня металу і негативно заряджена хмара утворюють ніби заряджений конденсатор, поле якого зосереджене тільки між його обкладками і не спричинює електричне поле в зовнішньому навколишньому просторі. Щоб електрон пройшов цей подвійний шар, він має виконати деяку роботу. Повна робота виходу зумовлена обома названими вище причинами. Між поверхнею металу і електронною хмариою виникає різниця потенціалів $\Delta\phi$, яку називають *потенціальним бар'єром*.

Такий бар'єр протидіє наростанню процесу вильоту, бо треба виконати певну роботу виходу, щоб подолати потенціальний бар'єр при видаленні електрона з металу.

Якщо електрон усередині металу має кінетичну енергію E_k , то він може покинути поверхню металу за умови

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} > A,$$

де m_e , v – відповідно маса і швидкість електрона.

Роботу виходу визначають за формулою

$$A = e\Delta\phi. \quad (12.9)$$

Робота виходу електронів з деяких металів

Метал	A , eВ
Алюміній	3,7
Вольфрам	4,5
Нікель	2,3
Мідь	4,3
Платина	6,3
Цинк	1,8
Цезій	4,0

Звичайно роботу виходу виражають в *електрон-вольтах* (eВ). 1 eВ – це енергія, набута електроном, який пройшов різницю потенціалів 1 В:

$$1\text{eВ} = 1\text{В} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

При кімнатній температурі кількість електронів, які мають швидкості, достатні для вильоту, дуже мала, оскільки робота виходу з металів має порядок кількох електрон-вольт залежно від природи металу, а кінетична енергія електрона, яка визначається енергією його теплового руху при кімнатній температурі ($T \approx 300\text{ К}$),

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 300\text{ К} = 4,15 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 0,026\text{ eВ}.$$

§ 121. Термоелектричні явища. Термоелектрорушійна сила

Явище Зеебека

У § 115–117 описано теплову дію електричного струму, тобто перетворення енергії електричного струму в теплоту. А чи можна без механічної дії перетворити теплоту в електричну енергію? Виявляється, що можна.

Виконаємо такий дослід. Якщо спаяти кінці двох металевих дротів, наприклад мідного і залізного, а потім нагріти один із спаїв, а другий лишити холодним, то в такому колі виникне електричний струм, який можна виявити за допомогою гальванометра (рис. 12.1). Це явище відкрив у 1821 р. Т. Зеебек.

Суть його в тому, що в замкненому електричному колі, складеному з різних металів, виникає термоелектрорушійна сила, якщо спаї матимуть різну температуру. Два метали, спаяні своїми кінцями, назвали *термопарою*, або *термоелементом*.

Струм, добутий від такої термопари, називають *термоелектричним струмом*.

ТермоЕРС термопари залежить від різниці температур спаїв:

$$\varepsilon = \varepsilon(T_2 - T_1) = \varepsilon_0 \Delta T, \quad (12.10)$$

де ε_0 – питома термоЕРС, яка залежить не тільки від матеріалу провідників, а й від інтервалу температур; T_2 і T_1 – температури відповідно гарячого і холодного спаїв.

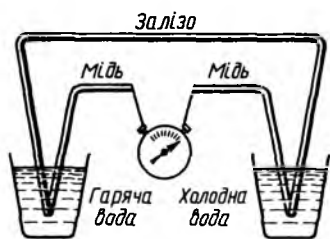


Рис. 12.1

Явище Пельтьє

До термоелектричних явищ належить також явище Пельтьє, яке полягає в тому, що коли через термопару, спаї якої мають однакову температуру ($T_1 = T_2$), від зовнішнього джерела ЕРС пропускати електричний струм, то температура одного спаю починає підвищуватись, а другого – знижуватись, тобто додатково до джоулевої теплоти в одному спаї поглинатиметься, а в другому виділятиметься теплота Пельтьє $Q_{\text{П}}$. Ця теплота пропорційна силі струму I і часу його проходження t (тобто кількості електрики):

$$Q_{\text{П}} = nIt, \quad (12.11)$$

де n – коефіцієнт Пельтьє, який залежить від природи металів.

Для збільшення термоелектрорушійної сили кілька термопар з'єднують у батарею.

Термоелектричні явища в техніці

Явище Пельтьє використовують для створення холодильних машин. У таких холодильних агрегатах як робочу речовину – холодоагент – використовують електронний газ. Якщо температура холодного спаю стала, то має виконуватись така умова теплового балансу:

$$Q_{\text{П}} = Q_{\text{Дж}} + Q_{\text{Т}},$$

де $Q_{\text{П}}$ – кількість теплоти, яка відводиться від спаю речовини (теплота Пельтьє); $Q_{\text{Дж}}$ – кількість теплоти, яка виділяється в спаї в процесі проходження струму (джоулева теплота); $Q_{\text{Т}}$ – кількість теплоти, зумовлена теплопровідністю, тобто кількість теплоти, яку підводять до спаю зовні від більш нагрітих предметів. Це співвідношення накладає обмеження на величину максимальної різниці температур $\Delta T_{\text{max}} = T_1 - T_2$ між гарячим і холодним спаями. Для збільшення ΔT_{max} термобатареї каскадують. Принцип каскадування полягає в тому, що холодні спаї першої термобатареї охолоджують гарячі спаї другої термобатареї, а це призводить до дальшого зниження температури холодних спаїв другого каскаду. Тепер ΔT_{max} однокаскадних термобатареї досягає 60 – 65 °С, тобто при температурі гарячих спаїв 30 °С можна дістати охолодження до –30 °С. Важливою особливістю явища Пельтьє є його оборотність. Цією властивістю широко користуються для створення термостатів і установок для кондиціонування повітря.

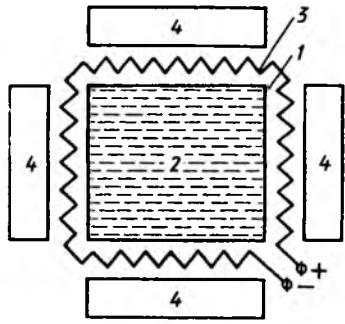


Рис. 12. 2

Термоелектричні ефекти можна використовувати для акумулювання електричної енергії. Термоелектричний акумулятор (рис. 12.2), що ґрунтується на явищах Зеебека і Пельтьє, являє собою металевий резервуар 1, заповнений речовиною 2, яка акумулює теплову енергію. На зовнішній поверхні резервуара встановлюють термопари 3, холодні спаї яких охолоджуються за допомогою радіаторів 4 при повітряному способі охолодження або рідким охолодником. Постійний електричний струм,

проходячи через термобатарею, перетворюється, згідно з явищем Пельтьє, в теплову енергію, яку акумулює речовина, що міститься в резервуарі, і, навпаки, за допомогою тих самих термоелементів теплова енергія відповідно до явища Зеебека може бути перетворена в електричну.

Перші термогенератори на напівпровідниках були сконструйовані в СРСР під керівництвом академіка А. Ф. Йоффе. Тепер напівпровідникові термоелементи широко використовують як джерела електричної енергії на космічних кораблях.

§ 122. Контактна різниця потенціалів

Відомо, що в тому самому металі густина електронів в одиниці об'єму (концентрація) однакова, але різна для різних металів.

Притиснемо одну до одної дві пластинки з одного металу. Внаслідок однакової роботи виходу електронів і однакової густини електронів у кожній одиниці об'єму не зменшиться електронів в одній пластинці і не збільшиться їх у другій. У цьому разі різниця потенціалів двох пластинок дорівнює нулю.

Якщо притиснути одну до одної дві пластинки з різних металів, то внаслідок різної роботи виходу електронів і різної густини електронів в одиниці об'єму кількість їх в одній пластинці зменшиться, а в другій збільшиться. У цьому разі виникає відмінна від нуля різниця потенціалів.

Різницю потенціалів, яка виникає між різнорідними металами від їх стикання, називають контактною різницею потенціалів.

Підвищимо температуру двох пластинок з різних металів, тоді й контактна різниця потенціалів збільшиться. Це відбувається тому, що з підвищенням температури збільшується швидкість руху вільних електронів. Сили взаємодії електронів в одиниці об'єму того металу, в якому густина електронів більша, зростають значніше. Внаслідок цього зростає перехід електронів з однієї пластинки на другу, що веде до збільшення різниці потенціалів.

Якщо взяти дві дротини з різних металів і спаяти їх кінці, то при різній температурі контактів виникає термоелектрорушійна сила, під дією якої проходить термоелектричний струм у колі. У цьому разі теплота, яку підводять до контакта, перетворюється безпосередньо в енергію електричного струму.

Короткі висновки

- Побудувати задовільну кількісну теорію руху електронів у металі, виходячи із законів класичної механіки, не можна. Рух електронів у металі підпорядкований законам квантової механіки.
- Енергію, яку треба затратити, щоб видалити електрон з металу, називають роботою виходу:

$$A = e\Delta\phi.$$

- До термоелектричних явищ належать явища Зеебека і Пельтьє. У замкненому електричному колі, складеному з різних металів, виникає термоЕРС, якщо місця спаїв підтримувати при різних температурах. У спаях термопари поглинається або виділяється теплота, якщо по них проходить струм. Різниця потенціалів, яка виникає між різнорідними металами під час їх стикання, називається контактною різницею потенціалів.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Поясніть на основі електронної теорії закон Ома і закон Джоуля – Ленца.
2. Які явища не можна пояснити з погляду класичної електронної теорії?
3. У чому суть явища термоелектронної емісії?
4. Як збільшити вихід електронів з металу?
5. Від чого залежить робота виходу електронів з металів?
6. Що таке термопара?
7. Що називають термоелектрорушійною силою?
8. Поясніть явище Зеебека.
9. Поясніть явище Пельтьє.
10. Поясніть механізм виникнення контактної різниці потенціалів.

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Робота виходу електрона з цинку дорівнює 4,8 еВ. Визначити величину потенціального бар'єра.

Дано: $A = 4,8 \text{ еВ} = 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Знайти: $\Delta\phi$.

Розв'язання. Роботу виходу визначаємо за формулою

$$A = e\Delta\phi,$$

звідки

$$\Delta\phi = A/e.$$

Обчислення:

$$\Delta\varphi = \frac{6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 4 \text{ В.}$$

Задача 2. Визначити термоЕРС залізкоконстантанової термопари при нагріванні її від 290 до 1500 К, якщо питома термоЕРС дорівнює $5,3 \cdot 10^{-5}$ В/К.

Дано: $\epsilon_0 = 5,3 \cdot 10^{-5}$ В/к; $T_1 = 290$ К; $T_2 = 1500$ К.

Знайти: ϵ .

Розв'язання. ТермоЕРС визначимо за формулою (12.10):

$$\epsilon = \epsilon_0 (T_2 - T_1).$$

Обчислення:

$$\epsilon = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ В/К} \cdot (1500 - 290) \text{ К} = 0,064 \text{ В.}$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Робота виходу електрона з алюмінію 3,7 еВ. Визначити величину потенціального бар'єра.
2. Визначити роботу виходу електрона з платини, якщо величина потенціального бар'єра дорівнює 6,3 В.
3. Визначити термоЕРС нікель-платинової термопари при нагріванні її від 300 до 1300 К, якщо питома термоЕРС дорівнює $1,1 \cdot 10^{-5}$ В/К.
4. На скільки градусів було нагріто срібно-платинову термопару, якщо утворена термоЕРС дорівнює 0,006. Питома термоЕРС дорівнює $1,2 \cdot 10^{-5}$ В/К.
5. Яка питома термоЕРС платино-платинородісової термопари, якщо при нагріванні її на 1500 К виникла термоЕРС $9,6 \cdot 10^{-3}$ В?

ГЛАВА 13

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ В ЕЛЕКТРОЛІТАХ

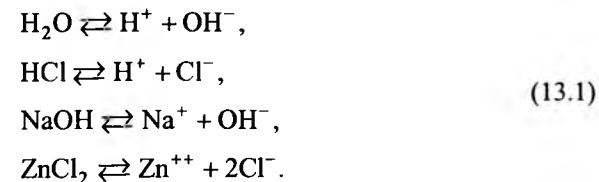
§ 123. Електролітична дисоціація. Електроліз

Електролітична дисоціація

Хорошими провідниками електричного струму є розплавлені метали і солі, а також розчини кислот, солей і лугів, які називають *електролітами*. Заряд в електролітах переносять іони. Таку провідність називають *іонною*. Дистильована вода, концентрована сірчана або інші концентровані кислоти не проводять електричного струму. Проте, якщо в дистильовану воду додати трохи солі, то вона стає провідником електричного

струму. Це пояснюється тим, що під дією розчинника (води) молекули розчиненої речовини розпадаються на заряджені іони і виникають рухомі заряди, потрібні для проходження електричного струму. Такий процес називають *електролітичною дисоціацією*. Внаслідок дисоціації в розчині утворюються *позитивні (катіони) іони* металів і водню та *негативні (аніони) іони* кислотних залишків і гідроксильні групи.

Процес дисоціації записують так:



У цьому запису стрілки, напрямлені вправо, відповідають дисоціації. Стрілки, напрямлені вліво, відповідають оберненому до дисоціації процесу – *рекомбінації (або молізації)*; в ньому різнойменно заряджені іони, сполучаючись, утворюють нейтральні молекули.

Внаслідок процесів дисоціації і рекомбінації, які відбуваються одночасно, в розчині встановлюється рухома (динамічна) рівновага між дисоційованими і недисоційованими молекулами.

У стані динамічної рівноваги розчин характеризується *ступенем дисоціації* α – відношенням числа n'_0 молекул, які дисоціювали на іони, до загального числа n_0 молекул речовини:

$$\alpha = n'_0 / n_0. \quad (13.2)$$

Ступінь дисоціації залежить від діелектричної проникності розчинника.

Чим більше ϵ , тим менша сила взаємодії іонів, які утворюють молекулу, і тим легше, за законом Кулона, можуть бути розірвані внутрішньо-молекулярні зв'язки. Ступінь дисоціації залежить також від концентрації розчину і його температури. При підвищенні температури кінетична енергія молекул зростає, а це веде до збільшення ймовірності іонізації, зумовленої співударами молекул. Ступінь дисоціації характеризує кількість носіїв струму в рідині – іонів протилежних знаків.

Електроліз

Якщо зовнішнього електричного поля немає, то іони протилежних знаків і молекули, що не розпалися, які утворюють розчин, перебувають у стані хаотичного руху. Якщо в розчині створити електричне поле, рух іонів буде впорядкований. Електричне поле в електроліті можна

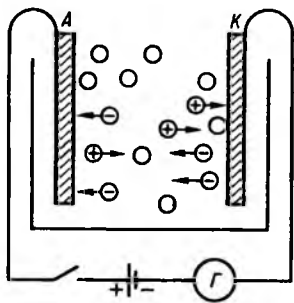


Рис. 13.1

створити, опустивши в нього електроди – провідники, з'єднані з джерелом струму.

Під дією електричного поля катіони рухаються (рис. 13.1) до негативного електрода *K* (катода), а аніони – до позитивного електрода *A* (анода). Слід зазначити, що швидкість руху іонів невелика (наприклад, при $E = 10^2$ В/м швидкість іонів водню приблизно $3,3 \cdot 10^{-5}$ м/с). В електроліті виникає напрямлений рух електричних зарядів, тобто виникає електричний

струм. Сумарний струм дорівнює відношенню заряду (обох знаків), що проходить через даний переріз розчину, до часу. Густину електричного струму в електроліті можна визначити за законом Ома:

$$j = E / \rho, \quad (13.3)$$

де ρ – питомий опір електроліту. Опір електролітів, як і опір провідників, можна обчислити за формулою

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (13.4)$$

Питомий опір електроліту від підвищення температури зменшується, а питома електропровідність збільшується.

Проходження електричного струму через електроліт супроводиться явищем *електролізу* – виділенням на електродах речовин, що входять до складу електроліту. Струм в електролітах зв'язаний з перенесенням речовини, тому *електроліти на відміну від металів називають провідниками другого роду*.

§ 124. Закони Фарадея

Перший закон Фарадея

Хімічні дії електричного струму вперше були відкриті в 1800 р., але тільки в 1833 р. М. Фарадей установив закони електролізу. *Перший закон Фарадея* формулюють так:

маса m речовини, яка виділяється на електроді, пропорційна електричному заряду Q , що пройшов через електроліт:

$$m = kQ, \quad (13.5)$$

або $m = kIt$, де $I = Q/t$ – сила постійного струму, що проходить через розчин за час t .

Коефіцієнт пропорційності k називають *електрохімічним еквівалентом речовини*. Він дорівнює відношенню маси речовини, яка виділилась на електроді під час електролізу, до заряду, що пройшов через електроліт.

Фізичний зміст першого закону Фарадея можна зрозуміти, знаючи механізм іонної провідності й електролізу. Чим більша кількість електронів пройде через електроліт, тим більша кількість іонів підійде до електродів. Позитивні іони, стикаючись з катодом, одержують електрони, яких не вистачало, і осідають на катоді у вигляді нейтральних атомів. Негативні іони, стикаючись з анодом, віддають зайві електрони і осідають на аноді. Кожний іон, який осідає на електроді, переносить з собою деякий електричний заряд. Отже, повний заряд, який переноситься всіма іонами, точно пропорційний повній кількості іонів, що осіли на електродах, тобто масі речовини, яка виділяється.

Другий закон Фарадея формулюють так:

електрохімічний еквівалент речовини прямо пропорційний відношенню атомної (молекулярної) маси A до валентності n :

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{n}. \quad (13.6)$$

Відношення атомної (молекулярної) маси до валентності називають хімічним еквівалентом.

Електрохімічні еквіваленти речовин пропорційні їх хімічним еквівалентам.

Фізичний зміст сталої Фарадея F можна з'ясувати, якщо в (13.5) підставити значення k , яке визначаємо з (13.6):

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} Q. \quad (13.7)$$

Вираз (13.7) називають *об'єднаним законом електролізу Фарадея*:

стала Фарадея характеризує електричний заряд, який треба пропустити через розчин електроліту, щоб виділити на електроді масу будь-якої речовини, яка чисельно дорівнює хімічному еквіваленту.

Електрохімічні еквіваленти деяких речовин

Речовина	$k \cdot 10^{-6}$, кг/Кл
Срібло	1,118
Водень	0,01045
Мідь	0,3294
Цинк	0,0388

Заряд одновалентного іона

Цей заряд переносять іони. Число іонів у масі речовини, яка чисельно дорівнює хімічному еквіваленту, становить N_A/n , де N_A – стала Авогадро; отже,

$$F = Q_i \frac{N_A}{n}; \quad (13.8)$$

тут Q_i – заряд іона. Значення сталої Фарадея визначено експериментально:

$$F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль.}$$

З (13.7) і (13.8) можна визначити електричний заряд будь-якого іона:

$$Q_i = \pm \frac{nF}{N_A}. \quad (13.9)$$

Обчислимо заряд одновалентного ($n = 1$) іона:

$$Q = \pm \frac{F}{N_A} = \pm \frac{9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = \pm 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Оскільки одновалентний іон – це атом, який при дисоціації позбувся одного електрона (*позитивний іон*), або такий, що має один зайвий електрон (*негативний іон*), знайдене значення заряду одновалентного іона збіглося із значенням заряду e електрона.

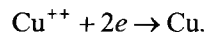
Слід зауважити, що значення заряду електрона, визначене за законами електролізу, збігається із значеннями заряду електрона, визначеними іншими способами.

§ 125. Застосування електролізу в техніці

Явище електролізу широко використовують у техніці і промисловості. Електролізом добувають чисті речовини: залізо, марганець, хром, мідь, цинк, водень, хлор, фтор тощо. Під час добування, наприклад, чистої міді (рафінування міді) з розчину сульфату міді (мідного купоросу) спочатку відбувається дисоціація:



Потім під дією електричного поля катіони міді рухаються до катода і нейтралізуються на ньому, внаслідок чого утворюються атоми міді:



Широко використовують *гальванотехніку*, за допомогою якої металеві деталі і прилади покривають антикорозійними покриттями.

Поверхню металевих предметів, які легко окислюються, часто покривають металами, які важко окислюються: нікелем, сріблом, цинком тощо. Усі бачили, наприклад, нікельовані речі: самовари, чайники, ковзани, ножі, виделки тощо.

Електричний спосіб покриття предметів металами, які не окислюються, називають гальваностегією. Цей спосіб дуже дешевий, зручний і швидкий.

Предмет, який треба покрити, наприклад, шаром нікелю, старанно очищають від бруду і слідів жиру, після чого занурюють в електролітичну ванну. У ванну наливають аміачний розчин подвійної солі нікелю. За анод беруть кусок нікелю, а катодом є сам предмет. Пропускаючи деякий час струм, дістають потрібної товщини густий шар нікелю.

Для сріблення або золочення використовують розчини солей золота й срібла.

Електролітичне осадження металу на поверхню предмета для відтворення форми називають гальванопластикою. Гальванопластику винайшов у 1836 р. російський учений Б. С. Якобі. Відкриття Якобі швидко поширилось у промисловості.

Гальванопластику застосовують для виготовлення копій з барельєфів, статуй, кліше, випуску кредитних білетів та інших паперів тощо.

У поліграфічній промисловості гальванопластику використовують для виготовлення гальванопластичних копій із цинкографічних кліше та ін. Це дає можливість випускати ілюстровані видання великими тиражами.

Електрохімію використовують для синтезу органічних і неорганічних сполук і добування сплавів.

§ 126. Перетворення хімічної енергії в електричну

Контактні різниці потенціалів виникають не тільки від стикання двох металів, а й на межах метал – електроліт і електроліт – електроліт.

Якщо металевий електрод занурено в розчин, то негативні іони електроліту, підходячи до поверхні металу, вкриватимуть позитивні іони з кристалічних ґрат. Водночас відбуватиметься й зворотний процес – осідання іонів металу на електроді. Найсприятливішим для зворотного процесу буде випадок, коли катіони електроліту є іонами того самого металу, наприклад мідний електрод у розчині CuSO_4 .

Внаслідок переходу іонів металу в розчин метал заряджається негативно, а розчин – позитивно, тобто виникає електричне поле, яке напрямлене від розчину до металу і перешкоджає дальшому розчиненню металу. Якщо спочатку мав перевагу зворотний процес – осадження іонів з розчину на електрод, то останній зарядиться позитивно.

В обох випадках різниця потенціалів, яка встановилася між металом і розчином, зрівнює швидкості розчинення і кристалізації електрода; цю різницю потенціалів називають *електролітичним потенціалом* певного металу в певному розчині.

Якщо в той самий розчин занурити два електроди з різних металів, то між електродами встановиться різниця потенціалів, яка дорівнює різниці їх електролітичних потенціалів.

Отже, енергія хімічної взаємодії металу з електролітом перетворюється в енергію електричного поля.

Пристрої, які застосовують для безпосереднього перетворення енергії хімічної реакції в електричну енергію, називають *гальванічними елементами*.

§ 127. Гальванічні елементи

В основу будови гальванічного елемента покладено явище взаємодії металу з електролітом, що веде до виникнення в замкненому колі електричного струму. Це явище було відкрито в кінці XVIII ст. італійським ученим Л. Гальвані, на честь якого нові джерела струму назвали *гальванічними елементами*. Гальванічні елементи в основному складаються з двох хімічно різних електродів, опущених у той чи інший електроліт.

Італійський фізик А. Вольта, зануривши мідну і цинкову пластинки в розчин сірчаної кислоти, вперше дістав гальванічний елемент (елемент Вольти, рис. 13.2). ЕРС елемента Вольти наближено дорівнює 1,1 В. ЕРС гальванічного елемента не залежить ні від розміру пластин, ні від кількості електроліту, а визначається лише різницею електролітичних потенціалів. У процесі роботи елемента Вольти на його позитивному полюсі виділяється водень, а на негативному – розчиняється цинк.

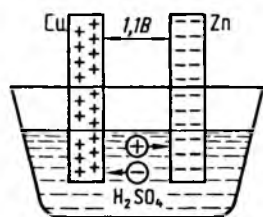


Рис. 13. 2

На практиці частіше застосовують інші елементи, які мають інший, ніж в елементі Вольти, набір електродів і електроліту. Наприклад, в *елементі Данієля*, ЕРС якого 1,09 В, позитивним електродом є мідь, занурена в сульфат міді (мідний купорос), а негативним – цинк, занурений у цинковий купорос або сірчану кислоту.

ЕРС більшості гальванічних елементів від їх тривалого використання зменшується, і вони перестають давати струм, швидше це відбувається в елементі Вольти. Причина цього – поляризація електродів.

§ 128. Поляризація елементів і її усунення

В елементі Вольти під час його роботи є істотний недолік. Він полягає в тому, що атоми водню, які виділяються на мідному електроді, відразу після початку роботи елемента вкривають електрод і перешко-

джають доступу нових іонів водню. Внаслідок цього змінюється електролітичний потенціал електродів, а отже, і їх різниця. Це явище називають *поляризацією електродів*. Поляризація електродів ніби створює проти ЕРС в елементі (ЕРС поляризації), яка зменшує силу струму в ньому. Щоб усунути поляризацію елемента, до нього вводять окислювач – речовину, яка сполучається з газом, що виділяється. Такі окислювачі називають *деполяризаторами*. Елементи з деполяризатором називають *неполяризованими*. Ці елементи працюють дуже стійко.

Побудовано дуже багато різних типів неполяризованих гальванічних елементів, але принцип їх дії той самий.

Найбільш поширений у лабораторній практиці *елемент Лекланше* (рис. 13.3). Негативним полюсом цього елемента є цинк Zn, а позитивним – графітовий стрижень C. Обидва електроди розміщені в розчині нашатиру NH_4Cl , деполяризатором є перекис марганцю MnO_2 , що міститься в мішечку F, у який вставлено графітовий стрижень. У процесі роботи елемента в ньому відбувається хімічна реакція. Продуктами реакції є хлористий цинк ZnCl_2 , аміак NH_3 і водень H_2 . Останній взаємодіє з перекисом марганцю, але досить повільно, тому від тривалої роботи елемент усе-таки поляризується. ЕРС елемента Лекланше 1,5 В.

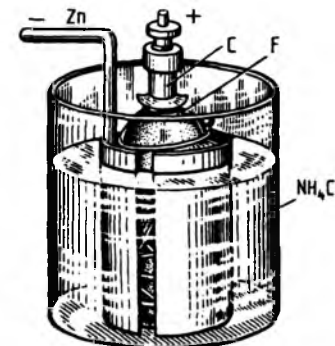


Рис. 13. 3

§ 129. Акумулятори

Акумулятори

Гальванічні елементи можуть працювати доти, поки повністю буде витрачена запасена в них хімічна енергія (наприклад, розчиниться цинк в елементі Лекланше). Іноді користуються такими гальванічними елементами, в яких потрібна для їх дії хімічна енергія поновлюється за допомогою електроліту. Такі елементи називають *акумуляторами*, а процес нагромадження в них енергії (акумулявання енергії) за допомогою електролізу – *зарядженням акумулятора*. Для зарядження акумуляторів через них пропускають струм від якого-небудь стороннього джерела в напрямі, протилежному струму, який вони дають.

У техніці використовують акумулятори двох типів. *Кислотні акумулятори* складаються із свинцевих пластин, опущених у розчин сірчаної

кислоти. Негативні пластини виготовляють із чистого свинцю з дуже розпушеною поверхнею (губчастий свинець); позитивні пластини вкриті перекисом свинцю. У процесі розрядження акумулятора обидві пластини поступово вкриваються сірчано-кислим свинцем. У процесі зарядження акумулятора відмінність у складі позитивних і негативних пластин поновлюється електролізом. ЕРС кислотного акумулятора становить близько 2 В.

Лужні акумулятори складаються з пластин нікелевої сталі з карманами. У кармани закладають оксид нікелю (позитивна пластина) і оксид заліза (негативна пластина). Електролітом є розчин їдкого калі. ЕРС лужного акумулятора становить близько 1,4 В. Лужні акумулятори зручніші і легші від кислотних, не виділяють шкідливих парів і газів, не псуються від короткого замикання.

ККД

Коефіцієнтом корисної дії акумулятора називають кількість, що показує, яку частину енергії, затраченої при зарядженні, він віддає при розрядженні. ККД кислотного акумулятора порядку 80 %, лужного – 60 %.

Ємність

Кожний акумулятор характеризується ємністю. Ємність акумулятора вимірюється величиною заряду, який може дати заряджений акумулятор у процесі розрядження.

Ємність акумулятора виражають не в кулонах, а в особливих одиницях, які називають *ампер-годинами*.

Ампер-година – це електричний заряд, який переноситься струмом силою в 1 А протягом 1 год; $1 \text{ А} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Кл}$.

Застосування акумуляторів у техніці

Акумулятори – необхідний прилад автомобілів, літаків, поїздів з електричним освітленням, підводних човнів тощо.

Гальванічні елементи широко використовують у малогабаритних радіоприймачах і телевізорах, телефонії, телеграфії.

Величезна кількість автомобілів у всьому світі безперервно отруює атмосферне повітря оксидами вуглецю і азоту, вуглеводнями та іншими шкідливими домішками. Тепер дедалі більше будують електромобілі, що працюють на акумуляторах, які в майбутньому замінять автомобілі.

Короткі висновки

- У процесі розчинення електроліту під впливом електричного поля відбувається дисоціація молекул електроліту на позитивно і негативно заряджені іони (електролітична дисоціація). Електропровідність електролітів зумовлена іонами.
- Проходження електричного струму через електроліт супроводиться виділенням на електродах речовин, що входять до складу електроліту. Маса речовини, яка виділяється при електролізі за час t ,

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} Q,$$

де $Q = It$.

- Значення заряду електрона, визначеного на основі законів електролізу, збігається із значенням заряду, визначеним іншими способами.
- Явище електролізу широко використовують у техніці і промисловості. Електричний спосіб покриття предметів неокислюваними металами називають гальваностегією. Електричне осадження металу на поверхні предмета для відтворення форм називають гальванопластикою.
- Перетворення хімічної енергії в електричну використовується в гальванічних елементах, акумуляторах, які широко застосовують у техніці.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що називають електролітичною дисоціацією? 2. Що таке електроліз?
 3. Як формулюють перший закон Фарадея? другий закон Фарадея?
 4. Що таке гальваностегія? Для чого її застосовують? 5. Що таке гальванопластика? Де її застосовують? 6. Що називають гальванічним елементом? 7. У чому полягає поляризація елементів і як її усувають?
 8. Що таке ємність акумулятора? Якими одиницями її вимірюють? 9. Де застосовують акумулятори?
-

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Під час електролізу розчину HCl на аноді виділилось 35 г хлору, знайти масу водню, який виділився на катоді за цей самий час.

Дано: $m_{\text{Cl}} = 0,035 \text{ кг}$; $k_{\text{Cl}} = 0,0367 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$; $k_{\text{H}} = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$.

Знайти: m_{H} .

Розв'язання. Запишемо, користуючись першим законом Фарадея (13.5), вирази для мас обох речовин, які виділилися на електродах:

$$m_{\text{H}} = k_{\text{H}} Q, \quad m_{\text{Cl}} = k_{\text{Cl}} Q,$$

де k_{H} , k_{Cl} – електричні еквіваленти водню і хлору; Q – заряд. Звідси видно, що $m_{\text{H}} / k_{\text{H}} = m_{\text{Cl}} / k_{\text{Cl}}$ і

$$m_{\text{H}} = \frac{k_{\text{H}} m_{\text{Cl}}}{k_{\text{Cl}}}$$

Обчислення:

$$m_{\text{H}} = \frac{0,01 \cdot 10^{-6} \text{ кг / Кл} \cdot 0,035 \text{ кг}}{0,037 \cdot 10^{-6} \text{ кг / Кл}} = 0,001 \text{ кг.}$$

Задача 2. Який час триватиме нікелювання одного боку пластини при густині струму 40 А/м^2 , коли треба, щоб товщина покриття дорівнювала 20 мкм ?

Дано: $j = 40 \text{ А/м}^2$; $d = 20 \text{ мкм} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $k = 0,304 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$; $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Знайти: t .

Розв'язання. Згідно з (13.5), маса нікелю, що виділилася з одного боку пластини, пропорційна силі струму I і часу t нікелювання:

$$m = kIt. \quad (1)$$

Силу струму, що проходить через електроліт, визначимо через густину струму:

$$I = jS. \quad (2)$$

Масу нікелю можна визначити, знаючи густину ρ і об'єм V нікелю, що відклався на пластині:

$$m = \rho V, \quad (3)$$

де $V = Sd$. Підставимо рівняння (2) і (3) в рівняння (1):

$$\rho Sd = k j S t. \quad (4)$$

З рівняння (4) визначимо час нікелювання:

$$t = \rho d / (kj).$$

Обчислення:

$$t = \frac{8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{0,304 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл} \cdot 40 \text{ А/м}^2} = 14,8 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 4,1 \text{ год.}$$

Задачі для самостійного розв'язування

- Скільки срібла виділиться на катоді, якщо через розчин азотно-срібної солі пройде заряд 1000 Кл ?
- Мідний анод, розміри якого $600 \times 120 \times 10 \text{ мм}$, був витрачений під час електролізу розчину мідного купоросу за 270 год . Визначити силу струму, що проходить через електролітичну ванну.
- За 3 год нікелювання чайника на ньому виділився шар нікелю завтовшки 300 мкм . Визначить густину струму при нікелюванні.
- В електролітичній ванні міститься розчин азотно-кислого срібла. Через електроліт проходить струм 1 мА . За який час на катоді виділяється $6,3 \cdot 10^{15}$ атомів срібла?

ГЛАВА 14

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ГАЗАХ І ВАКУУМІ

§ 130. Несамостійний і самостійний газові розряди

Іонізація газу

Гази за нормальних умов (коли немає іонізатора) є ізоляторами і стають провідниками електричного струму тільки від зовнішньої дії. Електропровідність газу можна змінити, опромінюючи його ультрафіолетовими, рентгенівськими або радіоактивними променями, нагріваючи його тощо.

За нормальних умов гази на відміну від металів і електролітів не містять вільних носіїв струму, тобто електронів та іонів, бо вони складаються з електрично нейтральних атомів і молекул. Внаслідок зовнішніх дій газ іонізується, тобто від атомів і молекул відриваються електрони. Внаслідок іонізації виникають позитивні іони й електрони. Який-небудь нейтральний атом або молекула газу може приєднати до себе електрон, тоді виникнуть і негативні іони. Під час іонізації атома або молекули газу має бути виконана робота іонізації, яка визначається силою взаємодії між електроном, який відривається, та іоном, який при цьому утворюється. Значення цієї роботи залежить від хімічної природи газу. Якщо атом або молекула втратить два електрони, то вони стають двократно іонізованими і перетворюються в двовалентний іон.

Поряд з процесом іонізації в газі відбувається процес рекомбінації – перетворення іонів у нейтральні атоми або молекули. Якщо зовнішній іонізатор припиняє дію, то провідність газу зменшується і газ уже не буде провідником. Якщо потужність іонізатора з часом не змінюється, то між процесами іонізації і рекомбінації встановлюється динамічна рівновага, за якої кількість пар заряджених частинок, які утворюються, дорівнює в середньому кількості пар іонів, які зникають внаслідок рекомбінації.

Несамостійний розряд

Процес проходження струму через газ називають газовим розрядом. Струм у газі, який виникає під дією зовнішнього іонізатора, називається несамостійним газовим розрядом. З'ясуємо закономірності цього процесу. Припустимо, що на повітряний проміжок між обкладками конденсатора (рис. 14.1, а) діє ультрафіолетове випромінювання. Якщо за допомогою потенціометра плавно збільшувати напругу між обкладками

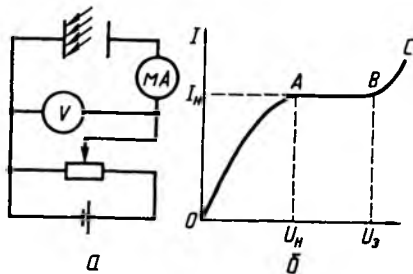


Рис. 14.1

обкладками конденсатора дорівнює нулю, струм також дорівнює нулю (точка 0 на рис. 14.1, б), бо утворені носії струму рухаються хаотично. Із збільшенням напруги між обкладками конденсатора в напрямлений рух утягується дедалі більша кількість іонів і електронів. Вони досягають обкладок конденсатора, сила струму збільшується. Якщо напруга досягне U_n , при якій всі утворені в зазорі заряди придуть до обкладок конденсатора, сила струму матиме максимальне за даної інтенсивності іонізації значення. Збільшення напруги (до значення U_3) не може змінити сили струму. Якщо іонізатор припинить дію, то припиниться й розряд, бо інших джерел іонів немає. Тому розряд називають *несамостійним*.

Самостійний розряд

Якщо напругу підвищувати й далі (від U_3 і вище), сила струму різко зростає. Якщо дію зовнішнього іонізатора припинити, то такий розряд триватиме. Це свідчить про те, що іони, потрібні для підтримання електропровідності газу, тепер створюються самим розрядом. *Газовий розряд, який триває після припинення дії зовнішнього іонізатора, називають самостійним газовим розрядом.*

Напругу U_3 , при якій виникає самостійний розряд, називають *напругою запалювання газового розряду, або напругою пробою.*

Самостійний газовий розряд підтримується завдяки ударній іонізації електронами, які прискорюються електричним полем. Електрони під дією поля E рухаються прискорено, їх кінетична енергія зростає внаслідок роботи сил електричного поля:

$$\frac{mv^2}{2} = eE\langle\lambda\rangle. \quad (14.1)$$

Тут v – швидкість електрона, $\langle\lambda\rangle$ – довжина його вільного пробігу, тобто шлях, який проходить електрон між двома послідовними співударями.

Якщо кінетична енергія електрона дорівнює енергії іонізації атома або перевищує її, то від їх співударяння атом може іонізуватися. Внаслідок іонізації виникають ще один електрон і позитивний іон. Це відбудеться при $E_i \gg \frac{U_3}{\langle\lambda\rangle}$.

Перший електрон під час співударяння втрачає енергію, витрачаючи її на іонізацію атома. Але при достатній напруженості електричного поля обидва електрони – перший і той, що утворився, – знову на довжині вільного пробігу набувають енергії, потрібної для іонізації іонів. Під час наступного співударяння іонізуються вже два атоми і кількість електронів зростає до чотирьох, після третьої іонізації електронів буде вже вісім, після четвертої – шістнадцять (рис. 14.2): утворюються *електронні та іонні “лавини”* (позитивних іонів, які утворюються при ударній іонізації, на рисунку не показано).

Щоб розряд був самостійним, утворення тільки електронних та іонних лавин є необхідною, але не достатньою умовою. Потрібно також, щоб при вимкненому зовнішньому іонізаторі в газі відтворювались нові електрони замість тих, які перейшли на анод. Ці електрони вириваються з катода, якщо його бомбардувати фотонами і позитивними іонами, які рухаються до катода під дією електричного поля. Співударяючись з катодом, іон може вибити з його поверхні електрони. *Явище вибивання електрона з поверхні катода назвали вторинною електронною емісією.* Кількість електронів, які вибиває з поверхні катода один іон, залежить від енергії іона і матеріалу катода. Тільки одночасна дія цих двох процесів (утворення електронних та іонних лавин і вторинна електронна емісія) спричинює самостійний розряд. У цьому разі пробивається газовий проміжок і запалюється самостійний газовий розряд.

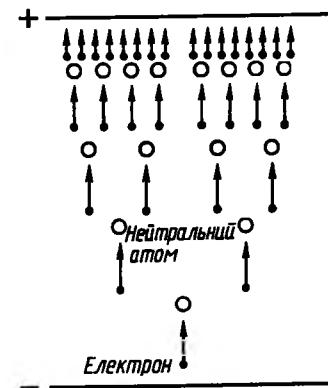


Рис. 14.2

§ 131. Типи самостійних розрядів

Коронний розряд

Залежно від тиску газу, напруги, прикладеної до електродів, форми і характеру розміщення електродів розрізняють кілька типів самостійних газових розрядів.

Якщо при атмосферному тиску створити неоднорідне електричне поле за допомогою електродів, один з яких плоский, а другий є вістрям, то

напруженість електричного поля навколо кожного з них буде різною. На вістрі густина заряду максимальна, тому при підвищенні напруги напруженість поля досягає тут значення E_i раніше, ніж біля плоского електрода. Тому поблизу вістря буде неповний пробій газу: утворюються електронні та іонні лавини і газовий проміжок починає світитись. Свічення газового проміжку поблизу вістря нагадує корону, тому цей тип газового розряду називають *коронним*.

У природі коронний розряд може виникнути під впливом атмосферного електричного поля на верхівках дерев, корабельних щогл та на інших вістрях. У далекі часи таке природне свічення називали *вогнями святого Ельма*; воно викликало забобонний жах у людей.

Коронний розряд можна спостерігати навколо проводів високовольтної лінії передавання електроенергії. У техніці коронний розряд використовують в електрофільтрах, призначених для очищення промислових газів від твердих і рідких домішок.

Китичний та іскровий розряди

Якщо напруга збільшується, то на місці корони утворюються потужні електронні лавини, з'являються окремі світні вітки і коронний розряд переходить у *китичний*. Якщо напругу збільшувати й далі, то вітки китичного розряду збільшуються, стають дедалі довгими і тоді, коли одна з них досягне другого електрода, відбудеться пробій газового проміжку, виникає *іскра*. Іскровий розряд має переривчастий характер, бо після пробою напруга на електродах значно спадає, через те що проміжок між електродами коротко замикається. Іскра зникає, напруга знову зростає, і процес пробою повторюється.

Явище *блискавки*, яку ми спостерігаємо в природі, – це величезна електрична іскра природного іскрового розряду. Ще М. В. Ломоносов встановив, що біля поверхні Землі існує електричне поле, яке дуже збільшується перед початком грози. Причиною збільшення електричного атмосферного поля під час грози є електричні заряди, розміщені на хмарах. Звичайно нижня частина хмари, повернута до Землі, має негативні, а верхня частина – позитивні заряди. Блискавка виникає або між двома хмарами, або між хмарою і Землею. Окремі розряди блискавок тривають кілька мікросекунд, при цьому сила струму в блискавці досягає 500 000 А, напруга перед виникненням блискавки становить $10^8 - 10^9$ В. Блискавка супроводиться значним нагріванням повітря, виникає ударна звукова хвиля – *грим*.

Для захисту різних будівель від блискавок застосовують *гromовідводи* (*блискавковідводи*). Громовідводи – це загострені металеві спиці, закріплені на будівлях і з'єднані з землею. Дія громовідводів ґрунтується на стіканні зарядів з вістря.

Електрична дуга

Якщо в колі є потужне джерело струму, то іскру можна перетворити в електричну дугу. Вперше електричну дугу добув професор фізики Петербурзької медико-хірургічної академії В. В. Петров у 1802 р. Він узяв дві деревні вуглини, приєднав їх до потужної батареї гальванічних елементів, з'єднав їх між собою, а потім почав розсувати. У місці стикання вуглин виникав великий опір, оскільки не було ідеального контакту. Під час проходження струму в місці контакту кінці вуглин розжарювались, тоді як самі вуглини не нагрівались, бо теплопровідність вугілля мала. Коли стрижні розсували, відбувалась термічна іонізація газового проміжку, яка супроводилась термодинамічною емісією з розігрітого катода. Найгарячішим місцем дуги була заглибина (кратер дуги), яка утворюється на позитивному електроді внаслідок бомбардування його електронами. Температура кратера при нормальному атмосферному тиску досягає 4000 °С.

Дуговий розряд виникає тоді, коли внаслідок нагрівання катода основною причиною іонізації газу є *термоелектронна емісія* – випромінювання електронів дуже нагрітими тілами. Електроди при дуговому розряді можуть бути і металевими. Дугові розряди застосовують для зварювання і різання металів, в електропечах, у прожекторах, проєкційних і кіноапаратах і як потужне джерело світла.

Жевріючий розряд

Якщо із скляної трубки викачати повітря і до розміщених усередині неї електродів прикласти постійну напругу в кілька сотень вольт, то виникає газовий розряд при зниженому тиску, який назвали *жевріючим*.

Якщо газ розріджувати, то відстань між сусідніми атомами збільшуватиметься, а отже, збільшуватиметься і довжина вільного пробігу електрона (та іона). Внаслідок цього електрони можуть набути енергії, потрібної для ударної іонізації при меншій напруженості поля між електродами.

Якщо, не змінюючи напруги, поступово змінювати в трубці тиск, то спочатку виникає китичний розряд, потім – тонкий звивистий світний канал, який з'єднує електроди, а при тиску порядку 1–15 Па розряд набуває вигляду, зображеного на рис. 14.3. До катода *К* прилягає тонкий світний шар *1* (його називають *катодною плівкою*), за яким розміщений катодний темний простір *2*, потім – світний шар *3* (*тліюче світіння*) і другий темний простір *4*, який називають *фарадесвим темним простором*. За другим темним простором розміщена світна область *5*, яку називають *позитивним стовпом*.

Таке характерне світіння газу при жевріючому розряді пов'язане з розподілом потенціалу в розрядній трубці. Світіння позитивного стовпа ви-

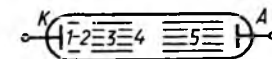


Рис. 14.3

значається випромінюванням збуджених атомів, тому має характерний колір. Це використовують у світлових рекламах. Якщо трубку наповнити неонам, то виникає оранжево-червоне світіння, а якщо аргоном – синювато-зеленувате.

При певному режимі жевріючого розряду матеріал катода розпилюється; це використовують для металізації поверхонь, виготовлення малих дзеркал і напівпрозорих пластин.

§ 132. Поняття про плазму

Поняття про плазму

Уперше фізику плазми почали досліджувати в 20-х роках ХХ ст. Під плазмою розуміють дуже іонізований газ, в якому концентрація електронів приблизно дорівнює концентрації позитивних іонів. Чим вища температура газу, тим більше іонів і електронів у плазмі, тим менше залишається в ній нейтральних молекул. Таку плазму називають *електронно-іонною*. Газ може іонізуватися також через взаємодію з електромагнітним випромінюванням або бомбардуванням газу зарядженими частинками. Оскільки в плазмі концентрація електронів дорівнює концентрації іонів, в цілому її можна вважати електрично нейтральною, а об'ємний заряд у ній таким, що дорівнює нулю.

Властивості плазми

Плазма має ряд специфічних властивостей, які відрізняють її від нейтральних газів. Ці відмінності дають можливість розглядати плазму як особливий, *четвертий, стан речовини*.

Взаємодія частинок плазми між собою характеризується кулонівськими силами притягання і відштовхування, які спадають з відстанню значно повільніше, ніж сили взаємодії між молекулами нейтрального газу, які є короткодійними.

Частинки плазми, особливо електрони, легко переміщуються під дією електричного поля. Електричні і магнітні поля діють на плазму, внаслідок чого в ній утворюються об'ємні заряди і струми.

За характером електропровідності плазма наближається до металів (у металах об'ємний заряд також дорівнює нулю), тобто має дуже добру електропровідність. На відміну від металів провідність плазми зростає з підвищенням температури. Плазма має і добру теплопровідність. Внаслідок

до цього плазма легко віддає теплоту: електрони та іони швидко віддають теплоту стінкам посудини, температура плазми знижується, відбувається рекомбінація.

Для свого існування плазма потребує безперервного підведення енергії ззовні.

Щоб плазма не стикалась із стінками установки і не віддавала їм теплоту, треба ізолювати її від стінок установки.

Якщо плазму помістити в магнітне поле, то характер руху електронів та іонів зміниться, вони почнуть рухатись по траєкторії, яка має вигляд гвинтової лінії. Цю гвинтову лінію ніби нанизано на силову лінію магнітного поля, при цьому електрони рухаються в одному, а позитивні іони – в протилежному напрямі. Якби можна було створити таке магнітне поле, силові лінії якого оточували б плазму з усіх боків (магнітна пастка), то було б розв'язане питання про термоізоляцію плазми. Насправді ця проблема значно складніша. З її розв'язанням пов'язане питання керування термоядерним синтезом (КТС).

Практичне застосування плазми

В Інституті атомної енергії ім. І. В. Курчатова було створено установки “Токамак”, на яких у 1969 р. отримано перші ознаки термоядерної реакції. Завдання керованого термоядерного синтезу не розв'язане й досі. Його завершення дасть людству практично невичерпне джерело енергії.

Іншою перспективою використання плазми – до чого техніка підійшла ближче – є безпосереднє перетворення теплової енергії газу в електричну без проміжних машин і агрегатів за допомогою *магнітогідродинамічного перетворювача енергії* (скорочено МГД). Принцип дії МГД-перетворювача такий: струмина високотемпературної плазми, потрапляючи в потужне магнітне поле, напрямлене перпендикулярно до площини рисунка (рис. 14.4), поділяється на два компоненти: позитивні та негативні частинки, які прямують до різних пластин, створюючи певну різницю потенціалів.

Газорозрядну плазму використовують у лазерах – квантових джерелах світла. Плазмотрони (плазмові генератори) широко застосовують у різних галузях техніки. За їх допомогою ріжуть і зварюють метали, наносять покриття.

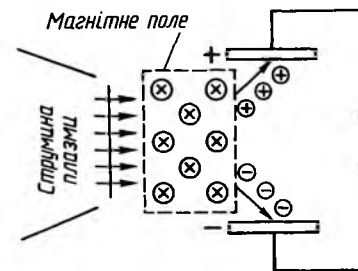


Рис. 14.4

Плазма – найбільш поширений у Всесвіті стан речовини.

Усі зорі, у тому числі й Сонце, зоряні атмосфери, галактичні туманності і міжзоряне середовище – це четвертий стан речовини – плазма. З плазми складаються не тільки зорі, наша Земля оточена плазмовою оболонкою – іоносферою, за межами якої є радіаційні пояси, що оперізують Землю, в яких також є плазма. Процесами в навколосемній плазмі зумовлені магнітні бурі та полярні сяйва. Відбивання радіохвиль від іоносферної плазми забезпечує можливість далекого радіозв'язку на Землі.

Фізика плазми важлива і для розуміння багатьох процесів, які відбуваються в космосі, бо в усьому просторі нашої Сонячної системи існують “плазмові вітри”, інтенсивність їх іноді така велика, що створює певну загрозу для космонавтів.

Фізика плазми є тепер галуззю науки, результати дослідження якої мають велике технічне застосування.

§ 133. Електричний струм у вакуумі

Вакуум

Під вакуумом розуміють такий ступінь розрідження газу в посудині, за якого довжина вільного пробігу молекули стає більшою за лінійні розміри посудини і співударями між молекулами газу можна знехтувати. При такому ступені розрідження самостійний газовий розряд відбуватися не може. Щоб у вакуумній трубці, яка має два електроди – катод і анод, – проходив електричний струм, треба яким-небудь способом внести туди заряджені частинки.

Термоелектронна емісія

Є кілька способів надання електронам додаткової енергії, потрібної для видалення їх з металу: нагрівання, опромінення видимим або ультрафіолетовим світлом, дія потужного зовнішнього поля, бомбардування металів частинками. Дія цих факторів може спричинювати явище електронної емісії.

Термоелектронною емісією називають явище випромінювання електронів нагрітими металами. Електрони, які випромінюють нагріті метали, називають термоелектронами. У процесі нагрівання металу швидкість теплового руху вільних електронів зростає пропорційно \sqrt{T} . При такій високій температурі розжарення швидкість окремих електронів настільки збільшується, що вони вилітають за межі металу. Підтвердженням цього може бути такий дослід.

Складемо коло, схему якого зображено на рис. 14.5, а. Джерело струму (батарея акумуляторів) приєднано з одного боку до скляного балона-лампочки, обклеєної станионом, з другого боку – через гальванометр і цоколь лампочки – до металевої нитки розжарювання. У скляному балоні створено вакуум. Якщо на нитку розжарення не подавати напруги (ключ K розімкнений), то струму в колі не буде. Якщо, замкнувши ключ K , розжарити нитку лампочки, гальванометр покаже, що в колі проходить електричний струм. Це відбувається тому, що з розжареної нитки відриваються термоелектрони і утворений потік електронів замикає коло. Вперше це явище спостерігав Т. Едісон (1883), тому його назвали ефектом Едісона.

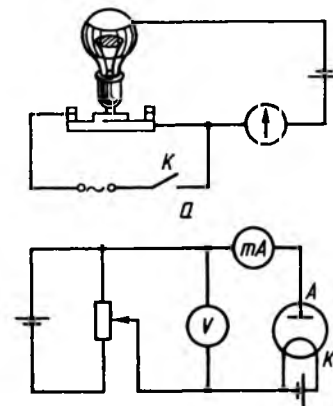


Рис. 14.5

Електронні лампи

У колі, зображеному на рис. 14.5, б, якщо катод холодний, струму не буде, бо електропровідність вакууму практично дорівнює нулю. Якщо за допомогою додаткового джерела струму нагріти катод, то внаслідок термоелектронної емісії катод почне випромінювати електрони, міліамперметр зареєструє струм у колі. Сила струму залежить від різниці потенціалів між катодом і анодом, а правильніше, від потенціалу U_a анода відносно катода.

Такі пристрої широко застосовують у радіотехніці, їх називають електронними лампами.

Діод

За конструктивним виконанням електронні лампи поділяють на діоди (двоелектродна електронна лампа, рис. 14.6, а, б), триоди (триелектродна лампа, рис. 14.6, в), тетроди, пентоди і т. д. Залежно від того, як нагрівається катод, розрізняють лампи прямого (рис. 14.6, а) і посереднього (рис. 14.6, б) розжарення. Анод найчастіше має форму циліндра, по осі якого встановлюють катод, виготовлений з тугоплавкого металу, наприклад вольфраму, молібдену тощо. Сила струму в лампі залежить від анодної напруги U_a , температури нитки розжарення (катода), матеріалу катода і геометрії електродів.

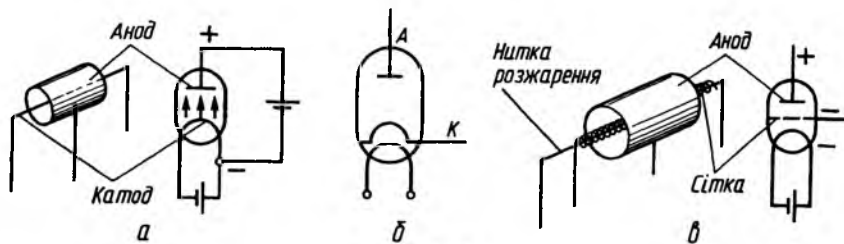


Рис. 14.6

Залежність анодного струму від анодної напруги (рис. 14.7) називають *вольт-амперною характеристикою*. Як видно з рис. 14.7, вольт-амперна характеристика діода має нелінійний характер. Такий характер можна пояснити тим, що поблизу розжареного катода існує електронна хмара – просторовий заряд. При невеликих анодних напругах із збільшенням U_a сила струму збільшується повільно, а електронна хмара, яка має негативний заряд, перешкоджає руху електронів, які вилітають з катода, і під дією сил відштовхування частина електронів знову повертається на катод, а решта досягає анода. Із збільшенням анодної напруги густина електронної хмари зменшується, сила струму збільшується. При певному значенні напруги $U_a = U_n$ всі електрони, які вилітають з катода, досягають анода, струм досягає максимального значення і далі збільшення напруги сили струму змінити не може. Це значення сили струму називають *струмом насичення* I_n . Якщо підвищити температуру T катода, то це призведе до того, що електронна хмара біля катода стане густішою; отже, струм досягне максимального значення при більшій анодній напрузі, а струм насичення збільшиться (рис. 14.7). Якщо потенціал анода менший від потенціалу катода, то струму в колі лампи не буде; отже, діоди мають односторонню провідність.

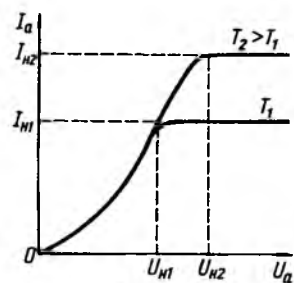


Рис. 14.7

Ця властивість дає можливість застосовувати їх як випрямлячі змінного струму (кенотрони).

Тріод

Щоб керувати силою струму в електронній лампі, в неї вводять один, два або кілька додаткових електродів, які називають *сітками* (рис. 14.6, в). Звичайно сітки виготовляють у вигляді дротяних спіралей і розміщують між анодом і катодом.

Розглянемо роботу тріода. Сітку в тріоді звичайно встановлюють поблизу катода так, щоб найменші зміни потенціалу сітки впливали на зміни анодного струму. Якщо потенціал сітки відносно катода дорівнює нулю, то тріод працює як діод. Якщо потенціал сітки позитивний, то густина електронної хмари менша, отже, струм більший. Якщо потенціал сітки негативний, то густина електронної хмари біля катода збільшується, а струм зменшується. Від збільшення негативного потенціалу сітки струм зменшуватиметься і при деякому значенні негативного потенціалу дорівнюватиме нулю, називають *напругою запирання*. Напруга запирання залежить від анодної напруги. Чим більше U_a , тим більша напруга запирання. Отже, змінюючи сіткову напругу, можна регулювати значення анодного струму в колі, тому сітку називають *керуючою*.

Електронні лампи застосовують у різних радіотехнічних пристроях – підсилювачах, генераторах тощо.

§ 134. Електронні пучки.

Електронно-променева трубка

Електронні пучки

Під електронними пучками розуміють напрямлені потоки електронів, поперечні розміри яких значно менші від їх довжини. Електронні пучки вперше були виявлені в газовому розряді, що відбувається при зниженому тиску.

При жевріючому розряді позитивні іони вибивають з катода безліч електронів. Якщо розряд відбувається в трубці з дуже великим розрідженням, то середня довжина вільного пробігу електронів збільшується і катодний темний простір розширюється. Електрони, вибиті з катода позитивними іонами, рухаються майже без зіткнень і утворюють *катодне проміння*. Це проміння поширюється нормально до поверхні катода. Якщо в аноді електронної лампи зробити отвір, то частина електронів, прискорених електричним полем, пролетить в отвір, утворюючи за анодом електронний пучок.

Властивості і застосування електронних пучків

Електронні пучки спричинюють світіння (флуоресценцію) деяких речовин. До них належать скло, сульфід цинку, кадмію тощо. Такі речовини називають *люмінофорами*. Цю властивість електронних

пучків застосовують у вакуумній електроніці – світіння екранів телевізорів, осцилографів, електронно-оптичних перетворювачів тощо.

Потрапляючи на тіла, електронні пучки нагрівають їх. Цю властивість використовують для зварювання надчистих металів у вакуумі. Електронні пучки відхиляються в електричному і магнітному полях. Можливість керування електронним пучком за допомогою електричного і магнітного полів і світіння екранів, покритих люмінофором під дією електронних пучків, використовують в електронно-променевих трубках.

Електронно-променева трубка

Будову електронно-променевої трубки зображено на рис. 14.8. Це скляний вакуумний балон Z , в якому встановлено “електронну гармату”, що складається з розжареного катода K , який імітує електрони, і анода з діафрагмою (найчастіше кількох анодів, розміщених один за одним) D_1 , D_2 . Між катодом і анодом створюють різницю потенціалів U , яка дає можливість розігнати електрони до великої швидкості і утворити вузький пучок. У місці екрана F , покритого флуоресціюючою сполукою, куди падає електронний пучок, виникає яскрава світна точка.

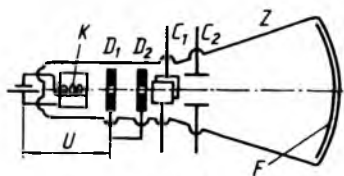


Рис. 14.8

Керують пучком за допомогою двох пар пластин C_1 і C_2 , розміщених перпендикулярно одна до одної. Поле пластин C_1 зміщує промінь у горизонтальному напрямі, поле пластин C_2 – у вертикальному.

На пластини C_1 і C_2 можна подавати або постійну, або змінну напругу. Залежно від цього світна пляма на екрані або залишатиметься на місці, або переміщуватиметься, утворюючи пряму, синусоїду тощо. На цій властивості ґрунтується будова *осцилографа*. У складніших випадках на екрані можна домогтися, щоб темні та світлі плями, які дають зображення предметів, чергувалися. Таке явище ми спостерігаємо в електронно-променевої трубіці телевізора.

Короткі висновки

- За нормальних умов газу складаються з нейтральних молекул і є діелектриками.
- Внаслідок зовнішніх дій газу іонізуються, вони стають провідниками електричного струму. Провідність газу зумовлена електронами і позитивними іонами.

- Процес проходження газу через газ називають газовим розрядом. Струм у газі, що утворився за наявності зовнішнього іонізатора, називають несамостійним газовим розрядом. Газовий розряд, який триває після припинення дії зовнішнього іонізатора, називають самостійним газовим розрядом. Іони і електрони утворюються при самостійному розряді завдяки іонізації електронним ударом, термоелектронною емісією і т. д.
- Розрізняють такі типи самостійного розряду: коронний, китичний, іскровий, електрична дуга, жевріючий.
- Під плазмою розуміють дуже іонізований газ, в якому концентрація електронів дорівнює приблизно концентрації позитивних іонів. У цілому її можна вважати електрично нейтральною, об'ємний заряд дорівнює нулю.
- Плазма має ряд специфічних властивостей.
- Плазма – найбільш поширений у Всесвіті стан речовини.
- Провідність вакууму зумовлена джерелом електронів. Як правило, для цього використовують явище термоелектронної емісії.
- Електричний струм у вакуумі використовують у різних радіотехнічних пристроях: електронних лампах, електронно-променевих трубках та ін.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Поясніть, що таке іонізація газу і рекомбінація іонів у газі. 2. Що таке газовий розряд? 3. У чому різниця між несамостійним і самостійним газовими розрядами? 4. Що таке дуговий і жевріючий розряди? 5. Що таке плазма? Які її властивості? 6. Що таке діод, яка його будова і чому він може працювати випрямлячем змінного струму? 7. Що таке електронні пучки, які їх властивості, де їх застосовують?

ГЛАВА 15

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У НАПІВПРОВІДНИКАХ

§ 135. Електронна структура твердих тіл

Напівпровідникові прилади

Бурхливий розвиток радіотехніки зобов'язаний електровакуумним приладам. Вони були невід'ємною частиною кожного радіотехнічного пристрою, і переважно їх властивостями визначалися технічні показники апаратури.

Потреби радіозв'язку, радіомовлення, радіолокації, телебачення та інших галузей радіотехніки стимулювали створення багатьох різних електровакуумних приладів, які тепер досягли високого ступеня досконалості.

Проте в період найвищого розвитку техніки і теорії електровакуумних приладів вони мають гідних конкурентів у вигляді різних напівпровідникових приладів. За порівняно короткий час ці прилади набули великого застосування в радіотехнічній апаратурі, оскільки мають ряд цінних якостей: великий строк служби, малі габарити, високу механічну міцність і незначне споживання енергії. Ці якості в сукупності забезпечують підвищення надійності роботи апаратури при одночасному скороченні витрати енергії на її живлення, маси і габаритів. До того ж у ряді випадків напівпровідникові прилади можуть виконувати функції, недоступні електронним лампам.

У 20-х роках ХХ ст. О. В. Лосєв відкрив здатність напівпровідникових діодів (кристалічних детекторів) генерувати незгасаючі коливання. Проте розвиток техніки напівпровідників був припинений, переважно через недостатні знання фізичних основ роботи напівпровідникових приладів. Внаслідок цього вони тимчасово поступилися електровакуумним приладам, фізичні основи роботи яких були добре вивчені і експериментально обґрунтовані.

У подальшому, в зв'язку з прогресивним розвитком фізики, і особливо фізики твердого тіла, було відкрито ряд важливих властивостей напівпровідників, які дали можливість значно розширити галузь використання напівпровідникових приладів і оцінити їх значення у майбутньому. Теоретичним і експериментальним дослідженням цих властивостей напівпровідників присвятили свої праці багато вчених. Найбільший вклад у цю справу внесли О. В. Лосєв, Б. І. Давидов, Д. І. Блохінцев, А. Ф. Йоффе та ін.

Будова атома

Залежно від здатності проводити електричний струм тверді тіла поділяють на провідники, напівпровідники та ізолятори. Відмінності в провідності між провідниками (металами), напівпровідниками та ізоляторами спричинені відмінністю в будові твердих тіл і електронних оболонок атомів, з яких вони складаються.

Атом будь-якого елемента складається з позитивно зарядженого ядра і електронів, які рухаються навколо ядра. Ядро складається з позитивно заряджених протонів і нейтральних нейтронів. Заряд ядра Z визначається кількістю протонів. Заряд електрона за модулем дорівнює заряду протона.

Кількість електронів, які рухаються навколо ядра атома по замкнених орбітах, дорівнює порядковому номеру Z елемента в періодичній системі Менделєєва, внаслідок чого за нормальних умов заряд атома речовини дорівнює нулю, тобто атом електрично нейтральний.

Електрони в атомі утворюють електронні оболонки з порядковими номерами $n = 1, n = 2, n = 3, \dots$. Електрони, які утворюють одну оболонку, мають ту саму енергію E_1, E_2, E_3, \dots . На кожній оболонці може бути $2n^2$ електронів. Між оболонками лежить заборонений енергетичний рівень ΔE , ширина якого визначається різницею енергій, яку може мати електрон на оболонках:

$$\Delta E = E_2 - E_1.$$

При цьому кожному елементу властиве цілком певне, характерне для нього розміщення електронів навколо ядра.

Будова напівпровідників

Розглянемо для прикладу один з типових напівпровідників – германій, порядковий номер якого 32. Чотири його електронні оболонки мають 32 електрони. На першій, найближчій до ядра оболонці, є 2, другій – 8, третій – 18 і четвертій – 4 електрони (рис. 15.1). Електрони трьох внутрішніх оболонок – “стійкі” і не беруть участі в хімічних реакціях. Електрони, розміщені на зовнішній оболонці, слабко зв'язані з ядром атома. Їх називають зовнішніми, або валентними, електронами, оскільки вони визначають валентність даного елемента – здатність його атомів входити в хімічний зв'язок з певною кількістю інших атомів. Так, валентність германію, який має на зовнішній оболонці 4 електрони, дорівнює чотирьом.

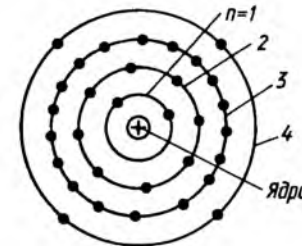


Рис. 15.1

При зближенні даного атома з іншим атомом валентні електрони внаслідок слабого зв'язку із своїм ядром легко взаємодіють з валентними електронами іншого атома, утворюючи з ним хімічний зв'язок.

Якщо оболонці надається деяка цілком певна енергія, то атом може іонізуватись. Для вивільнення електронів, розміщених у зовнішній оболонці атома, потрібна найменша енергія.

Кристалічні ґрати

Германій, кремній та багато інших представників класу напівпровідників є кристалічними речовинами; вони характеризуються певним закономірним розміщенням атомів. Атоми утворюють кристалічні ґрати, які складаються з окремих елементарних комірок.

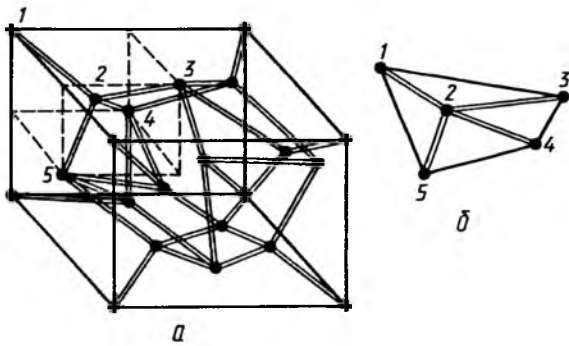


Рис. 15.2

грат (атомів 1, 3–5) і утворює з ними *ковалентні зв'язки*, відомі як найстійкіші. Ці чотири атоми розміщені у вершинах правильного тетраедра, в центрі якого лежить даний атом (рис. 15.2, б).

Місця кристалічних грат, де розміщені атоми, називають *вузлами грат*. У природі не існує абсолютно чистих кристалів, і для технічної мети їх добувають за допомогою ряду складних технологічних операцій.

§ 136. Енергетичні рівні та енергетичні зони

Енергетичні рівні та енергетичні зони

Явища, які відбуваються в провідниках, можна пояснити, користуючись законами квантової механіки. Квантова механіка описує закони руху електронів у твердому тілі та їх взаємодію з кристалічними гратами.

За законами квантової механіки, кожний електрон в атомі речовини може займати тільки певний *дозволений енергетичний рівень*. Усі інші енергетичні рівні для даного електрона неможливі, або, як їх називають, *заборонені*.

На рис. 15.3, а графічно зображено енергетичні рівні електронів одного атома германію.

Точно описати взаємодію ядер і електронів – дуже складне завдання. Кожна частинка, яка входить до складу кристала, взаємодіє з безліччю сусідніх частинок, причому всі вони перебувають у безперервному русі. Розглядаючи кристал, насамперед треба знати, як поведуться в ньому електрони. Що відбувається з енергетичними рівнями атомів у твердому тілі? Якщо зблизити два атоми на відстань, меншу за 1 нм, то електронні оболонки цих валентних електронів перекриються так, що енергетичні рівні перестануть відповідати енергетичним рівням вільного атома.

Кристалічні грати германію (а також і кремнію) подібні до грат алмазу (рис. 15.2, а). Для них характерна кубічна форма елементарної комірки, яка містить 8 атомів. Кожний атом германію, наприклад атом 2 на рис. 15.2, а, лежить на однаковій відстані від чотирьох сусідніх атомів

В процесі утворення кристала енергетичні рівні змінюються якісно, енергетичні рівні окремих атомів трохи зсуваються. Якщо енергетичні рівні електрона в ізолюваному атомі є вузькими лініями, то тепер рівень розщеплюється. Тому в кристалі кожний електрон має свій, тільки йому властивий певний рівень енергії, що не збігається з рівнем енергії, який займає електрон у вільному атомі. Внаслідок безлічі енергетичних рівнів у кристалі і малої відмінності між ними ці рівні зливаються в безперервні широкі *дозволені енергетичні зони*, відокремлені *забороненими зонами* (рис. 15.3, б).

Розщеплення рівнів властиве всім електронам атома, але значення розщеплення для різних рівнів різне, для внутрішніх оболонок воно дуже мале. Структуру зон визначають розщеплювані рівні валентних електронів.

Ширина енергетичної зони не залежить від розмірів кристала, а визначається його будовою, тобто природою атомів, які утворюють кристал.

Як було вже зазначено, найменшу енергію іонізації мають електрони зовнішньої, тобто валентної, оболонки германію, які й визначають електропровідність чистого германію. Енергетичні рівні зовнішніх валентних електронів утворюють *валентну*, або *заповнену*, *зону*. У цій зоні електрони перебувають у стійкому зв'язаному стані. Щоб вивільнити який-небудь електрон цієї зони, треба затратити деяку енергію. Отже, електрони, які перебувають у вільному стані, займають вищі енергетичні рівні. Зона вищих енергетичних рівнів, розміщена вище від валентної зони і відокремлена від неї забороненою зоною, об'єднує незаповнені, або вільні, енергетичні рівні; її називають *зоною провідності*, або *зоною збудження*.

Провідники, напівпровідники, ізолятори

Щоб перенести електрон з валентної зони в зону провідності, йому треба надати ззовні енергію. Ширина забороненої зони, яку має подолати електрон, щоб перейти із стійкого стану (із заповненої зони) у вільний стан (у зону провідності), – один з основних критеріїв поділу твердих тіл на метали, напівпровідники та ізолятори. Наочно це подано на схемі розподілу дозволених і заборонених зон для напівпровідників та ізоляторів, зображеній на рис. 15.4.

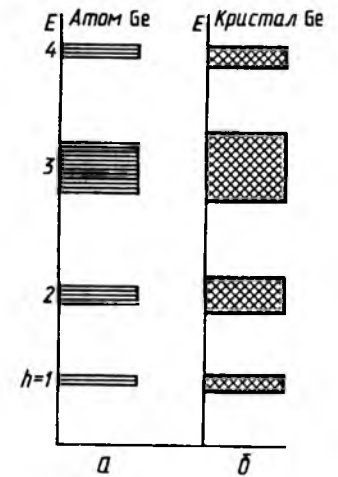


Рис. 15.3

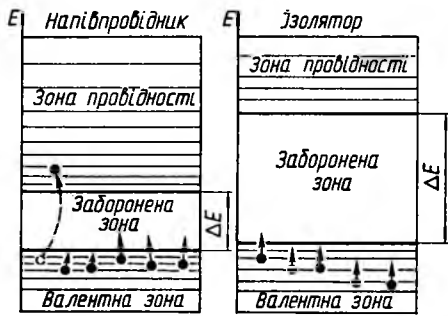


Рис. 15.4

треба подолати заборонену зону ΔE . Для цього електронам треба надати енергію, не меншу від ширини забороненої зони. Ширина забороненої зони напівпровідників становить, наприклад, 0,72 eV для германію і 1,11 eV для кремнію. Значна ширина забороненої зони ізоляторів (понад 2 eV) пояснює те, що цей клас речовин практично не має електропровідності.

§ 137. Електропровідність напівпровідників та її залежність від температури й освітленості

Власна провідність

У реальному твердому тілі, якщо вільних рівнів і зовнішнього збуджуючого поля немає, електрони можуть вільно переміщатися всередині кристалічних ґрат тіла, але такий хаотичний рух не спричинює утворення електричного струму. Це докорінно відрізняється від моделі зв'язаних електронів у діелектриках, за допомогою якої класична теорія пояснює відсутність у них провідності.

Коли електрон під зовнішньою дією переходить з валентної в зону провідності, то у валентній зоні залишається вакантне місце або *дірка* (білий кружечок на рис. 15.4).

Перехід частини електронів з валентної зони в зону провідності спричинює появу вільних рівнів у першій з них. Це дає можливість електронам валентної зони, які залишилися, також брати участь в електричному струмі, переміщуючись по найближчих вільних рівнях у межах самої зони. Для зручності міркувань говорять не про рух електронів валентної зони, а про рух валентних місць (дірок).

Рух дірок еквівалентний руху позитивно заряджених частинок з зарядом, який дорівнює заряду електрона. У хімічно чистому напівпровіднику кількість електронів, які перейшли в зону провідності, дорівнює кількості дірок, що утворилися у валентній зоні. І ті й інші беруть участь в елект-

Високу електропровідність металів пояснюють тим, що між валентною зоною і зоною провідності немає забороненої зони, а також тим, що в зоні провідності при кімнатній температурі є достатня кількість електронів.

Щоб забезпечити електропровідність напівпровідника, тобто перевести деяку кількість електронів з валентної зони в зону провідності,

ричному струмі. Проте рухливість електронів більша, ніж дірок, тому дірковий струм не дорівнює половині загального струму.

Оскільки кількість електронів дорівнює кількості дірок, то *питома провідність напівпровідника складається з електронної і діркової провідностей*. Носії електричного заряду, які утворюються при переході електронів з валентної зони в зону провідності, називаються *власними носіями*, а провідність, зумовлена ними, – *власною провідністю*.

Домішкова провідність

Електропровідність напівпровідників визначається концентрацією електронів і дірок та їх рухливістю, а введення атомів домішок спричинює створення додаткових носіїв струму і підвищує електропровідність речовини. Тому більшість напівпровідників – домішкові.

Донорні домішки

Якщо в кристалічні ґрати германію ввести атоми миш'яку, сурми або інших речовин, атоми яких мають п'ять валентних електронів, то концентрація вільних електронів у напівпровіднику різко зростає. Пояснюється це тим, що чотири валентні атоми домішки беруть участь у створенні хімічного зв'язку з атомами германію. П'ятий валентний електрон буде слабо пов'язаний з атомом домішки, тому він легко залишає атом і стає "вільним" (рис. 15.5, а).

Отже, в цьому разі домішкові атоми віддають електрони, тобто є донорами електронів, що й пояснює їх назву. Провідність, зумовлена рухом вільних електронів, називається *електронною*, або *провідністю n-типу*.

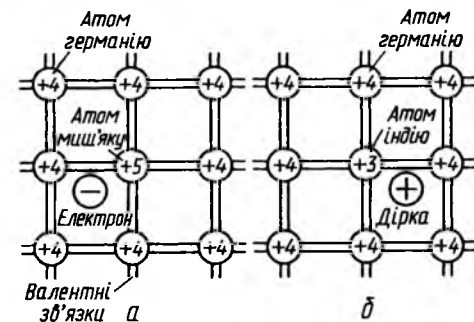


Рис. 15.5

Акцепторні домішки

Якщо в кристалічні ґрати германію ввести атоми індію, галію або інших тривалентних елементів, то характер провідності напівпровідника змінюється. Це пояснюється тим, що для утворення двоелектрон-

ного зв'язку з одним із сусідніх атомів германію в атома індію не вистачає одного електрона, тобто між цими двома атомами не заповнюється валентний зв'язок, або дірка (рис. 15.5, б). *Кількість дірок у кристалі дорівнює кількості атомів домішки.* Провідність, зумовлену рухом дірок, називають *дірковою*, або *провідністю p-типу*.

Залежність електропровідності від температури й освітленості

Отже, якщо ширина забороненої зони дорівнює нулю, то така речовина є провідником, якщо вона не перевищує 2 еВ, – напівпровідником, якщо перевищує 2 еВ, – ізолятором. Відмінність між провідниками і напівпровідниками особливо відчутна при зниженні температури, тоді як відмінність між напівпровідниками та ізоляторами із зниженням температури зникає.

Зменшення електропровідності металів з підвищенням температури пов'язане зі зменшенням рухливості електронів. Концентрація вільних електронів практично не залежить від температури.

У напівпровідників із зростанням температури рухливість електронів і дірок також спадає, але це не має важливого значення, оскільки при нагріванні германію кінетична енергія валентних електронів зростає і окремі зв'язки розриваються, що призводить до збільшення кількості вільних електронів, тобто до зростання електропровідності.

Під час освітлення напівпровідника в ньому утворюються додаткові носії, що спричинює підвищення його електропровідності. Внаслідок цього виникають такі процеси:

1. Світло вириває електрони з валентної зони і закидає їх у зону провідності, при цьому одночасно зростає кількість електронів і дірок.
2. Електрони із заповненої зони закидаються на вільні домішкові рівні – зростає кількість дірок.
3. Електрони закидаються з домішкових рівнів у зону провідності.

§ 138. Напівпровідникові прилади

Термістори

Провідність напівпровідників насамперед залежить від температури: чим вища температура напівпровідника, тим краще він проводить струм. Прилади, які ґрунтуються на цьому ефекті, називають *термоопорами*, або *термісторами*. Термістори широко застосовують у техніці,

медицині та сільському господарстві. Їх використовують для вимірювання температури в різних машинах і агрегатах, скрізь, де треба підтримувати сталу температуру і пов'язані з нею фізичні величини. За допомогою термісторів визначають температуру ґрунту на різній глибині. Чутливі термістори можна вводити безпосередньо в кровоносні судини. Чутливість цих приладів така велика, що на їх основі виготовляють приймачі промислової енергії, які називають болотрами.

Електронно-дірковий перехід (p-n-перехід)

Межа стикання двох напівпровідників, один з яких має електронну, а інший – діркову провідність, називають *електронно-дірковим переходом*, або *p-n-переходом*. Ці переходи мають велике практичне значення, оскільки вони є основою роботи багатьох напівпровідникових приладів. Практично p-n-перехід здійснюється не механічним контактом двох різних напівпровідників, а внесенням донорних і акцепторних домішок у різні частини чистого напівпровідника.

Нехай два напівпровідники з різним типом електропровідності (p і n) стикаються один з одним. При цьому розпочнеться перехід (дифузія) електронів з n-області, де їх багато, в p-область, де їх мало, і переміщення дірок у зворотному напрямі. Оскільки дірки й електрони – це заряджені частинки, то внаслідок їх дифузії виникне *контактна різниця потенціалів* між p- і n-областями (рис. 15.6, а). Електрони і дірки на межі поділу двох напівпровідників створюють *запірний шар*, поле якого перешкоджає дальшому дифузному переміщенню носіїв заряду.

Прикладемо зовнішнє електричне поле до системи двох напівпровідників (як показано на рис. 15.6, б). У цьому разі напруженість зовнішнього поля збігається за напрямом з полем запірного шару. При такому напрямі зовнішнього електричного поля електрони, рухаючись проти поля, а дірки, рухаючись уздовж поля, виходять з області поблизу контакту. При цьому запірний шар розширюється і ширина його залежить від при-

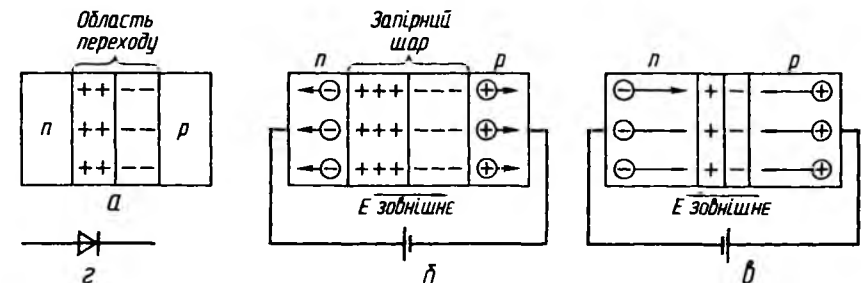


Рис. 15.6

кладеної різниці потенціалів. У запірному шарі концентрація вільних електронів і дірок мала і він поводить себе як діелектрик. Очевидно, що в цьому разі електричний струм через $p-n$ -перехід практично не проходить. Напряв зовнішнього поля, яке розширює запірний шар, називають *запірним (зворотним)*.

Якщо змінюється напряв зовнішнього електричного поля (рис. 15.6, в), то змінюється напряв руху електронів і дірок на протилежні. В області $p-n$ -переходу вони рекомбінують. При цьому ширина запірного шару і його опір зменшуються. Отже, в цьому напрямі електричний струм проходить крізь $p-n$ -перехід від p -напівпровідника до n -напівпровідника. Такий напряв струму називають *пропускним, або прямим*.

Отже,

$p-n$ -перехід має однобічну провідність.

Діод

Напівпровідник з одним $p-n$ -переходом називають *напівпровідниковим діодом*. На рис. 12.6, з зображено умовне позначення напівпровідникового діода.

Напівпровідниковий діод, як і двохелектродна електронна лампа (діод), має однобічну провідність. Напівпровідникові діоди мають значно простішу конструкцію і надійніші в роботі, ніж електронна лампа. Тепер вони майже зовсім витіснили скляні діоди в радіотехніці. Напівпровідниковий діод використовують для випрямлення змінного струму; він може працювати як детектор.

Якщо в напівпровідниковий матеріал внесено в 20–30 разів домішок більше, ніж звичайно, то дістають особливий клас діодів, які називають *тунельними*. Такі діоди застосовують як підсилювачі і генератори високої частоти.

Транзистор. Тріод

Для створення напівпровідникового тріода – транзистора – треба мати три складові частини напівпровідникового домішкового матеріалу: дві n - і одну p -типу або навпаки. Одну з можливих схем зображено на рис. 15.7, а. Для вмикання транзистора в коло використовують дві батареї. Одну вмикають плюсом на p -частину тріода, яку, називають *емітером* (E), а мінусом – на середню n -частину, яку називають *базою* (B). Іншу батарею вмикають плюсом на базу, а мінусом – на другу p -частину, яку називають *колектором* (K). При такому вмиканні дірки емітера йдуть

у базу. Наступний рух дірок з бази в колектор здійснюється за рахунок іншої батареї.

Із збільшенням напруги першої батареї зростає кількість дірок емітера, які через базу досягають колектора. Отже, напруга між базою і емітером керує струмом колектора, як і напруга між сіткою і катодом у ламповому тріоді керує анодним струмом. На рис. 15.7, б зображено умовне позначення напівпровідникового тріода.

Застосування напівпровідників здійснило революцію в радіотехніці. Радіодеталі стали такими мініатюрними, що виникла можливість виготовляти друкарським способом так звані мікромодулі. *Мікромодулі* – це тонкі пластинки, на яких надруковані діоди, тріоди, опори, індукційні котушки та інші елементи радіосхем. Використовуючи різні комбінації мікромодулів, можна виготовляти радіопристрої з наперед заданими параметрами.

Напівпровідники набувають дедалі більшого значення, збагачуючи фізику, хімію, біологію та інші науки. Використання напівпровідників ще не закінчено, і сьогодні не можна передбачити розвиток фізики напівпровідників.

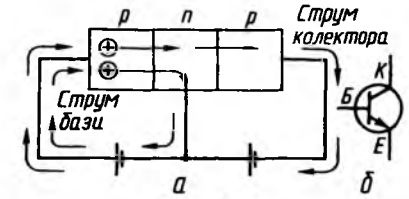


Рис. 15.7

Короткі висновки

- Відмінності в електропровідності між провідниками (металами), напівпровідниками та ізоляторами спричинені відмінностями в будові твердих тіл та електронних оболонок атомів, з яких вони складаються.
- Якщо електрон під зовнішньою дією переходить з валентної зони в зону провідності, то у валентній зоні залишається валентне місце, або дірка. Оскільки кількість електронів дорівнює кількості дірок, то питома провідність напівпровідника складається з електронної і діркової провідностей. Носії електричного заряду, який утворюється при переході електронів з валентної зони в зону провідності, називають власними носіями, а провідність, зумовлену ними, – власною провідністю.
- Якщо в кристалічні грати напівпровідника (германію) ввести атоми інших речовин, які мають п'ять валентних електронів (миш'як, сурма та ін.), концентрація вільних електронів у провіднику різко зростає. Домішкові атоми є донорами електронів. Провідність, зумовлену рухом вільних електронів, називають електронною провідністю n -типу.
- Якщо в кристалічні грати напівпровідника ввести атоми тривалентних елементів (індій, галій та ін.), то концентрація дірок зростає. Таку провідність називають дірковою, або провідністю p -типу.
- Напівпровідники найбільше відрізняються від провідників тим, що із збільшенням їх температури та освітленості електропровідність напівпровідників зростає.

- Напівпровідники широко застосовують тепер в електроніці, їх використання здійснило революцію в радіотехніці. Радіодеталі стали мініатюрними, з'явилась можливість виготовляти їх типографським способом. Вони забезпечують виняткову надійність апаратури і зумовлюють велику економію дорогих матеріалів. Дослідження напівпровідників ще триває, і сьогодні неможливо передбачити розвиток фізики напівпровідників.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. У чому відмінність провідників від напівпровідників та ізоляторів?
2. Що розуміють під власною провідністю напівпровідників? 3. Поясніть провідності p - і n -типів. 4. Як залежить електропровідність напівпровідників від температури та освітленості? 5. Поясніть будову і дію напівпровідникового діода. 6. Які переваги мають напівпровідникові діоди і тріоди порівняно з ламповими? 7. Поясніть будову і дію електронно-променевої трубки. 8. Розкажіть про перспективи розвитку напівпровідникової техніки.

Глава 16 Магнітне поле

§ 139. Магнітне поле

Магнітне поле

Початок сучасному розумінню природи магнетизму поклав датський фізик Г. Ерстед. Він уперше в 1819 р. встановив, а наступні численні досліді підтвердили той факт, що рухомі електричні заряди взаємодіють не так, як ті, що перебувають у спокої.

Дослідження, проведені російським фізиком О. О. Ейхенвальдом у 1901 р., показали, що коли заряджене тіло перебуває в спокої відносно спостерігача, то навколо цього тіла існує *електричне поле*. Якщо воно рухається відносно спостерігача, то виникає *магнітне поле*, яке відхиляє легкорухливу магнітну стрілку. Аналогічно на магнітну стрілку діє і провідник із струмом. Якщо по прямому провіднику, розміщеному по магнітному меридіану в напрямі північ – південь, пропустити струм, то розміщена під

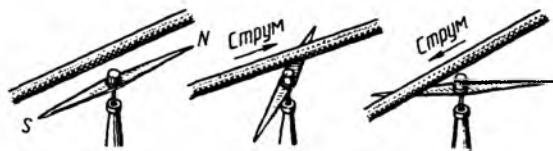


Рис. 16.1

ним магнітна стрілка відхилиться (рис. 16.1). Якщо помістити стрілку над провідником, то стрілка відхилиться у протилежний бік.

Великий внесок у розуміння природи магнетизму французького вченого А. Ампера. Він установив, що всякий електричний струм здатний взаємодіяти з іншим струмом з силою, яку не можна пояснити кулонівською взаємодією.

Згідно з *теорією близькодії*, нерухомі електричні заряди взаємодіють через електричне поле. Провідники із струмом електрично нейтральні. Але, пропустивши по двох паралельних провідниках струм, ми побачимо, що провідники, в яких струми I_1 і I_2 проходять в одному напрямі, притягуються (рис. 16.2, а), а провідники, в яких струми проходять у протилежних напрямках, відштовхуються (рис. 16.2, б).

Взаємодію між провідниками із струмом, тобто взаємодію між рухомими електричними зарядами, називають магнітною. Сили, з якими провідники із струмом діють один на одного, називають магнітними силами. Причиною виникнення сил магнітної взаємодії є магнітне поле, яке виникає навколо провідника із струмом.

Магнітне поле – це особлива форма матерії, через яку взаємодіють рухомі заряджені частинки або тіла, що мають магнітний момент. Експериментальним доведенням реальності магнітного і електричного полів є факт існування електромагнітних хвиль. Магнітне поле, як і електричне, є окремим проявом єдиного *електромагнітного поля*.

Характерною особливістю електричного поля є його здатність діяти на *нерухомі заряди*.

Основна властивість магнітного поля в тому, що воно діє на *рухомі заряди* (електричний струм).

Нерухомі заряди не створюють магнітного поля. Тільки рухомі заряди (електричний струм) і постійні магніти створюють магнітне поле.

У процесі вивчення взаємодії постійних магнітів було встановлено:

постійні магніти мають два полюси: північний і південний (на рис. 16.1 – відповідно N і S);

однойменні полюси відштовхуються один від одного, а різнойменні притягуються.

Це наводило на думку про існування в природі “магнітних зарядів”. Якби магнітні заряди існували в природі, то їх можна було б поділити як і електричні, тобто дістати постійний магніт тільки з одним полюсом. Проте якщо поділити магніт на дві половини, то кожна частина знову матиме два полюси. Процес поділу можна продовжити скільки завгодно, і кожний маленький шматочок магніту буде магнітом з двома полюсами. Пізніше було показано, що навіть електрони, протони, нейтрони поведуть себе як крихітні магніти.

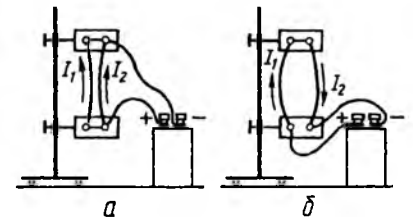


Рис. 16.2

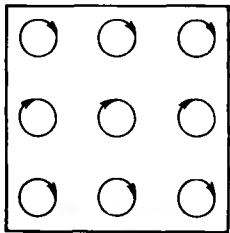


Рис. 16.3

Якщо окремі тіла можна зарядити позитивно або негативно, оскільки існує елементарний електричний заряд, то ніколи не можна відокремити північний полюс магніту від південного.

Отже, немає підстав вважати, що в природі існують окремі магнітні заряди.

Цю думку висловив Ампер у гіпотезі про елементарні електричні струми. Згідно з гіпотезою Ампера, всередині атомів і молекул речовини циркулюють елементарні, електричні струми. Якщо ці струми розміщені хаотично один відносно одного, то їх дія взаємно компенсується і жодних магнітних властивостей тіло не має. У намагніченому стані (наприклад, у постійних магнітах) елементарні струми відповідно орієнтовані (рис. 16.3). Отже, магнітні властивості будь-якого тіла пояснюються замкненими електричними струмами всередині нього, тобто **магнітна взаємодія – це взаємодія струмів**.

Замкнений контур із струмом у магнітному полі

Для вивчення електричного поля використовують *пробний заряд*, тобто такий, який власним полем не спотворює цього електричного поля. Для дослідження властивостей магнітного поля використовують маленьку плоску рамку із струмом, підвідні проводи до якої скручують: тоді в цих проводах проходить той самий струм, але в протилежних напрямках, тому сили, які діють з боку магнітного поля на кожний провідник, однакові, але протилежно напрямлені. Результируюча сила, яка діє з боку магнітного поля на скручений провідник, дорівнює нулю. Розміри рамки і сила струму, який проходить по ній, мають бути такими, щоб магнітне поле самої рамки не спотворювало досліджуваного магнітного поля. Таку рамку із струмом називають *пробним контуром*.

Виконаємо дослід. Підвісимо вертикально маленький пробний контур. На деякій відстані від нього розмістимо провідник. Якщо струму в провіднику немає, то рамка перебуває в байдужому стані рівноваги. Якщо по провіднику пропустити електричний струм, то рамка із струмом повернеться і розміститься так, щоб провід був у площині рамки (рис. 16.4). Якщо змінити напрям струму в провіднику, то рамка повернеться на кут π .

Отже, *магнітне поле чинить орієнтуючу дію на пробний контур*. Цим користуються для встановлення напрямку поля.

Пробний контур, вміщений у магнітне поле, зазнає з боку магнітного поля дії обертового моменту сили M . На досліді було встановлено, що для певної точки магнітного

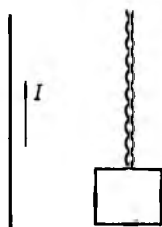


Рис. 16.4

поля максимальне значення моменту сили M_{\max} , який діє на контур із струмом, пропорційне добутку сили струму в контурі на площу контуру S , тобто $M_{\max} = IS$. Величину p_c , що характеризує магнітні властивості контуру із струмом, які ви-значають його поведінку в зовнішньому магнітному полі, називають *магнітним моментом контуру*. Отже $M_{\max} \approx p_c$.

Магнітному моменту контуру p_c приписують певний напрям у просторі. Отже, це *величина векторна*.

Вектор p_c збігається з напрямом додатної нормалі n до площини контуру (рис. 16.5). Додатний напрям нормалі збігається з напрямом переміщення *гвинта* з правою нарізкою, який обертається у напрямі струму. Напрямок магнітного моменту можна визначити і за допомогою магнітної стрілки. Цей напрям показує північний полюс стрілки.

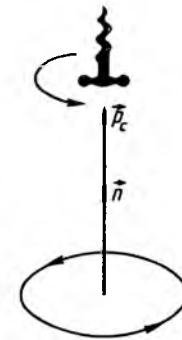


Рис. 16.5

§ 140. Вектор індукції магнітного поля

Магнітна індукція

Експериментально було встановлено, що *відношення максимального обертового моменту, який діє на контур із струмом у магнітному полі, до магнітного моменту цього контуру не залежить від властивостей пробного контуру* і тому може бути характеристикою досліджуваного магнітного поля. Його називають *магнітною індукцією*:

$$B = \frac{M_{\max}}{p_c} \quad (16.1)$$

Формула (16.1) визначає тільки модуль магнітної індукції. Магнітне поле можна повною мірою описати, якщо в кожній його точці знайти модуль і напрям магнітної індукції B . Вектор магнітної індукції за напрямом збігається з напрямом зовнішнього магнітного поля.

Магнітна індукція – це силова характеристика магнітного поля в даній точці простору.

У загальному випадку залежність обертового моменту M від орієнтації контуру визначається формулою

$$M = B p_c \sin \alpha, \quad (16.2)$$

де α – кут між векторами p_c і B (рис. 16.6). Максимального значення M_{\max} обертальний момент досягає при $\alpha = \pi/2$.

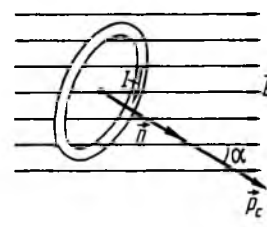


Рис. 16.6

Рівновага контуру в магнітному полі можлива тоді, коли вектори ρ_c і \mathbf{B} напрямлені по одній прямій.

За одиницю магнітної індукції в СІ, яку називають *тесла* (Тл)*, беруть таку індукцію, при якій на контур з площею 1 м^2 і силою струму 1 А діє обертальний момент, що дорівнює $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Згідно з (16.2), маємо $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$.

Лінії магнітної індукції

Подібно до того як електричні поля графічно зображують за допомогою електричних силових ліній, магнітні поля зображують за допомогою ліній магнітної індукції (або магнітних силових ліній).

Лінії магнітної індукції – це лінії, дотичні до яких у даній точці збігаються за напрямом з вектором \mathbf{B} у цій точці. Лінії магнітної індукції можна зробити “видимими” за допомогою залізних ошурок. Якщо на скляну пластинку, крізь яку пропущено прямий провідник із струмом, насипати залізних ошурок і злегка постукати по пластинці, то залізни ошурки розмістяться вздовж силових ліній (рис. 16.7, а).

З дослідів випливає, що лінії магнітної індукції прямого провідника із струмом є концентричними колами, які лежать у площині, перпендикулярній до струму. Центри цих кіл розташовані на осі провідника. За допомогою залізних ошурок можна дістати зображення ліній магнітної індукції провідників із струмом будь-якої форми (рис. 16.7, а–в).

Лінії магнітної індукції завжди замкнені та охоплюють провідники із струмами.

Це відрізняє їх від ліній напруженості електростатичного поля. Такі поля називають *вихровими* на відміну від *потенціальних*, прикладом яких є електростатичне поле.

Напрямок ліній магнітної індукції пов’язаний з напрямом струму в провіднику. Напрямок силових ліній магнітного поля, яке створюється провідником із струмом, визначають за *правилом гвинта*.

Якщо гвинт з правою різьєю крутити в напрямі струму, то напрям обертання ручки гвинта збіжиться з напрямом ліній магнітної індукції.

Магнітне поле називають *однорідним*, якщо вектори магнітної індукції в усіх його точках однакові ($\mathbf{B} = \text{const}$). Прикладом однорідного магнітного поля може бути поле всередині *соленоїда* – котушки, довжина якої значно більша за її діаметр (рис. 16.7, в). Лінії магнітної індукції однорідного поля паралельні, і їх густина скрізь однакова.

Густиною ліній магнітної індукції можна характеризувати значення магнітної індукції \mathbf{B} . Умовились через одиничну площадку, розміщену

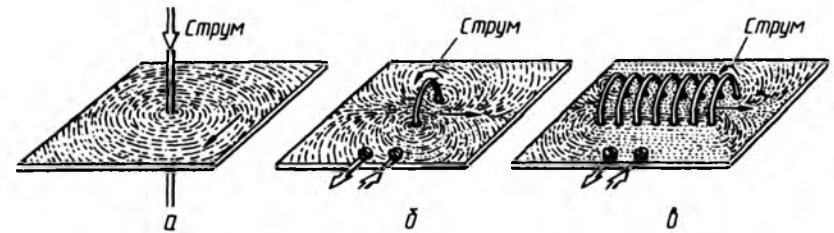


Рис. 16.7

перпендикулярно до ліній магнітної індукції, проводити таку кількість ліній, яка дорівнює або пропорційна модулю магнітної індукції в цій області магнітного поля.

§ 141. Напруженість магнітного поля.

Закон Біо – Савара – Лапласа

Магнітна проникність середовища

Якщо за допомогою провідника із струмом у різних речовинах створювати магнітне поле і досліджувати його за допомогою пробного контуру, то можна пересвідчитись, що магнітна індукція залежить у даній точці від роду речовини, тобто залежить від властивостей середовища. Нехай \mathbf{B} і \mathbf{B}_0 – магнітні індукції відповідно в даному однорідному ізотропному середовищі й у вакуумі. Їх відношення

$$\mu = \frac{B}{B_0}, \quad (16.3)$$

яке показує, у скільки разів магнітна індукція в середовищі більша (або менша), ніж у вакуумі, називають відносною магнітною проникністю середовища.

Відносна магнітна проникність характеризує магнітні властивості середовища, вона залежить від роду речовини і температури: $\mu \geq 1$ – величина безрозмірна; для вакууму $\mu = 1$.

Напруженість магнітного поля

Магнітне поле у вакуумі характеризують не індукцією \mathbf{B}_0 , а напруженістю магнітного поля \mathbf{H} . Ці дві фізичні величини пов’язані між собою співвідношенням

* Одиницю магнітної індукції назвали на честь сербського електротехніка Н. Тесли.

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}_0^*}{\mu_0}, \text{ або } \mathbf{B}_0 = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (16.4)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

З (16.3) і (16.4) випливає, що індукція магнітного поля в середовищі

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H}. \quad (16.5)$$

Отже, якщо відомі напруженість поля в даній точці і магнітна проникність середовища, то за допомогою співвідношення (16.5) можна визначити індукцію поля в цій точці.

Закон Біо – Савара – Лапласа

Узагальнивши експериментальні дані французьких фізиків Біо і Савара, французький математик Лаплас запропонував формулу, за якою можна обчислювати напруженість поля, створювану струмом, що проходить по ділянці провідника завдовжки Δl , у точці, розміщеній від цієї ділянки на відстані r (рис. 16.8):

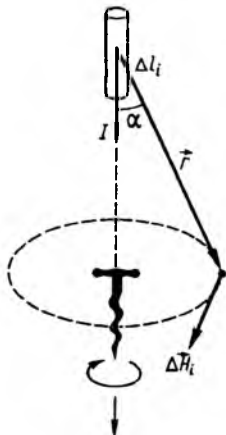


Рис. 16.8

$$\Delta H = \frac{I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (16.6)$$

де α – кут між напрямом струму в ділянці Δl і радіусом-вектором r , який сполучає цю ділянку з розглядуваною точкою поля. Цей вираз називають *законом Біо – Савара – Лапласа*.

За формулою (16.6) визначають напруженість поля, яку створює ділянка провідника із струмом I . Щоб визначити напруженість поля, яку створює весь провідник, треба застосувати принцип суперпозиції полів. За принципом суперпозиції полів, напруженість H у будь-якій точці магнітного поля провідника із струмом I дорівнює векторній сумі напруженостей ΔH_i елементарних полів, створюваних усіма ділянками провідника:

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^n \Delta \mathbf{H}_i = \Delta \mathbf{H}_1 + \Delta \mathbf{H}_2 + \dots + \Delta \mathbf{H}_n, \quad (16.7)$$

де n – загальна кількість ділянок, на які поділено провідник.

* Одиниця напруженості магнітного поля 1 А/м – напруженість такого поля, магнітна індукція якого у вакуумі дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл.

** Величину $I \Delta l$ називають *елементом струму*.

Магнітне поле колового струму

Користуючись законом Біо – Савара – Лапласа, визначимо (рис. 16.9) напруженість магнітного поля в центрі колового провідника (тобто в точці O) радіуса r , по якому проходить струм I . Поділимо цей провідник на n малих ділянок завдовжки Δl кожна, таких, щоб кожна ділянка Δl_i була набагато менша від r . За законом Біо – Савара – Лапласа, в точці O елемент провідника створює поле

$$\Delta H_i = \frac{I \sin \alpha}{4\pi r^2} \Delta l_i.$$

Як видно з рис. 16.9, кут α між напрямом струму в провіднику і r дорівнює $\pi/2$, оскільки через мализну Δl_i можна вважати, що струм в Δl_i , напрямлений по дотичній до кола. Отже, $\sin \alpha = \sin \pi/2 = 1$.

Щоб визначити напрям ΔH_i , використаємо правило гвинта.

Якщо ручку гвинта обертати в напрямі струму (у нашому випадку – за рухом стрілки годинника), то напрям руху вістря гвинта покаже напрям вектора $\Delta \mathbf{H}_i$ (у нашому випадку – за рисунок, перпендикулярно до його площини).

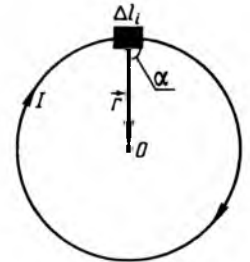


Рис. 16.9

Де б не був елемент провідника, напруженість, яку він створює, буде напрямлена за рисунок, перпендикулярно до його площини, тобто $\Delta \mathbf{H}_i$ від усіх елементів провідника напрямлені однаково. Тому сумарна напруженість H від провідника дорівнює алгебричній сумі:

$$H = \sum_{i=1}^n \frac{I \Delta l_i}{4\pi r^2}.$$

Оскільки всі елементи провідника Δl_i однаково віддалені від центра провідника на відстань, яка дорівнює r , і струм $I = \text{const}$, то величину $I/(4\pi r^2)$ можна винести за знак суми, тоді

$$H = \frac{I}{4\pi r^2} \sum_{i=1}^n \Delta l_i.$$

Оскільки $\sum_{i=1}^n \Delta l_i = 2\pi r$, дістанемо

$$H = \frac{I}{4\pi r^2} 2\pi r = \frac{I}{2r}. \quad (16.8)$$

Отже, **напруженість магнітного поля, яку створює коловий провідник із струмом у його центрі, пропорційна силі струму, що проходить по провіднику, і обернено пропорційна радіусу провідника.**

Індукція цього поля

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 I / (2r). \quad (16.9)$$

Напрями векторів **H** і **B** збігаються.

Використавши закон Біо – Савара – Лапласа, можна обчислити напруженість та індукцію поля, створюваного провідником із струмом будь-якої форми.

Для розв'язування задач корисно знати формули напруженості та індукції магнітного поля

нескінченно довгого прямолінійного провідника:

$$H = \frac{I}{2\pi R}, \quad B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R} \quad (16.10)$$

(*R* – найкоротша відстань від провідника до тієї точки, в якій визначають **H** або **B**);

нескінченно довгого соленоїда або тороїда:

$$H = In, \quad B = \mu\mu_0 In \quad (16.11)$$

(*n* – кількість витків, які припадають на одиничну довжину соленоїда або середньої лінії тороїда).

§ 142. Дія магнітного поля на прямолінійний провідник із струмом. Закон Ампера

Одним з проявів магнітного поля є його силова дія на рухомі електричні заряди і провідники із струмом. У 1820 р. А. Ампер установив закон, який визначає силу, що діє на елемент струму в магнітному полі. Оскільки створити відокремлений елемент струму не можна, то Ампер вивчав поведження рухомих дрютяних замкнених контурів різної форми. Він установив, що

на провідник із струмом, вміщений в однорідне магнітне поле індукції **B, діє сила, пропорційна довжині відрізка провідника Δl , силі струму **I**, який проходить по провіднику, та індукції магнітного поля **B**:**

$$F = BI\Delta l \sin \alpha, \quad (16.12)$$

де α – кут між напрямом струму в провіднику і напрямом вектора **B**.

Ця сила має максимальне значення, якщо $\alpha = \pi/2$. Якщо провідник розміщений уздовж лінії магнітної індукції, то ця сила дорівнює нулю.

Вираз (16.12) називають **законом Ампера**.

Для визначення напрямку сили, яка діє на провідник із струмом, вміщений у магнітне поле, застосовують **правило лівої руки**:

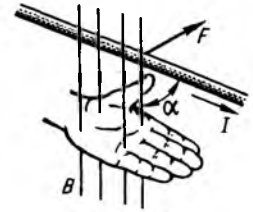


Рис. 16.10

якщо ліву руку розмістити так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а випрямлені чотири пальці збігалися з напрямом струму в провіднику, то відігнутий великий палець покаже напрям сили, яка діє на провідник із струмом, вміщений у магнітне поле (рис. 16.10).

Ця сила завжди перпендикулярна до площини, в якій лежать провідник і вектор **B**. Знаючи напрям і модуль сили, що діє на будь-яку ділянку провідника Δl_i , можна обчислити силу, що діє на весь провідник. Для цього треба знайти суму сил, які діють на всі ділянки провідника.

§ 143. Взаємодія струмів

Розглянемо взаємодію паралельних провідників із струмом. Припустимо, що в однорідному ізотропному середовищі з магнітною проникністю μ на відстані *d* один від одного розміщені два провідники 1 і 2 (рис. 16.11). Нехай в одному напрямі по одному з них проходить струм I_1 , а по другому – I_2 .

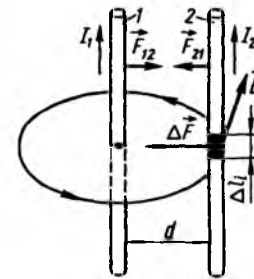


Рис. 16.11

Вважатимемо, що провідник із струмом I_1 створює магнітне поле, а провідник із струмом I_2 лежить у магнітному полі провідника I_1 .

Виділимо на провіднику 2 довільний елемент Δl_i , на нього діє сила Ампера

$$\Delta F_i = B_1 I_2 \Delta l_i \sin \alpha,$$

де $B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi d}$ – індукція магнітного поля, яке створює перший провідник.

Вектор B_1 напрямлений перпендикулярно до провідника із струмом I_2 , тому $\sin \alpha = 1$. Враховуючи це, дістанемо

$$\Delta F_i = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi d} I_2 \Delta l_i.$$

Застосувавши правило лівої руки, визначимо напрям цієї сили. Щоб визначити силу F_{21} (тобто силу, яка діє з боку першого провідника на другий), треба взяти суму всіх елементарних ΔF_i . Врахувавши те, що $\sum \Delta l_i = l$, дістанемо

$$F_{21} = \sum_{i=1}^n \Delta F_i = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \Delta l_i = \mu\mu_0 I_1 I_2 l / (2\pi d). \quad (16.13)$$

Отже,

сила, з якою перший провідник діє на другий, пропорційна добутку струмів, що проходять по провідниках, і обернено пропорційна відстані між ними.

Крім того, вона залежить від магнітних властивостей середовища, в якому розміщені провідники і їх довжини.

Нехай тепер, навпаки, перший провідник буде в магнітному полі, яке створює другий провідник. За допомогою аналогічних обчислень дістанемо, що другий провідник діє на перший із силою

$$F_{12} = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}. \quad (16.14)$$

З порівняння формул (16.14) і (16.13) видно, що ці сили однакові за модулем, але протилежні за напрямом.

Якщо струми проходять по провідниках в однакових напрямках, то провідники притягуються, а якщо в протилежних – відштовхуються, бо на кожний з них з боку магнітного поля другого провідника діє сила, модуль якої

$$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}. \quad (16.15)$$

Магнітну взаємодію провідників із струмом використано для означення ампера – одиниці сили електричного струму, основної одиниці СІ:

1 А дорівнює силі незмінюваного струму, який під час проходження по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і дуже малої площі кругового поперечного перерізу, розміщених у вакуумі на відстані 1 м один від одного, спричинював би на кожній ділянці провідника завдовжки 1 м силу взаємодії, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Використавши означення ампера і формулу (16.15), можна знайти

$$\mu_0 = \frac{2\pi d F}{\mu I_1 I_2 l} = \frac{2\pi \cdot 1 \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}}{1 \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

§ 144. Магнітний потік

Потік вектора магнітної індукції

Розглянемо плоску пластинку площею ΔS , розміщену в однорідному магнітному полі \mathbf{B} (рис. 16.12).

Магнітним потоком крізь поверхню ΔS називають фізичну величину, яка дорівнює добутку \mathbf{B}_n (проекції вектора магнітної індукції на нормаль до поверхні) на площу цієї поверхні:

$$\Delta\Phi = B_n \Delta S = B_n \Delta S \cos \alpha, \quad (16.16)$$

де α – кут між напрямом нормалі \mathbf{n} і вектором індукції \mathbf{B} . Оскільки $B_n = B \cos \alpha$ – величина скалярна, то скаляром є і магнітний потік.

Магнітний потік Φ характеризує кількість ліній магнітної індукції, що проходять крізь дану поверхню.

Для однорідного поля і плоскої поверхні, яка лежить перпендикулярно до вектора \mathbf{B} , $B_n = B = \text{const}$, тоді $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$. За цією формулою визначають одиницю магнітного потоку.

Одиницею магнітного потоку є *вебер* (Вб) – потік через плоску поверхню площею 1 м^2 , розміщену перпендикулярно до силових ліній однорідного магнітного поля, індукція якого дорівнює 1 Тл:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

Змінити магнітний потік можна так:

- 1) змінюючи магнітну індукцію за модулем і напрямом, тобто розміщуючи контур з незмінною площею в неоднорідному магнітному полі;
- 2) змінюючи орієнтацію контуру відносно напрямку вектора магнітної індукції \mathbf{B} , тобто обертаючи контур в однорідному магнітному полі.

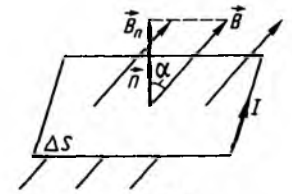


Рис. 16.12

Теорема Остроградського–Гаусса

Залежно від того, який знак має $\cos \alpha$ (16.16), магнітний потік може бути додатним ($\Phi > 0$) і від'ємним ($\Phi < 0$). Знак $\cos \alpha$ залежить від вибору додатного напрямку нормалі. Додатний напрям нормалі задається напрямом струму, що проходить по даному контуру.

За теоремою Остроградського–Гаусса

магнітний потік через замкнену поверхню дорівнює нулю.

Це випливає з того, що лінії магнітної індукції є замкненими, тому кількість ліній, які входять з одного боку поверхні, дорівнює кількості ліній,

що виходять з іншого її боку. Якщо потоки, що входять, брати з одним знаком, а які виходять – з іншим, то сумарний потік вектора магнітної індукції крізь замкнену поверхню дорівнюватиме нулю.

§ 145. Робота щодо переміщення провідника із струмом у магнітному полі

Припустимо, що паралельні вітки кола – шини, вздовж яких ковзає провідник завдовжки l (рис. 16.13).

Якщо цю систему помістити в однорідне магнітне поле, індукція якого напрямлена перпендикулярно до площини рисунка, то провідник почне рухатись. У процесі руху він переміщатиметься поступально паралельно самому собі, оскільки на нього з боку магнітного поля діє сила Ампера

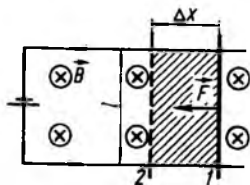


Рис. 16.13

$$F = BI l.$$

Нехай провідник під дією сили F переміщується на Δx з положення 1 в положення 2. При цьому виконується механічна робота

$$\Delta A = F \Delta x = BI l \Delta x.$$

У цьому виразі $l \Delta x = S$ – площа, яку охоплює провідник під час руху (на рис. 16.13 її заштриховано). Тоді, врахувавши (16.16), дістанемо

$$\Delta A = I B \Delta S = I \Delta \Phi. \quad (16.17)$$

Робота, яку виконують сили Ампера, під час переміщення провідника із струмом у магнітному полі дорівнює добутку сили струму на магнітний потік через поверхню, яку охоплює рухомий провідник.

Оскільки $\Delta \Phi$ характеризує кількість ліній магнітної індукції, які перетинає провідник під час руху, то при багаторазовому переміщенні лінійного провідника (або під час обертання контуру) для визначення роботи треба брати сумарну кількість перерізів провідником магнітних силових ліній.

Роботу, яку обчислюють за формулою (16.17), у СІ визначають у джоулях.

§ 146. Дія магнітного поля на рухомий заряд. Сила Лоренца

Рухомі електричні заряди створюють навколо себе магнітні поля, які поширюються у вакуумі із швидкістю світла. У середовищах з $\epsilon > 1$, $\mu \geq 1$ швидкість поширення менша.

Якщо заряд рухається в зовнішньому магнітному полі, то відбувається силова взаємодія магнітних полів, яку визначають за законом Ампера. Процес взаємодії магнітних полів дослідив Лоренц, який вивів формулу для визначення сили, що діє з боку магнітного поля на рухому заряджену частинку.

Силу, яка діє з боку магнітного поля \mathbf{B} на заряд Q , що рухається з швидкістю \mathbf{v} , називають силою Лоренца. Її можна визначити, виходячи з закону Ампера. Нехай по провіднику завдовжки Δl за час Δt проходить n однакових зарядів Q (рис. 16.14). Це означає, що через провідник проходить струм $I = nQ / \Delta t$. За законом Ампера, на nQ зарядів діє сила

$$F = BI \Delta l \sin \alpha = B \frac{nQ}{\Delta t} \Delta l \sin \alpha.$$

Сила, з якою поле діє на кожний окремий заряд (сила Лоренца),

$$F_{\text{Л}} = \frac{F}{n} = BQ \frac{\Delta l}{\Delta t} \sin \alpha.$$

Врахувавши, що $\Delta l / \Delta t = v$ – середня швидкість руху заряду, дістанемо

$$F_{\text{Л}} = QvB \sin \alpha, \quad (16.18)$$

де α – кут між вектором швидкості заряду \mathbf{v} і вектором магнітної індукції \mathbf{B} .

Сила Лоренца напрямлена перпендикулярно до векторів \mathbf{v} і \mathbf{B} .

Для рухомого позитивного заряду її напрям визначають за правилом лівої руки (рис. 16.14). Із зміною знака заряду напрям сили змінюється на протилежний.

Аналізуючи вираз (16.16), можна зробити висновки:

а) якщо швидкість заряду $v = 0$, то $F_{\text{Л}} = 0$, тобто магнітне поле не діє на нерухому заряджену частинку;

б) якщо $\alpha = 0$, то $\sin \alpha = 0$ і $F_{\text{Л}} = 0$, тобто якщо частинка рухається так, що вектор її швидкості \mathbf{v} паралельний вектору магнітної індукції \mathbf{B} , то на неї з боку магнітного поля сили не діють.

Оскільки сила Лоренца завжди напрямлена перпендикулярно до вектора швидкості частинки, яка летить, то вона не змінює модуля швидкості, а змінює тільки напрям руху частинки. Якщо заряджена частинка рухається в однорідному магнітному полі, вектор індукції якого перпендикулярний до напрямку швидкості зарядженої частинки, то сила Лоренца викривляє траєкторію руху, виконуючи роль доцентрової сили. Дія цієї сили не змінює кінетичної енергії зарядженої частинки, тобто

сила Лоренца не виконує роботи.

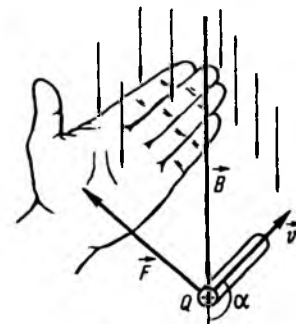


Рис. 16.14

§ 147. Визначення питомого заряду.
Прискорювачі заряджених частинок

Рух зарядженої частинки в магнітному полі

Використання явища дії магнітного поля на рухомий заряд дуже важливе в процесі дослідження космічних частинок для визначення знаків їх зарядів. Для виведення загальних закономірностей вважаємо, що магнітне поле однорідне.

Траєкторія зарядженої частинки, яка вилетіла в потужне магнітне поле, різко змінюється (рис. 16.15). Залежно від знака заряду частинка відхиляється *ліворуч* або *праворуч* (на рис. 16.15 вектор індукції магнітного поля напрямлений від нас перпендикулярно до площини рисунка) і рухається по колу, радіус якого R можна визначити з умови рівності доцентрової сили і сили Лоренца:

$$mv^2 / R = QvB.$$

Звідси

$$R = mv / (QB). \quad (16.19)$$

Частинка, швидкість v якої напрямлена під кутом β до B , рухається по гвинтовій лінії і ніби накручується на силову лінію (рис. 16.16). Крок спіралі h визначається тангенціальною складовою v_t швидкості частинки. Радіус спіралі R залежить від її нормальної складової v_n .

На електричний заряд, який рухається одночасно в електричному і магнітному полях, діє результуюча сила

$$F = F_e + F_{\text{Л}} = QvB + QE. \quad (16.20)$$

Між електричною і магнітною складовими цієї сили є принципова відмінність.

Електричне поле змінює швидкість, а отже, і кінетичну енергію частинки, однорідне магнітне поле змінює тільки напрям її руху.

Пропускаючи заряджені частинки через електричне і магнітне поля, які одночасно діють, з (16.19) визначають їх питомі заряди Q/m – відношення зарядів частинок до їх мас. Швидкість частинки обчислюють з

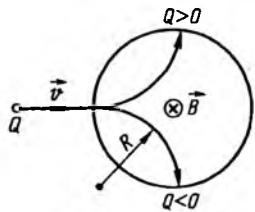


Рис. 16.15

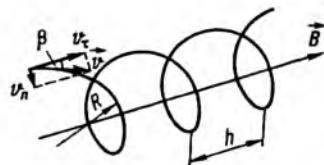


Рис. 16.16

прискорюючої різниці потенціалів електричного поля. Справді, робота електричних сил $Q(\varphi_1 - \varphi_2)$ дорівнює кінетичній енергії частинки:

$$mv^2 / 2 = Q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

звідки

$$v = \sqrt{2Q(\varphi_1 - \varphi_2) / m}.$$

Радіус траєкторії R визначають експериментально. За відомими B і $(\varphi_1 - \varphi_2)$ з (16.19) питомий заряд

$$\frac{Q}{m} = \frac{2(\varphi_1 - \varphi_2)}{R^2 B^2}.$$

Так було визначено питомі заряди електрона $e/m_e = 1,7588 \cdot 10^{11}$ Кл/кг і протона $e/m_p = 9,5488 \cdot 10^7$ Кл/кг.

Прилади, за допомогою яких можна поділяти заряджені частинки за їх питомими зарядами, називають *мас-спектрографами*.

Прискорювачі заряджених частинок

Структуру атомних ядер досліджують, бомбардуючи їх частинками, що мають велику енергію, тобто такими, що летять з великою швидкістю. Для добування таких частинок у лабораторних умовах використовують прискорювачі частинок різних видів, одним з яких є *циклічний прискорювач (циклотрон)*.

У циклотроні (рис. 16.17) заряджена частинка рухається між полюсами електромагніта, багаторазово проходячи через електричне поле. При цьому щоразу її енергія зростає на $10^2 - 10^3$ еВ. Рухом частинки керують за допомогою поперечного магнітного поля.

На заряджену частинку, яка рухається в постійному магнітному полі, діє сила Лоренца $F_{\text{Л}} = QvB$, внаслідок чого частинка рухається по колу сталого радіуса R , якщо її маса m і швидкість v не змінюються (рис. 16.17, а). Сила Лоренца $F_{\text{Л}}$ дорівнює силі, яка спричинює доцентрове прискорення

$F = mv^2 / R$, тобто

$$mv^2 / R = QvB,$$

де Q – заряд частинки; B – індукція магнітного поля (вектори v і B взаємно перпендикулярні, тобто $\sin \alpha = 1$). З цієї формули легко дістати вирази для кутової швидкості частинки:

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{QB}{m}.$$

Якщо Q , m і V сталі, то кутова швидкість, а отже, і кількість обертів частинки за секунду також сталі величини, які не залежать від енергії частинки. Проте радіус траєкторії залежить від швидкості руху частинки [див. (16.19)]. Тому зі збільшенням швидкості руху частинки із зростанням її енергії радіус траєкторії збільшується, через це і частинка в циклотроні рухається по спіралі, яка розкручується.

Схему циклотрона зображено на рис. 16.17, б (вигляд збоку) і рис. 16.17, в (вигляд зверху). Між полюсами електромагніта, який складається з магніту 2 і обмоток 1, встановлюють два металевих електроди 4 і 6, на які подається висока напруга від високочастотного генератора 7. Електроди називаються дуантами через схожість їх форми з латинською буквою D . Поблизу від центра магніту в проміжку між дуантами розміщують джерело 5 заряджених частинок (іонів). Всю систему з електродів та іонного джерела встановлено у вакуумній камері 3, розрядження в якій досягає 10^{-5} мм рт. ст. Частоту зміни електричного поля добирають так, щоб до моменту підлітання іона, який вилетів з джерела 5, до зазору між дуантами там існувала прискорююча різниця потенціалів. Всередині дуантів електричного поля немає, і там іон рухається по дузі сталого радіуса, який відповідає енергії іона. У проміжках між дуантами енергія іона збільшується, збільшується і радіус наступного піввитка в дуанті. Іони рухаються по спіралі, наближаючись до краю полюса магніту. Пучок прискорених позитивних іонів виводять з циклотрона за допомогою відхиляючого електрода 8, на який подається високий негативний потенціал. Проходячи повз нього, пучок іонів змінює свою траєкторію і крізь віконце, затулене тонкою фольгою, виходить з камери.

Циклотрон використовують як прискорювач важких частинок – протонів і багатозарядних позитивних іонів.

Для прискорення електронів використовують *бетатрони*, в яких додаткову енергію електронам надає вихрове електричне поле.

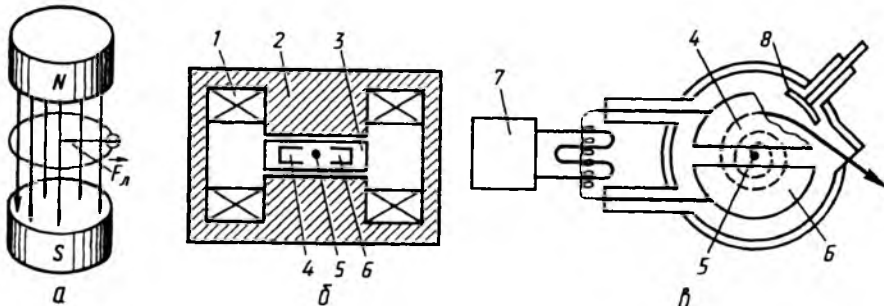


Рис. 16.17

§ 148. Магнітосфера Землі та її взаємодія з сонячним вітром

Магнітосфера – це область навколосезного простору, властивості, розміри і форма якої визначаються магнітним полем Землі та його взаємодією з потоками заряджених частинок від Сонця, тобто сонячним вітром.

Сонячний вітер – це постійний радіальний потік плазми сонячної корони в міжпланетний простір. Сонячний вітер містить в основному протони, небагато ядер гелію, іонів кисню, кремнію, сірки, заліза. Ці частинки досягають орбіти Землі, маючи велику швидкість, наприклад, швидкість протонів досягає 300–750 км/с. Поблизу Землі зіткнення частинок сонячного вітру з геомагнітним полем породжує стаціонарну ударну хвилю перед землею магнітосферою. Сонячний вітер ніби обтікає магнітосферу, обмежуючи її протяжність у просторі.

Наближено можна вважати, що межа магнітосфери непрозора для сонячного вітру. На денному боці межа магнітосфери – *магнітопауза* – проходить на відстані порядку десяти земних радіусів. Частинки, які провалилися в магнітосферу, спричиняють *полярні сьйва*. У внутрішніх областях магнітосфери магнітне поле вдержує, як у магнітній пастці, потоки швидких частинок. Ці частинки утворюють радіаційні смуги Землі.

Зміни інтенсивності сонячного вітру, пов'язані зі спалахами на Сонці, призводять до магнітосферних бур. При цьому полярні сьйва підсилюються, потік частинок у радіаційних смугах зростає, магнітне поле Землі спотворюється.

Дослідження за допомогою космічних апаратів показали, що магнітосферу мають і деякі інші планети: Меркурій, Юпітер, Сатурн, Венера.

§ 149. Магнітні властивості речовини

Магнітні властивості мають усі речовини, тому термін “магнетики” застосовний до всіх без винятку матеріалів. Щоб пояснити магнітні властивості різних речовин, розглянемо, як магнітне поле діє на рухоми заряди (електрони) в молекулах і атомах речовини.

Електрон, який обертається навколо ядра атома по замкненій орбіті, – це струм, напрям якого протилежний руху електрона. Умовно вважатимемо, що електрон в атомі рухається із швидкістю v по коловій орбіті. Оскільки цей рух аналогічний коловому струму, виникає магнітне поле і рух електрона можна охарактеризувати орбітальним магнітним моментом (рис. 16.18)

$$p_{mi} = IS. \quad (16.21)$$

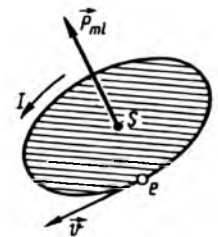


Рис. 16.18

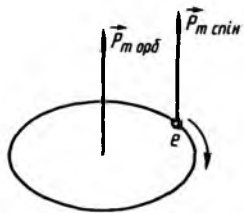


Рис. 16.19

Вектор орбітального магнітного моменту атома \mathbf{P}_m дорівнює векторній сумі орбітальних моментів \mathbf{P}_{mi} окремих електронів, які входять до складу атома:

$$\mathbf{P}_m = \sum_{i=1}^Z \mathbf{P}_{mi}, \quad (16.22)$$

де Z – порядковий номер елемента в таблиці Менделєєва. Якщо речовина має молекулярну будову, то

орбітальний магнітний момент молекули дорівнює векторній сумі орбітальних магнітних моментів атомів, що входять до складу молекули.

Незалежно від орбітального руху електрони є джерелами магнітного поля, оскільки вони мають власний момент імпульсу, який називається спіном.

Отже, магнетизм атомів зумовлений двома причинами: рухом електронів по орбітах навколо ядра і власним моментом імпульсу – спіном (рис. 16.19). Крім того, ядро атома має власний магнітний момент.

При накладанні зовнішнього магнітного поля напрями векторів магнітних моментів \mathbf{P}_m окремих атомів або молекул магнетика упорядковуються, внаслідок чого макроскопічний об'єм набуває певного сумарного магнітного моменту. Магнітні властивості магнетика характеризуються вектором намагнічення \mathbf{I} – величиною, яка дорівнює відношенню магнітного моменту тіла до його об'єму:

$$\mathbf{I} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_m, \quad (16.23)$$

де n – кількість атомів або молекул, що входять в об'єм.

Якщо діелектрична проникність у всіх речовин більша від одиниці, то їх магнітна проникність може бути як більшою, так і меншою від одиниці.

За значенням розрізняють діамагнетики ($\mu < 1$), парамагнетики ($\mu > 1$) і феромагнетики ($\mu \gg 1$).

§ 150. Природа діа-, пара- і феромагнетизму

Діамагнетики

У більшості атомів діамагнетиків немає власного магнітного моменту, його магнітний момент індукований зовнішнім полем подібно до того, як виникає електричний момент у неполярних діелектриках. Врахувавши, що наведений магнітний момент пропорційний зовнішньому полю \mathbf{B}_0 , можна записати (за аналогією з діелектриком)

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{B}_0, \quad (16.24)$$

де в цьому випадку $\mu < 1$.

Діамагнітний ефект не залежить від температури, оскільки тепловий рух атомів не порушує орієнтації індукованих струмів усередині атомів. Діамагнітний ефект властивий практично будь-якій речовині.

Діамагнетиками є вода, мармур, деякі метали, наприклад золото, ртуть, мідь, інертні гази.

Парамагнетики

Молекули парамагнетиків мають відмінні від нуля власні магнітні моменти. Якщо магнітного поля немає, то ці моменти розміщені хаотично, тому вектор намагнічення дорівнює нулю.

Якщо в магнітне поле внести парамагнетик, то магнітні моменти окремих атомів або молекул орієнтуються за полем, так що власне поле парамагнетика підсилює зовнішнє магнітне поле, тобто зовнішнє магнітне поле підсилюється. Якщо такий ефект існує, то він має велике значення і перевагу над діамагнетизмом ($\mu > 1$).

Тепловий рух атомів і молекул руйнує взаємну орієнтацію магнітних моментів молекул, тому намагніченість парамагнетика залежить від температури і відносна магнітна проникність парамагнетиків спадає із збільшенням температури. Відносна магнітна проникність парамагнетиків, як і діамагнетиків, не залежить від індукції зовнішнього магнітного поля.

Парамагнетиками є лужні метали, кисень, алюміній, платина.

Феромагнетики

Граничним випадком парамагнетизму є феромагнетизм. Його пояснюють у квантовій теорії, де показано, що в системі, яка складається з багатьох атомів (молекул), магнітні моменти яких зумовлені спінами електронів, діють обмінні сили, що прагнуть однаково орієнтувати спіни двох сусідніх атомів (молекул). Тому в деяких речовинах виникають області, що мають внаслідок додавання спінів електронів значні магнітні моменти. Ці області назвали доменами (рис. 16.20). Якщо поля немає, розподіл напрямів магнітних моментів доменів має випадковий характер.

У дослідах Ейнштейна і де Гааза було показано, що намагнічення феромагнетиків зумовлене орієнтацією спінів електронів. На рис. 16.21

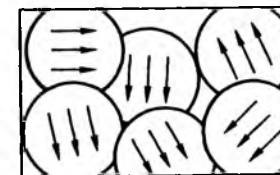


Рис. 16.20

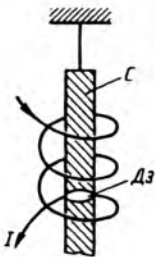


Рис. 16.21

подано схему дослідження. Легкий ферромагнітний стрижень *С*, підвішений на кварцовій нитці, поміщали всередину соленоїда. Коли по соленоїду пропускали змінний струм, стрижень повертався то в один, то в другий бік залежно від напрямку струму, що реєструвалось на шкалі за відхиленням світлового “зайчика” від дзеркала *Дз*. Поворот стрижня пояснювався тим, що електрон має не тільки власний магнітний, а й власний механічний момент, тобто момент імпульсу. Якщо по соленоїду пропускати струм *I*, то внаслідок дії зовнішнього магнітного поля магнітні моменти електронів розміщуються впорядковано, що веде до впорядкованості напрямів моментів імпульсів. Обчислення, проведені на підставі дослідів, показали, що відношення магнітного моменту до механічного відповідає не електронній орбіті, а спіну електрона.

Температура Кюрі

При зростанні температури намагнічення ферромагнетиків зменшується, вони втрачають свої ферромагнітні властивості і перетворюються в парамагнітні речовини.

Магнітна проникність деяких речовин

Речовина	μ	Речовина	μ
<i>Парамагнетики</i>			
Азот (газоподібний)	1,000013	Ебоніт	1,000014
Повітря (газоподібне)	1,000038	Алюміній	1,000025
Кисень (газоподібний)	1,000017	Вольфрам	1,000253
Кисень (рідкий)	1,0034	Платина	1,000253
<i>Діамагнетики</i>			
Водень (газоподібний)	0,999938	Срібло	0,999981
Вода	0,999991	Золото	0,999963
Скло	0,999987	Мідь	0,999912
Цинк	0,999991	Вісмут	0,999824

Для кожного ферромагнітного матеріалу є своя температура переходу, яка називається *точкою Кюрі*, так, наприклад, для Fe – 1043 К, Co – 1393 К, Ni – 631 К.

§ 151. Крива намагнічення

У ферромагнетиків μ залежить від зовнішнього магнітного поля, тобто між *B* і *H* існує нелінійна залежність.

У процесі намагнічування магнітне поле всередині ферромагнетика зростає від 0 до деякого значення *H* (рис. 16.22). Зміна значення індукції

у ферромагнетика характеризується кривою *OL*. Якщо зменшувати *H*, то зміна індукції буде зображена кривою *LM*. Якщо напруженість поля *H* = 0, то індукція відмінна від нуля. У цьому стані ферромагнетик є постійним магнітом. Щоб знищити залишкове намагнічення, доводиться створювати поле *H*, напрямлене протилежно початковому. Значення напруженості магнітного поля, при якій *B* = 0, називається *затримуючою*, або *коерцитивною силою* *H_к*. При наступній зміні поля індукція змінюється, створюючи, як показано на рис. 16.22, *петлю гістерезису*.

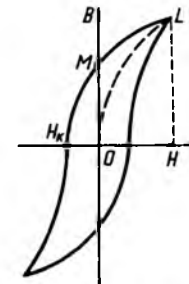


Рис. 16.22

Залежно від значення коерцитивної сили ферромагнетики поділяють на м'які та жорсткі.

М'які ферромагнетики мають вузьку петлю гістерезису і малі значення коерцитивної сили. Для жорстких ферромагнетиків характерна широка петля гістерезису і відповідно великі значення коерцитивної сили. До м'яких ферромагнетиків належать залізо, пермалой та інші матеріали.

Площа петлі гістерезису характеризує ту роботу, яку треба здійснити для перемагнічування ферромагнетика.

Якщо за умовами роботи ферромагнетик має перемагнічуватись у змінному магнітному полі, то доцільніше використати м'які ферромагнетики, площа петлі гістерезису яких мала. З м'яких ферромагнетиків виготовляють осердя трансформаторів, генераторів, електродвигунів. Із жорстких ферромагнетиків, до яких належать сталь і її сплави, виготовляють постійні магніти.

Короткі висновки

- Провідники із струмом, тобто рухомі електричні заряди, взаємодіють через магнітне поле.
- Магнітне поле, як і електричне, є окремим випадком прояву єдиного електромагнітного поля.
- Основною характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції

$$B = \frac{M_{\max}}{\rho_c}$$

- Графічно магнітне поле зображують за допомогою ліній магнітної індукції. Лінії магнітної індукції завжди замкнені і охоплюють провідники із струмом. Поля із замкненими силовими лініями називають вихровими.
- На елемент провідника із струмом, розміщений у магнітному полі, діє сила, яка, за законом Ампера, дорівнює

$$F = BI \Delta l \sin \alpha.$$

- Напрямок сили визначають за правилом лівої руки.

- При переміщенні провідника із струмом у магнітному полі сили Ампера виконують роботу

$$A = I \Delta \Phi,$$

де $\Delta \Phi$ – зміна магнітного потоку:

$$\Delta \Phi = B \Delta S \cos \alpha.$$

- Магнітний потік характеризує кількість ліній магнітної індукції, що проходять через певну поверхню. Магнітний потік через замкнену поверхню дорівнює нулю.
- На рухому заряджену частинку в магнітному полі діє сила Лоренца

$$F_{\text{Л}} = QvB \sin \alpha.$$

- Ця сила змінює напрям швидкості, тобто викривляє траєкторію руху. Сила Лоренца не змінює кінетичної енергії частинки, тобто не виконує роботи.
- На рухому заряджену частинку одночасно в електричному і магнітному полях діє сила

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{E} + Q\mathbf{v}\mathbf{B}.$$

- Електричне поле змінює швидкість, а отже, і кінетичну енергію частинки, магнітне поле змінює лише напрям її дії.
- Зміна інтенсивності сонячного вітру, пов'язана зі спалахами на Сонці, призводить до магнітосферних бур. При цьому підсилюються полярні сійва, зростає потік частинок у радіаційних поясах, спотворюється магнітне поле Землі.
- Усі тіла в магнітному полі намагнічуються, тобто створюють магнітне поле.
- Величину, яка показує, у скільки разів магнітна індукція в середовищі більша або менша, ніж у вакуумі, називають магнітною проникністю:

$$\mu = B / B_0.$$

- За значенням магнітної проникності розрізняють діамантики ($\mu < 1$), парамагнетики ($\mu > 1$), феромагнетики ($\mu \gg 1$). У феромагнетиків μ залежить від зовнішнього магнітного поля.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що являє собою магнітне поле? Які його властивості? 2. У чому полягає гіпотеза Ампера? 3. Що називають вектором магнітної індукції? Якою характеристикою поля він є? 4. Що називають лініями магнітної індукції? Який напрям вони мають? 5. Які поля називають вихровими? 6. Сформулюйте принцип суперпозиції полів. 7. Як пов'язані вектори напруженості та індукції магнітного поля? 8. Сформулюйте закон Ампера. 9. Розкажіть про взаємодію струмів. 10. Що називають магнітним потоком? У яких одиницях його вимірюють? 11. Чому дорівнює робота щодо переміщення провідника із струмом у магнітному полі? 12. Яка сила діє з боку магнітного поля на рухомий заряд? Чому вона дорівнює? 13. Що називають питомим зарядом частинки? За допомогою яких приладів його визначають? 14. Які прискорювачі заряджених час-

тинок ви знаєте? 15. Розкажіть про магнітосферу Землі та її взаємодію з сонячним вітром. 16. Що називають магнітною проникністю середовища? 17. Розкажіть про природу діа- і парамагнетизму. 18. Які речовини називають феромагнетиками? Які їх властивості?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. По двох довгих паралельних проводах у протилежних напрямках проходять струми 90 і 70 А. Визначити напруженість магнітного поля, створюваного струмами в точці M , яка лежить на відстані 12 см від першого і 14 см від другого проводів, якщо відстань між проводами 10 см.

Дано: $I_1 = 90$ А; $I_2 = 70$ А; $R_1 = 12$ см = 0,12 м; $R_2 = 14$ см = 0,14 м; $d = 10$ см = 0,1 м.

Знайти: H .

Розв'язання. Припустимо, що проводи напрямлені перпендикулярно до площини рисунка (рис. 16.23). Струм I_1 йде від нас, за рисунком. Його позначено плюсом. Кожний струм створює в точці M напруженість [див. (16.10)]:

$$H_1 = I_1 / (2\pi R_1), \quad H_2 = I_2 / (2\pi R_2),$$

причому H_1 напрямлена перпендикулярно до R_1 за рухом стрілки годинника (гвинт вкручують), а H_2 – перпендикулярно до R_2 проти руху стрілки годинника (гвинт викручують). Напруженість поля в точці M дорівнює геометричній сумі напруженостей H_1 і H_2 :

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 - 2H_1H_2 \cos \beta}.$$

Обчислення:

$$H_1 = \frac{90 \text{ А}}{2\pi \cdot 0,12 \text{ м}} = 120 \text{ А/м}; \quad H_2 = \frac{70 \text{ А}}{2\pi \cdot 0,14 \text{ м}} = 80 \text{ А/м}.$$

З теореми косинусів визначимо $\cos \alpha$ (оскільки $\alpha = \beta$ як кути із взаємно перпендикулярними сторонами, $\cos \beta = \cos \alpha$):

$$\cos \alpha = \frac{R_1^2 + R_2^2 - d^2}{2R_1R_2} = \frac{(144 + 196 - 100) \text{ см}^2}{2 \cdot 12 \cdot 14 \text{ см}^2} = \frac{5}{7}.$$

Отже, $H = \sqrt{14\,400 + 6400 - 2 \cdot 120 \cdot 80 \cdot 5/7} \text{ А/м} = 84 \text{ А/м}.$

Задача 2. Паралельно пластинам плоского конденсатора створено однорідне магнітне поле напруженістю 3200 А/м. Між пластинами перпендикулярно до напрямку магнітного поля і паралельно пластинам (рис. 16.24) рухається електрон із швидкістю 5000 км/с. Визначити напруженість електричного поля між пластинами.

Дано: $H = 3200$ А/м; $v = 5000$ км/с = $5 \cdot 10^6$ м/с; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\mu = 1$.

Знайти: E .

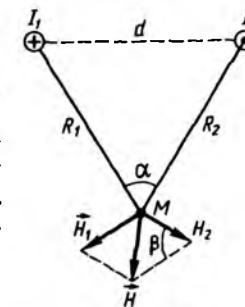


Рис. 16.23

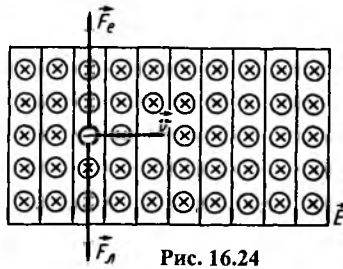


Рис. 16.24

Розв'язання. Напрямок напруженості магнітного поля перпендикулярний до рисунка (на рис. 16.24 показано хрестиками). На електрон, який рухається перпендикулярно до поля, за формулою Лоренца (16.18) діє сила $F_{\text{Л}} = Bve$, де $B = \mu\mu_0 H$ – індукція магнітного поля; μ – відносна магнітна проникність середовища; μ_0 – магнітна стала; e – заряд електрона.

Електричне поле діє на електрон із силою $F_{\text{ел}} = eE$, де E – напруженість електричного поля. Електрон рухається паралельно пластинам і перпендикулярно до магнітного поля тоді, коли ці сили однакові за модулем, але протилежні за напрямом: $Bve = Ee$. Звідси $E = Bv = \mu\mu_0 H v$.

Обчислення:

$$E = 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 3200 \text{ А/м} \cdot 4 \cdot 10^6 \text{ м/с} = 2 \cdot 10^4 \text{ В/м}.$$

Задача 3. Заряд із сталою швидкістю v влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до лінії індукції. Індукція поля 1 Тл. Протягом 10^{-4} с паралельно магнітному полю діє електричне поле напруженістю 100 В/м. Обчислити сталий крок спіральної траєкторії заряду.

Дано: $B = 1$ Тл; $t = 10^{-4}$ с; $E = 100$ В/м.

Знайти: x .

Розв'язання. Магнітна складова сили Лоренца діє нормально до напрямку швидкості (рис. 16.25). Напрямок сили можна визначити за правилом лівої руки. Якщо електричного поля немає, то ця сила змушує заряд рухатися по колу. Магнітна складова сили Лоренца $F_{\text{Л}} = BQv \sin(\mathbf{Bv})$ дорівнює доцентровій силі:

$$BQv = \frac{mv^2}{r}, \quad (1)$$

де B – індукція поля; Q – заряд; v – швидкість руху; m – маса заряду; r – радіус кола, по якому рухається заряд. У нашому випадку $\sin(\mathbf{Bv}) = 1$. Радіус кола обчислюємо з (1):

$$r = \frac{mv}{BQ}. \quad (2)$$

З урахуванням (2) період обертання заряду

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi m / (BQ). \quad (3)$$

Якщо електричне поле діє короткочасно, то виникає електрична складова сили Лоренца, напрямлена паралельно полю, $F_{\text{ел}} = QE$, де E – напруженість електричного поля. За час t дії $F_{\text{ел}}$ складова швидкості, напрямлена паралельно полю, зростає від нуля до v_1 . За імпульсом сили $F_{\text{ел}} t = mv_1$ визначимо

$$v_1 = F_{\text{ел}} t / m = QE t / m. \quad (4)$$

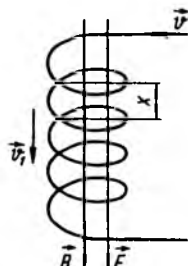


Рис. 16.25

Найвність складової швидкості v_1 , напрямленої перпендикулярно до v , означає, що заряд рухається по спіралі. Якщо рух установився, то крок спіралі x сталий. Його визначають з умови, що за один оберт заряд (за період T) зміщується на відстань кроку $x = v_1 T$. З (3) і (4) дістанемо

$$x = Q \frac{Et}{m} \frac{2\pi m}{BQ} = \frac{E}{B} 2\pi t.$$

Обчислення:

$$x = \frac{100 \text{ В/м} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{1 \text{ Тл}} = 0,06 \text{ м}.$$

Задача 4. Круглу рамку із струмом площею 1 см^2 закріплено паралельно магнітному полю, і на неї діє обертальний момент 10^{-5} Н·м при індукції 0,05 Тл. Рамку відкріпили, після повороту на 90° її кутова швидкість дорівнює 20 с^{-1} . Визначити струм, що проходить по рамці, і момент інерції рамки відносно діаметра.

Дано: $S = 1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$; $M = 10^{-5}$ Н·м; $B = 0,05$ Тл; $\omega = 20 \text{ с}^{-1}$.

Знайти: i ; I .

Розв'язання. Коли площина рамки розміщена паралельно полю, на неї діє максимальний обертальний момент $M = BiS$, де B – індукція поля; i – сила струму; S – площа контуру; добуток iS – магнітний момент. Звідси

$$i = M / (BS).$$

При повороті рамки виконується робота [див. (16.17)]

$$A = i\Delta\Phi,$$

де $\Delta\Phi = BS$ – зміна магнітного потоку, який пронизує рамку. Отже, $A = iBS$. Ця робота дорівнює зміні кінетичної енергії рамки:

$$iBS = \frac{1}{2} I\omega^2 - \frac{1}{2} I\omega_0^2 = \frac{1}{2} I\omega^2,$$

де I – момент інерції рамки; ω – кінцева кутова швидкість; $\omega_0 = 0$ – початкова кутова швидкість. Звідси

$$I = 2BiS / \omega^2.$$

Оскільки $M = BiS$, то

$$I = \frac{2M}{\omega^2}.$$

Обчислення:

$$i = \frac{10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}}{0,05 \text{ Тл} \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 2 \text{ А}; \quad I = \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}}{20^2 \text{ с}^{-2}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. По двох паралельних провідниках, розмічених на відстані 12 см один від одного, проходять струми по 30 А. Визначити напруженість магнітного поля в точці, яка лежить на відстані 10 см від кожного

провідника, якщо струми проходять: а) в одному напрямі; б) у протилежних напрямках.

2. По двох паралельних провідниках проходять струми 3 і 4 А. Відстань між провідниками 14 см. Знайти множину точок, в яких напруженість магнітного поля дорівнює нулю. Розглянути два випадки, коли струми проходять: а) в одному напрямі; б) у протилежних напрямках.

3. По ізолюваному коловому провіднику радіусом 10 см проходить струм 5 А. Перпендикулярно до площини кільця розміщений довгий провідник так, що він дотикається до колового провідника. Знайти напруженість магнітного поля в центрі колового провідника за умови, що струм у прямому провіднику дорівнює 15,7 А.

4. Під впливом однорідного магнітного поля в ньому з прискоренням $0,2 \text{ м/с}^2$ рухається прямолінійний алюмінієвий провідник перерізом 1 мм^2 . По провіднику проходить струм 5 А, його напрям перпендикулярний до поля. Обчислити індукцію поля.

5. В однорідному горизонтальному магнітному полі розміщений у рівновазі перпендикулярно до поля горизонтальний прямолінійний алюмінієвий провідник із струмом 10 А. Визначити індукцію поля, якщо радіус провідника дорівнює 2 мм.

6. У магнітне поле, утворене у вакуумі, перпендикулярно до ліній індукції влітають електрони з енергією 1 еВ. Напруженість поля 1000 А/м . Обчислити силу Лоренца і радіус траєкторії руху електронів.

7. Протони в магнітному полі з індукцією $5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ рухаються у вакуумі по дузі кола радіусом 50 см. Яку прискорюючу різницю потенціалів вони повинні були пройти?

8. Протон рухається у вакуумі у взаємно перпендикулярних електричному і магнітному полях з відповідними напруженостями 1200 В/м і 300 А/м . Які мають бути напрям і швидкість протона, щоб траєкторія його руху була прямолінійна?

9. Заряд рухається у вакуумі прямолінійно із швидкістю 105 м/с у взаємно перпендикулярних магнітному і електричному полях. Яке має бути відношення напруженостей цих полів, щоб такий рух відбувався? Як направлена швидкість руху заряду?

ГЛАВА 17

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

§ 152. Електромагнітна індукція

Електромагнітна індукція

Взаємний зв'язок електричних і магнітних полів установив англійський фізик М. Фарадей. Електричні струми створюють навколо себе магнітне поле. А чи не може магнітне поле спричинити електричний струм?

У 1831 р. Фарадей експериментально встановив, що зі зміною магнітного потоку, який пронизує замкнений контур, у ньому виникає електричний струм. Це явище назвали *електромагнітною індукцією* ("індукція" означає "наведення").

Явище електромагнітної індукції Фарадей досліджував за допомогою двох ізолюваних одна від одної дротяних спіралей, намотаних на дерев'яну катушку. Одну спіраль було з'єднано з гальванічною батареєю, а другу – з гальванометром, який реєструє слабкі струми. У моменти замикання і розмикання кола першої спіралі стрілка гальванометра в колі другої спіралі відхилялась.

Виконавши безліч дослідів, Фарадей установив, що в замкнених провідних контурах електричний струм виникає тільки тоді, коли вони розміщені в змінному магнітному полі, незалежно від того, як змінюється з часом потік індукції магнітного поля. *Струм, який виникає під час явища електромагнітної індукції, називають індукційним*. Точніше кажучи, під час руху контуру в магнітному полі генерується не певний струм (який залежить від опору), а певна ЕРС.

Закон Фарадея

Розглянемо, як виникає ЕРС індукції, а отже, й індукційний струм. Нехай провідник без струму завдовжки l рухається в магнітному полі зі швидкістю v (рис. 17.1). Магнітне поле однорідне. Вектор магнітної індукції напрямлений перпендикулярно до площини рисунка від нас. Якщо провідник рухається праворуч, вільні електрони, які містяться в ньому, також рухатимуться праворуч, тобто виникає конвекційний струм. Напрямок цього струму обернений до напрямку руху електронів. На кожний рухомий електрон з боку магнітного поля діє сила Лоренца $F_{Л}$. Заряд електрона негативний. Тому сила Лоренца направлена вниз. Під дією цієї сили електрони мають рухатися вниз, у кожній частині провідника l нагромаджуються негативні заряди, а у верхній – позитивні. Утворюється різниця потенціалів $\phi_1 - \phi_2$, у провіднику виникає електричне поле напруженістю E , яке перешкоджає дальшому переміщенню електронів.

У момент, коли сила $F_{ел} = eE$, яка діє на заряди з боку цього електричного поля, дорівнюватиме за модулем силі $F_{Л} = evB \sin \alpha$, яка діє на заряди з боку маг-

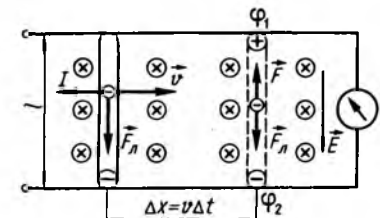


Рис. 17.1

нітного поля, тобто при $eE = evB \sin \alpha$, або $E = vB \sin \alpha$, переміщення зарядів припиняться.

Напруженість електричного поля E в рухомому провіднику завдовжки l і різниці потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$ пов'язані між собою співвідношенням

$$\varphi_1 - \varphi_2 = El,$$

або

$$\varphi_1 - \varphi_2 = vBl \sin \alpha. \quad (17.1)$$

Якщо такий провідник замкнути, то по колу проходить струм. Отже, на кінцях провідника індукуються ЕРС

$$\xi_{\text{інд}} = vBl \sin \alpha. \quad (17.2)$$

Докладніше вивчення електромагнітної індукції показало, що ЕРС індукції в якому-небудь замкненому контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, яка обмежена цим контуром, взяту з протилежним знаком. Отже,

$$\xi_{\text{інд}} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (17.3)$$

Співвідношення (17.3) виражає закон електромагнітної індукції або закон Фарадея:

ЕРС індукції дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром.

Правило Ленца

Знак мінус у формулі (17.3) відображає правило Ленца:

індукційний струм завжди напрямлений так, що його дія протилежна дії причини, яка викликає струм.

Якщо магнітний потік зростає:

$$\frac{d\Phi}{dt} > 0, \text{ то } \xi_{\text{інд}} < 0,$$

тобто ЕРС індукції спричинює струм такого напрямку, при якому його магнітне поле зменшує магнітний потік через контур.

Якщо магнітний потік зменшується:

$$\frac{d\Phi}{dt} < 0, \text{ то } \xi_{\text{інд}} > 0,$$

тобто магнітне поле індукційного струму збільшує спадний магнітний потік через контур.

ЕРС індукції

Електрорушійна сила в колі – це результат дії *сторонніх сил*, тобто сил неелектричного походження. У процесі руху провідника в магнітному полі роль сторонніх сил виконує сила Лоренца, під дією якої заряди розділяються, внаслідок чого на кінцях провідника виникає різниця потенціалів. ЕРС індукції в провіднику характеризує роботу щодо переміщення одиничного позитивного заряду вздовж провідника.

Якщо замкнений контур має N послідовно з'єднаних витків (наприклад, котушка або соленоїд), то ЕРС індукції дорівнює сумі ЕРС кожного витка:

$$\xi_{\text{інд}} = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (17.4)$$

Якщо замкнений провідний контур має опір R , то сила індукційного струму визначається за формулою

$$I_{\text{інд}} = \frac{\xi_{\text{інд}}}{R}. \quad (17.5)$$

При цьому в контурі проходить кількість електрики

$$dQ = -\frac{d\Phi}{R}. \quad (17.6)$$

Явище електромагнітної індукції лежить в основі дії *електричних генераторів*. Якщо рівномірно обертати дрютяну рамку в однорідному магнітному полі, то виникає індукований струм, який періодично змінює свій напрям. Навіть одинична рамка, яка обертається в однорідному магнітному полі, є генератором змінного струму. Складніші генератори звичайно є поліпшеними варіантами такого пристрою.

§ 153. Вихрове електричне поле

Як ми вже побачили, змінне магнітне поле породжує наведене (*індуковане*) електричне поле. Якщо магнітне поле постійне, то індуковане поле не виникає. Отже, індуковане електричне поле не пов'язане з зарядами, як це буває в електростатичному полі; його силові лінії не починаються і не закінчуються на зарядах, а замкнені самі на себе, подібно до силових ліній магнітного поля. Це означає, що

індуковане електричне поле, як і магнітне, є вихровим.

Якщо нерухомий провідник помістити в змінне магнітне поле, то в ньому індукуються ЕРС. Електричне поле, яке індукується змінним магнітним полем, надає електронам напрямленого руху; виникає індукований електричний струм. При цьому провідник є тільки індикатором індукованого

електричного поля. Поле надає руху вільним електронам у провіднику і тим самим проявляє себе. Тепер можна твердити, що й без провідника це поле існує, маючи запас енергії.

Суть явища електромагнітної індукції не стільки у виникненні індукованого струму, скільки у виникненні вихрового електричного поля.

Це фундаментальне положення електродинаміки встановив Максвелл як узагальнення закону електромагнітної індукції Фарадея.

На відміну від електростатичного поля індуковане електричне поле є потенціальним, бо робота, яка виконується в індукованому електричному полі, при переміщенні одиничного позитивного заряду по замкненому контуру дорівнює ЕРС індукції, а не нулю.

Напрямок вектора напруженості вихрового електричного поля встановлюють за законом електромагнітної індукції Фарадея і правила Ленца.

Оскільки вихрове електричне поле існує і без провідника, то його можна застосовувати для прискорення заряджених частинок до швидкостей, порівнянних із швидкістю світла. Саме на використанні цього принципу ґрунтується дія прискорювачів електронів – *бетатронів*.

§ 154. Вихрові струми

Якщо масивний провідник, опір якого малий, рухається в магнітному полі, то в ньому виникають короткозамкнені індуковані струми. Ці струми, сила яких може досягати великих значень, *вихрові*. Відкрив і дослідив ці струми французький фізик Ж. Фуко, ім'ям якого їх і назвали (струми Фуко). Напрямок вихрових, як і всяких індукованих струмів, визначають за правилом Ленца, тобто їх напрям такий, що створюване ними магнітне поле протидіє руху провідника. Розглянемо такий експеримент. Нехай масивний маятник *P* (рис. 17.2), виготовлений із суцільного куска алюмінію або міді, коливається між полюсами потужного електромагніта *M*. Якщо електромагніт не ввімкнений, то маятник, перш ніж зупинитися, виконає досить багато коливань. Якщо ввімкнути струм, то маятник, дійшовши до електромагніта, різко гальмується і зупиняється. Це відбувається тому, що в ньому виникає індукований струм, який, за правилом Ленца, створює магнітне поле, що протидіє руху маятника. Якщо в цьому маятнику

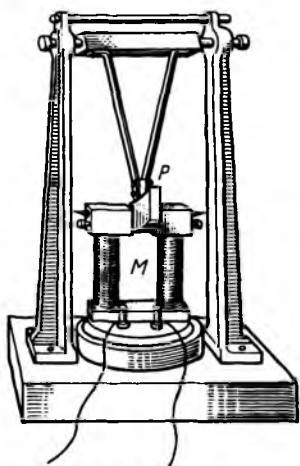


Рис. 17.2

зробити прорізи, то вихрові струми зменшаться і маятник гальмуватиметься слабше.

Гальмівну дію вихрових струмів *використовують* для гасіння коливань стрілок в електровимірювальних приладах.

Сила вихрового струму *залежить* від форми куска металу, який рухається в магнітному полі, від властивостей матеріалу, з якого його виготовлено, та від швидкості зміни магнітного потоку. Вихрові струми виникають і в нерухомих провідниках, розміщених у змінному магнітному полі. Вихрові струми можуть нагрівати провідники, в яких вони виникають. Цю властивість використовують в індукційних печах для значного нагрівання або навіть плавлення металів.

§ 155. Значення магнітних полів для явищ, які відбуваються на Сонці

Сонячна активність

Під сонячною активністю розуміють періодичне виникнення сонячних плям, факелів, спалахів, протуберанців, збільшення випромінювання в ультрафіолетових і рентгенівських областях спектра, зростання корпускулярного випромінювання і т. д. Ці явища тісно пов'язані між собою і, як правило, виникають разом у деякій активній області Сонця. Період сонячної активності становить приблизно одинадцять років.

Значення магнітних полів

Циклічність *сонячної активності* пов'язана з магнітними полями. На початку циклу плям майже немає. Потім плями з'являються далеко від сонячного екватора, поступово їх кількість збільшується, і вони виникають дедалі ближче до екватора. Через три-чотири роки настає максимум сонячних плям, за якого на Сонці буває найбільша кількість активних утворень. Потім сонячна активність поступово спадає, і приблизно через одинадцять років настає мінімум.

Сонячна активність пов'язана із складною взаємодією іонізованої речовини Сонця і його загального магнітного поля. Результати цієї взаємодії – періодичне підсилення магнітних полів, що призводить до появи сонячних плям та інших активних утворень.

Головна особливість *сонячних плям* – наявність у них магнітних полів, напруженість яких досягає порядку $(3 \div 4) \cdot 10^5$ А/м. Як правило, серед групи плям є дві особливо великі плями: одна – на західному, а друга – на

східному боці групи. Магнітна полярність їх протилежна. Протягом певного циклу в кожній з півкуль Сонця полярності всіх провідних плям, як правило, однакові, але в різних півкулях вони протилежні. Через кожні одинадцять років усі полярності в парах плям змінюються на протилежні.

Магнітні поля мають дуже важливе значення у *сонячній атмосфері*, великою мірою впливаючи на рух плазми, її густину і температуру. Зокрема, збільшення яскравості фотосфери у факелах і значне її зменшення (до 10 раз) в області плям спричинені відповідно підсиленням конвективних рухів у слабкому магнітному полі і значним їх подавленням при великій напруженості магнітного поля.

У короні спостерігаються ще грандіозніші за розмірами активні утворення – протуберанці. Форма протуберанців і їх рух пов'язані з магнітними полями, які проникають із фотосфери в корону.

§ 156. Самоіндукція

Самоіндукція

Розглянемо коло (рис. 17.3), яке складається з батареї E , реостата R , котушки індуктивності L , гальванометра G і ключа K .

Якщо коло замкнене, то по гальванометру G і котушці індуктивності L проходить електричний струм. У момент розмикання кола стрілка гальванометра різко відхиляється у протилежний бік. Причина цього в тому, що при розмиканні кола магнітний потік у котушці зменшується, спричинюючи в ній ЕРС самоіндукції. Струм самоіндукції I_{ci} , за законом Ленца, перешкоджає спаданню магнітного потоку, тобто він напрямлений у котушці так само, як і спадний струм I_2 . Цей струм цілком проходить через гальванометр, але його напрям протилежний напрямку I_1 . *Явище виникнення індукovanого струму в колі внаслідок зміни струму в ньому називають самоіндукцією.*

Самоіндукція – це окремий випадок явищ електромагнітної індукції.

З'ясуємо, від чого залежить ЕРС самоіндукції. Індукція Φ пропорційна силі струму в котушці, тому магнітний потік, який виникає в котушці, також пропорційний силі струму:

$$\Phi = LI. \quad (17.7)$$

Коефіцієнт пропорційності L називають *індуктивністю контуру*.

Із зміною власного магнітного потоку в контурі, згідно з законом електромагнітної індукції, виникає ЕРС самоіндукції:

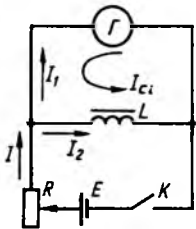


Рис. 17.3

$$\mathcal{E}_{ci} = -d\Phi / dt. \quad (17.8)$$

Підставивши у вираз (17.8) формулу (17.7), знаходимо, що ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни сили струму:

$$\mathcal{E}_{ci} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (17.9)$$

Індуктивність

З формули (17.9) випливає, що *індуктивність – це фізична величина, яка чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, яка виникає в контурі при зміні сили струму на 1 А за 1 с.* Індуктивність L контуру залежить від його геометричної форми, розмірів і магнітних властивостей середовища, в якому він розміщений. Наприклад, для соленоїда завдовжки l і площею перерізу витка S у вакуумі або повітрі

$$L = \mu_0 N^2 S / l, \quad (17.10)$$

де N – загальна кількість витків соленоїда; μ_0 – магнітна стала.

Урахувавши, що об'єм соленоїда $V = lS$, а $n = N/l$ – кількість витків, які припадають на одиницю довжини, формулу (17.10) можна переписати у вигляді

$$L = \mu_0 n^2 V. \quad (17.11)$$

З формули (17.7) випливає, що $L = \Phi / I$. З цієї формули можна визначити одиницю індуктивності – *генрі* (Гн):

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / \text{А} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А}.$$

Як випливає з дослідів, індуктивність усякого контуру залежить від властивостей середовища, в якому розміщений контур. У цьому можна впевнитись на досліді, схему якого зображено на рис. 17.3. Якщо в котушку L внести залізне осердя, то сила струму самоіндукції зростає в багато разів. Це свідчить про те, що збільшилась індуктивність котушки.

Величина, яка дорівнює відношенню індуктивності L контуру в одному середовищі до індуктивності L_0 контуру у вакуумі, є магнітною проникністю середовища:

$$\mu = L / L_0. \quad (17.12)$$

Магнітна проникність, яка характеризує магнітні властивості речовини, – величина безрозмірна. З формули (17.11), (17.12) випливає, що $L = \mu \mu_0 n^2 V$.

Взаємна індукція

Якщо контур, який складається з провідника 2 (рис. 17.4), помістити поблизу контуру 1 із струмом, що змінюється з часом, то в провіднику 2 ми зареєструємо індуковане електричне поле. Явище виникнення індукованого електричного поля в провідниках, розміщених поблизу інших провідників, по яких проходить змінний у часі електричний струм, називають *взаємною індукцією*. ЕРС взаємної індукції визначимо за законом електромагнітної індукції:

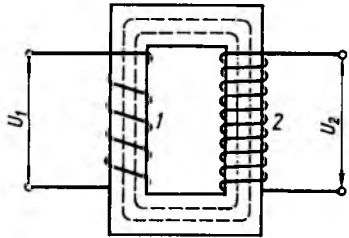


Рис. 17.4

$\varepsilon_{21} = -d\Phi_{21}/dt.$ (17.13)

У цій формулі $d\Phi_{21}$ – потік магнітної індукції, який створюється магнітним полем струму I_1 , що проходить по контуру 1 і пронизує площу поверхні, яку охоплює контур 2.

Магнітний потік $d\Phi_{21}$ пропорційний струму I_1 , що проходить по першому контуру:

$$\Phi_{21} = L_{21}I_1. \quad (17.14)$$

Коефіцієнт пропорційності L_{21} називають *взаємною індуктивністю контурів 1 і 2*; L_{21} залежить від розмірів, геометричної форми, відносної магнітної проникності середовища і взаємного розміщення контурів. З формул (17.7) і (17.14) видно, що L_{21} вимірюють тими самими одиницями, що й індуктивність, тобто в генрі (Гн).

На явищі взаємної індукції ґрунтується дія *трансформатора* – пристрою, призначеного для перетворення напруги і сили змінного струму.

§ 157. Енергія магнітного поля

Енергія магнітного поля струму

Розглянемо коло (рис. 17.5), яке складається з батареї E , резистора R , соленоїда L , ключа K . Якщо ключ буде в положенні 1, то через соленоїд проходить постійний за значенням і напрямом струм I_0 . Усякий електричний струм завжди оточений магнітним полем. Виникає запитання: де локалізована власна енергія струму – всередині провідів, по яких дрейфують електрони, або в магнітному полі, тобто в середо-

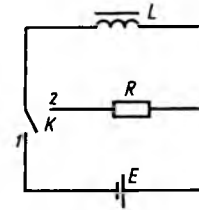


Рис. 17.5

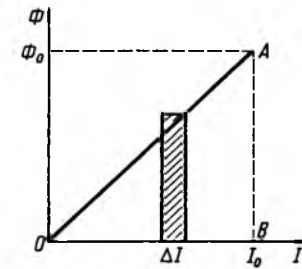


Рис. 17.6

вищі, яке оточує струми? Щоб дати відповідь на це запитання, розімкнемо коло і переведемо ключ у положення 2. У цьому разі через резистор R деякий час ітиме струм, який зменшується до нуля; він утримується струмом самоіндукції, і енергія магнітного поля струму перетворюється переважно в енергію молекулярно-теплого руху – нагрівання опору. Отже, зменшення енергії магнітного поля можна обчислити як роботу цього струму: $\Delta W = A$. Оскільки власний магнітний потік $\Phi = LI$, який пронизує соленоїд, пропорційний силі струму, то залежність Φ від I можна подати у вигляді, зображеному на рис. 17.6. Площа заштрихованої вузької смужки з основою ΔI відповідає елементарній роботі dA , яку виконує струм, при зміні його значення на dI . Повна робота A , яку виконує струм, дорівнює сумі ментарних робіт dA і чисельно дорівнює площі трикутника OAB :

$$A = \Phi_0 I_0 / 2. \quad (17.15)$$

Врахувавши, що $\Phi_0 = LI_0$, формулу (17.15) можна переписати у вигляді

$$A = LI_0^2 / 2. \quad (17.16)$$

У процесі виконання цієї роботи енергія магнітного поля зменшується до нуля (оскільки струм спадає від значення до нуля). Оскільки при цьому в навколишніх тілах, які оточують електричне коло, жодних змін не відбувається, робимо висновок:

магнітне поле є носієм енергії.

Отже, власна *енергія струму* дорівнює енергії магнітного поля:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (17.17)$$

Формула (17.17) є правильною для будь-якого контуру, вона характеризує залежність енергії магнітного поля струму від сили струму в контурі і його індуктивності.

Об'ємна густина енергії

Визначимо енергію магнітного поля через фізичні величини, які характеризують його. Розглянемо випадок нескінченно довгого соленоїда, індуктивність якого визначається формулою $L = \mu\mu_0 n^2 V$. При цьому формула (17.17) набуває вигляду

$$W_M = \mu\mu_0 n^2 V I^2 / 2. \quad (17.18)$$

Враховавши, що напруженість поля всередині нескінченно довгого соленоїда $H = In$, дістанемо

$$W_M = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V. \quad (17.19)$$

Визначимо енергію через індукцію магнітного поля $B = \mu\mu_0 H$:

$$W_M = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V. \quad (17.20)$$

Оскільки магнітне поле соленоїда однорідне і локалізоване всередині соленоїда, то енергія розподілена по об'єму соленоїда зі сталою густиною $\omega = W_M / V$. Враховавши (17.19) і (17.20), дістанемо

$$\omega = \mu\mu_0 H^2 / 2, \quad \omega = B^2 / (2\mu\mu_0). \quad (17.21)$$

Порівнюючи вирази для власних енергій конденсатора $W_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$ і

соленоїда $W_M = \frac{1}{2} LI^2$ з потенціальною $W_n = \frac{1}{2} kx^2$ і кінетичною

$W_k = \frac{1}{2} mv^2$ енергіями, можна провести аналогію між електричними і ме-

ханічними явищами. Так, для електричного поля величина $1/C$, обернена до ємності, аналогічна пружності пружини, а для магнітного поля індуктивність L аналогічна масі тіла m . Отже,

індуктивність є мірою "інертності" контуру відносно зміни в ньому струму.

Короткі висновки

- Явище виникнення ЕРС у провідному контурі, який перебуває в змінному магнітному полі або рухомому постійному магнітному полі, називається електромагнітною індукцією. ЕРС індукції, за законом електро-

магнітної індукції, дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром,

$$\mathcal{E}_{\text{нд}} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Знак мінус відображає правило Ленца: індукційний струм завжди направлений так, що його дія протилежна дії причини, яка його зумовила.

- Вихрове електричне поле породжується змінним магнітним. Його силові лінії завжди замкнені, як і силові лінії магнітного поля. Суть явища електромагнітної індукції не стільки в утворенні індукційного струму, скільки у виникненні вихрового електричного поля. На відміну від електростатичного поля вихрове електричне поле – непотенціальне.
- В усіх процесах, які відбуваються на Сонці, – спалахах, появі плям, протуберанців, сонячного вітру – найважливішу роль відіграє магнітне поле.
- Окремим випадком явища електромагнітної індукції є самоіндукція. Самоіндукція – це виникнення ЕРС у провідному контурі, якщо в ньому змінюється сила струму:

$$\mathcal{E}_{\text{сі}} = -L \frac{dI}{dt},$$

де L – індуктивність, що залежить від геометричної форми, розмірів контуру і магнітних властивостей середовища, в якому він розміщений:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V.$$

Магнітне поле соленоїда однорідне і локалізоване всередині соленоїда. Його енергія

$$W_M = \frac{LI^2}{2}.$$

Об'ємна густина енергії магнітного поля

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

Порівнявши вирази

$$W_e = \frac{Q^2}{2C} \quad \text{і} \quad W_M = \frac{LI^2}{2}$$

для енергії електричного і магнітного полів з потенціальною і кінетичною енергіями

$$W_n = \frac{kx^2}{2} \quad \text{і} \quad W_k = \frac{mv^2}{2},$$

можна провести аналогію між електромагнітними і механічними явищами. Для електричного поля величина $1/C$ аналогічна пружності пружини k , а для магнітного поля індуктивність L аналогічна масі тіла m .

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що називають явищем електромагнітної редукції? 2. Сформулюйте закон електромагнітної індукції. 3. У чому полягає правило Ленца? 4. Що таке вихрове електричне поле? 5. Які струми називають вихровими?

6. Яке значення магнітного поля в процесах, що відбуваються на Сонці? 7. Що називають явищем самоіндукції? 8. Що таке індуктивність контуру? Від чого вона залежить? 9. Як розподілена енергія магнітного поля соленоїда в просторі? 10. Що характеризує об'ємна густина енергії?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл розміщена прямокутна рамка $KLMN$, рухома сторона якої LM переміщується зі швидкістю 10 м/с перпендикулярно до ліній індукції поля (рис. 17.7). Визначити ЕРС індукції, яка виникає в контурі $KLMN$. Визначити напрям індукційного струму. Довжина сторони рамки LM дорівнює 0,1 м.

Дано: $v = 10$ м/с; $l = 0,1$ м; $B = 0,1$ Тл.

Знайти: \mathcal{E} .

Розв'язання. У процесі руху провідника LM площа рамки збільшується, магнітний потік, який пронизує рамку, зростає і, отже, за законом Фарадея, в рамці виникає ЕРС індукції

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Рамку пронизує магнітний потік

$$\Phi = BS = Blx. \quad (2)$$

Під час руху провідника LM змінюється x , а B і l – сталі. Урахувавши це, підставимо вираз (2) у формулу (1):

$$\mathcal{E} = -Bl \frac{dx}{dt}. \quad (3)$$

Але $dx/dt = v$ – швидкість руху провідника LM , отже,

$$\mathcal{E} = -Blv.$$

Обчислення:

$$\mathcal{E} = -0,1 \text{ Тл} \cdot 0,1 \text{ м} \cdot 10 \text{ м/с} = -0,1 \text{ В}.$$

Знак мінус показує, що ЕРС індукції діє в контурі $KLMN$ в такому напрямі, при якому індукційний струм напрямлений у контурі проти руху стрілки годинника.

Задача 2. Соленоїд без осердя з одношаровою обмоткою з дроту діаметром 0,5 мм має довжину 0,6 м і поперечний переріз $0,006 \text{ м}^2$. Який струм проходить по обмотці при напрузі 10 В, якщо за 0,001 с в обмотці виділяється

кількість теплоти, яка дорівнює енергії поля всередині соленоїда? Поле вважати однорідним.

Дано: $d = 0,5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $l = 0,6 \text{ м}$; $S = 0,006 \text{ м}^2$; $U = 10 \text{ В}$; $t = 0,001 \text{ с}$; $\mu = 1$; $\mu_0 = 12,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Знайти: I .

Розв'язання. Під час проходження струму I при напрузі U в обмотці за час t виділиться теплота

$$Q = IUt. \quad (1)$$

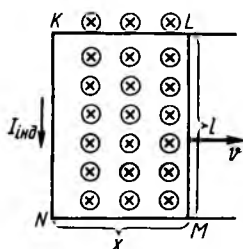


Рис. 17.7

Енергія поля всередині соленоїда [див. (17.19)]

$$W = 1/2 \mu_0 H^2 SI, \quad (2)$$

де S – переріз; l – довжина соленоїда.

Напруженість поля $H = In$. Тут $n = \frac{N}{l} = \frac{N}{Nd} = \frac{1}{d}$ – густина витків со-

леноїда; N – кількість витків; d – діаметр дроту. Якщо витки щільно прилягають один до одного, то $l = Nd$. Підставивши в (2) значення H і прирівнявши за умовою праві частини (1) і (2), дістанемо

$$IUt = \frac{\mu_0 I^2 SI}{2d^2}.$$

Звідси

$$I = \frac{2Utd^2}{\mu_0 SI}.$$

Обчислення:

$$I = \frac{2 \cdot 10 \text{ В} \cdot 0,001 \text{ с} \cdot 25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2}{1 \cdot 12,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,006 \text{ м}^2 \cdot 0,6 \text{ м}} = 1,1 \text{ А}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

- В однорідному магнітному полі індукцією $6 \cdot 10^{-3}$ Тл рухається провідник завдовжки 15 м зі швидкістю 10^{-4} м/с перпендикулярно до поля і самого себе. Визначити ЕРС, яка індукується в провіднику.
- В однорідному магнітному полі напруженістю 3980 А/м (повітря) зі швидкістю 20 м/с перпендикулярно до поля переміщується прямий провід завдовжки 40 см і опором 10 Ом. Який струм проходив би по провіднику, якщо б його замкнули? (Вплив замикаючого проводу не враховувати.)
- З якою швидкістю рухається перпендикулярно до однорідного магнітного поля напруженістю 500 А/м ($\mu = 1$) прямий провідник завдовжки 30 см і опором 0,1 Ом? При замиканні провідника в ньому проходив би струм 0,01 А. (Вплив замикаючого проводу не враховувати.)
- Провідник завдовжки 50 см, по якому проходить струм 1 А, рухається перпендикулярно до магнітного поля напруженістю 20 А/м ($\mu = 1$) зі швидкістю 50 км/год. Визначити роботу переміщення провідника за 1 год руху.
- Провідник завдовжки 0,6 м, опором 0,025 Ом рухається поступально в площині, перпендикулярній до магнітного поля з індукцією $0,5 \cdot 10^{-3}$ Тл. По провіднику проходить струм 4 А. Швидкість руху провідника 0,8 м/с. Яка потужність більша: затрачена на переміщення провідника в магнітному полі або на його нагрівання? У скільки разів?

РОЗДІЛ 4

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

У цьому розділі розглянуто широке коло питань, пов'язаних з коливаннями і хвилями. Вчення про коливання і хвилі у фізиці виділяють окремо. Це зумовлено спільністю закономірностей коливальних процесів різної природи і методів їх дослідження. Механічні, акустичні, електромагнітні коливання і хвилі розглядаються з єдиної точки зору.

Коливання притаманні всім явищам природи. Пульсують зорі і обертаються планети Сонячної системи, у земній атмосфері та іоносфері циркулюють потоки заряджених і нейтральних частинок, вітри збуджують коливання і хвилі на поверхні водоймищ. Всередині будь-якого живого організму безперервно відбуваються процеси, які ритмічно повторюються, наприклад биття серця.

Види хвиль, які дуже важливі і часто відбуваються, – це пружні хвилі, окремим випадком яких є звук; хвилі на поверхні рідини; електромагнітні хвилі.

Основна властивість усіх хвиль незалежно від їх природи в тому, що хвилі переносять енергію і не переносять речовину. Хвильові процеси є майже в усіх областях фізичних явищ, тому їх вивчення має велике значення.

ГЛАВА 18

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ

§ 158. Коливальний рух

Коливальними називають рух або процеси, які точно або приблизно повторюються через однакові проміжки часу.

Серед процесів, які повторюються, важливе значення мають періодичні рухи.

Рух називають періодичним, якщо значення фізичних величин (наприклад, зміщення або швидкості), які змінюються в процесі руху, повторюються через однакові проміжки часу. Прикладами періодичного руху можуть бути рух планети навколо Сонця, рух поршня в циліндрі двигуна внутрішнього згоряння тощо.

Коливальну систему незалежно від її фізичної природи називають *осцилятором*. Прикладом осцилятора може бути коливний тягарець, підвішений на пружині або нитці.

Повним коливанням називають один закінчений цикл коливального руху, після якого воно повторюється в тому самому порядку.

Характеристики коливального руху

Час, протягом якого здійснюється повне коливання, називають його періодом (T).

Частотою ν періодичних коливань називають кількість повних коливань, які здійснюються за одиницю часу:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (18.1)$$

Частоту коливань вимірюють у герцах.

Герц – це частота коливань, період яких дорівнює 1 с: $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$.

Циклічною або коловою частотою періодичних коливань називають кількість повних коливань, які здійснюються за 2π с:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (18.2)$$

Циклічну частоту ω вимірюють у *радіанах на секунду (рад/с)*.

Для тіл характерне існування положення, яке називають положенням *стійкої рівноваги*; у цьому положенні тіло або точка може бути доти, поки зовнішня сила не виведе їх з цього стану. Вивести тіло з цього стану можна завдяки роботі зовнішньої сили, надавши йому надлишкової енергії. Тіло, виведене із стану рівноваги і залишене само на себе, здійснює коливання навколо положення рівноваги – такі коливання називають *власними*, або *вільними*. Власні коливання – не тільки найбільш поширені, а найважливіші з точки зору теорії коливань, оскільки умови виникнення і характер усіх інших типів коливань дуже залежать від характеру власних коливань.

Будь-який коливальний рух характеризується *амплітудою A* – значенням максимального відхилення коливної точки від положення рівноваги.

Коливання точки, які відбуваються із сталою амплітудою, називають незгасаючими, а коливання з амплітудою, яка поступово зменшується, – згасаючими.

Якщо положення тіла (точки) в будь-який момент часу можна описати єдиним параметром, то кажуть, що тіло (точка) має один степінь вільності (так, наприклад, коливання пружинного маятника, які відбуваються в заданій площині, можна описати зміною однієї координати).

§ 159. Гармонічні коливання

Гармонічні коливання

Серед усіх різноманітних форм коливань важливе місце належить гармонічним коливанням. *Гармонічні коливання – це найпростіші періодичні коливання.* Більшість коливань, які трапляються на практиці, складні. З курсу математики відомо (теорема Фур'є), що будь-яке складне періодичне коливання є сумою найпростіших гармонічних коливань (гармонік).

Гармонічні коливання – єдиний тип коливань, форма яких не спотворюється в процесі відтворення.

Коливання, під час яких коливна величина змінюється з часом за законом синуса або косинуса, називають гармонічними.

Гармонічні коливання величини s описуються рівнянням

$$s = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (18.3)$$

де A – максимальне значення коливної величини – амплітуда. Оскільки синус змінюється в межах від $+1$ до -1 , то s може набувати значень від $+A$ до $-A$.

На рис. 18.1 подано графік гармонічного коливання. По горизонтальній осі відкладено час t , по вертикальній – зміщення s .

Аргумент синуса $(\omega_0 t + \varphi_0)$ називають *фазою коливань*. Фаза коливань визначає зміщення в момент часу t . Початкова фаза φ_0 визначає зміщення тіла в момент початку відліку часу ($t=0$).

Фаза коливань – це кутова міра часу, який минув від початку коливань.

Якщо початкова фаза коливань $\varphi_0 = 0$, то фазі $\varphi = 2\pi$ відповідає $t = T$, фазі $\pi/2$ відповідає $T/4$ і т. д.

Метод векторних діаграм

Гармонічне коливання можна задати вектором, довжина якого дорівнює амплітуді A коливання, а напрям утворює з віссю x кут, що дорівнює початковій фазі коливання. Якщо надати цьому вектору обертання з кутовою швидкістю ω_0 , то проекція кінця вектора на вісь X переміщатиметься в межах від $+A$ до $-A$, а коливна величина змінюватиметься з часом за законом $s = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, здійснюючи гармонічне коливання (рис. 18.2, а).

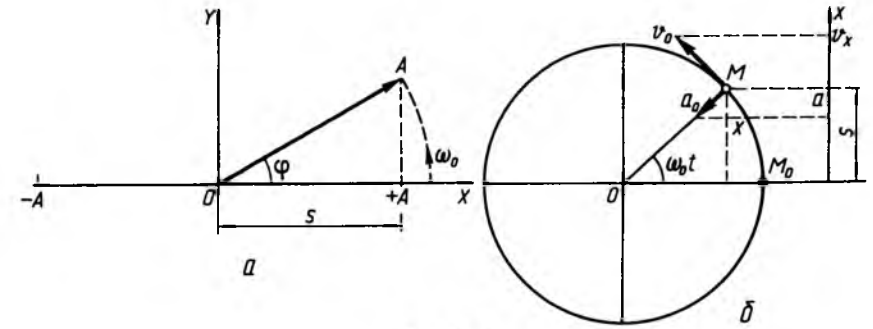


Рис. 18.2

Нехай точка M рівномірно рухається по колу радіуса A у напрямі проти руху стрілки годинника із сталою кутовою швидкістю ω_0 (рис. 18.2, б). Якщо в початковий момент часу $t=0$ ця точка була в положенні M_0 і її початкова фаза дорівнювала нулю, то через час t , здійснивши кутове переміщення $\omega_0 t$, вона буде в положенні M . Проекція точки M на вісь X становитиме

$$s = A \sin \omega_0 t.$$

З цього рівняння випливає, що в процесі обертання точки M по колу її проекція на вісь X здійснює гармонічне коливання навколо точки O .

Швидкість коливання

Проекція вектора швидкості v_0 точки M на вісь x (рис. 18.3)

$$v_x = \frac{ds}{dt} = A\omega_0 \cos \omega_0 t, \quad v_x = \omega_0 \cos \omega_0 t. \quad (18.4)$$

Між лінійною v_0 і кутовою ω_0 швидкостями існує такий зв'язок: $v_0 = A\omega_0$, де A – радіус кола.

Враховавши, що $\cos \omega_0 t = \sin(\omega_0 t + \pi/2)$, рівняння (18.4) можна записати у вигляді

$$v_x = A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \pi/2). \quad (18.5)$$

З рівняння (18.5) випливає, що швидкість коливної точки M змінюється, як і зміщення, за синусоїдним законом, причому максимального значення $v_{\max} = A\omega_0$ швидкість досягає при $\sin(\omega_0 t + \pi/2) = 1$.

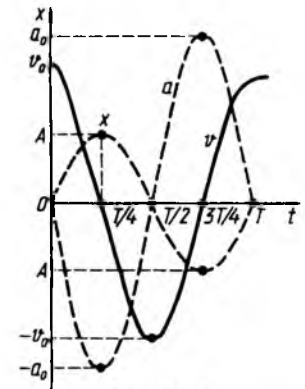


Рис. 18.3

З порівняння виразів (18.3) і (18.5) випливає, що зміщення s і швидкість v_x зсунуті за фазою на $\pi/2$:

швидкість досягає максимального значення в ті моменти часу, коли зміщення $s = 0$.

Прискорення

Проекція вектора доцентрового прискорення a_0 на вісь x (див. рис. 18.2, б) становить

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -A\omega_0^2 \sin \omega_0 t. \quad (18.6)$$

Підставивши $a_0 = \frac{v_0^2}{A} = \omega_0^2 A$ в (18.6), дістанемо

$$a_x = -a_0 \sin \omega_0 t. \quad (18.7)$$

Прискорення коливної точки також змінюється за синусоїдним законом. Максимального значення $a_{\max} = \omega_0^2 A$ прискорення досягає в моменти часу, коли $\sin \omega_0 t = 1$. Врахувавши (18.3), формулу (18.6) можна переписати у вигляді

$$a_x = -\omega_0^2 s. \quad (18.8)$$

Знак мінус у рівнянні (18.8) означає, що прискорення коливної точки напрямлене в бік, протилежний зміщенню, і завжди до положення рівноваги. Прискорення і зміщення змінюються в протифазі.

На рис. 18.3 подано графічні залежності зміщення s , швидкості v і прискорення a за умови, що початкова фаза коливання φ_0 дорівнює нулю. З рисунка видно, що швидкість досягає максимального значення v_0 , коли коливна точка проходить положення рівноваги. У цей момент зміщення s і прискорення a дорівнюють нулю.

Гармонічний осцилятор

Рівняння (18.8) можна переписати у вигляді

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0, \quad (18.9)$$

де

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = a.$$

Це диференціальне рівняння, розв'язком якого є вираз $s = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$. Система, яка описується рівнянням (18.9), називається *гармонічним осцилятором*.

Колівання гармонічного осцилятора – важливий приклад періодичного руху; вони є точною або наближеною моделлю в багатьох задачах фізики. Прикладом гармонічного осцилятора є *пружинний, фізичний і математичний маятники, коливальний контур*.

§ 160. Вільні електромагнітні коливання.

Перетворення енергії в коливальному контурі

Вільні електромагнітні коливання

Електромагнітними коливаннями називають періодичні взаємозв'язані зміни зарядів, струмів, напруженостей електричного і магнітного полів.

Вільними електромагнітними коливаннями називають такі, які здійснюються без зовнішньої дії завдяки раніше накопиченій енергії. Розглянемо закритий коливальний контур, що складається з індуктивності L і ємності C (рис. 18.4). Щоб збудити коливання в цьому контурі, треба конденсатору надати деякий заряд від джерела \mathcal{E} (ключ у положенні 1). Коли ключ буде в положенні 2, конденсатор почне розряджатися на кошту індуктивності. При цьому в контурі виникає ЕРС самоіндукції $\mathcal{E}_{\text{ці}} = -L \frac{dI}{dt}$, яка дорівнюватиме напрузі на обкладках конденсатора

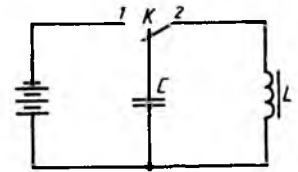


Рис. 18.4

$$U = Q/C. \text{ Отже, } -L \frac{dI}{dt} = \frac{Q}{C}.$$

Врахувавши, що $I = \frac{dQ}{dt}$, дістанемо

$$-L \frac{d^2 Q}{dt^2} = \frac{Q}{C}, \text{ або } \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{1}{LC} Q = 0. \quad (18.10)$$

Введемо позначення:

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2. \quad (18.11)$$

Тоді вираз (18.10) набуде вигляду

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + \omega_0^2 Q = 0. \quad (18.12)$$

Рівняння (18.12) аналогічне рівнянню (18.9) і є диференціальним рівнянням вільних гармонічних коливань. Його розв'язок має вигляд

$$Q = Q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (18.13)$$

де Q_0 – максимальний заряд на обкладках конденсатора; ω_0 – циклічна або кругова частота власних коливань контуру; φ_0 – початкова фаза.

З виразу (18.11) випливає, що

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Період цих коливань визначається формулою Томсона

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (18.14)$$

За гармонічним законом змінюється не тільки заряд на обкладках конденсатора, а й напруга і сила струму в контурі:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q_0}{C} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (18.15)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = Q_0 \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = I_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (18.16)$$

де $U_0 = \frac{Q_0}{C}$ – амплітуда напруги; $I_0 = Q_0 \omega_0$ – амплітуда струму.

З виразів (18.13), (18.15), (18.16) випливає, що

коливання заряду (напруги) і струму в контурі зсунуті за фазою на $\pi/2$.

Отже,

струм досягає максимального значення в ті моменти, коли заряд (напруга) на обкладках конденсатора дорівнює нулю, і навпаки.

Перетворення енергії в коливальному контурі

У процесі зарядження конденсатора між його обкладками виникає електричне поле, енергія якого $W_e = \frac{CV^2}{2}$, або $W_e = \frac{Q^2}{2C}$. Під час

розрядження конденсатора на котушку індуктивності в ній виникає магнітне поле, енергія якого $W_m = \frac{LI^2}{2}$. В ідеальному контурі максимальна енергія електричного поля дорівнює максимальній енергії магнітного поля:

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}. \quad (18.17)$$

Енергія зарядженого конденсатора періодично змінюється з часом за законом

$$W_e = \frac{CU_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (18.18)$$

або

$$W_e = \frac{Q_0^2}{2C} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Врахувавши, що $\omega^2 = \frac{1}{LC}$, дістанемо

$$W_e = \frac{\omega_0^2 L Q_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (18.19)$$

А енергія магнітного поля соленоїда змінюється з часом за законом

$$W_m = \frac{LI_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (18.20)$$

Врахувавши, що $I_0 = Q_0 \omega_0$, дістанемо

$$W_m = \frac{\omega_0^2 L Q_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (18.21)$$

Повна енергія електромагнітного поля коливального контуру дорівнює

$$W = W_e + W_m = \frac{1}{2} \omega_0^2 L Q_0^2. \quad (18.22)$$

Отже,

в ідеальному контурі сумарна енергія зберігається, електромагнітні коливання – незгасаючі.

§ 161. Згасаючі електромагнітні коливання

Реальний коливальний контур (рис. 18.5) має омичний опір, тому енергія, запасена раніше в контурі, безперервно витрачається на виділення тепла. Внаслідок цього амплітуда коливань поступово зменшу-

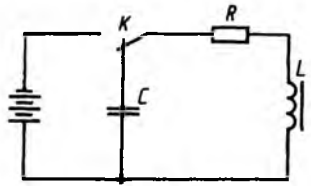


Рис. 18.5

ється і коливання в контурі згасають. Для реального коливального контуру закон Ома можна записати у вигляді

$$-L \frac{dI}{dt} = IR + \frac{Q}{C}, \text{ або } L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{Q}{C} = 0. \quad (18.23)$$

Зробивши перетворення з урахуванням того, що

$$I = \frac{dQ}{dt}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \delta = \frac{R}{2L},$$

дістанемо

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + 2\delta \frac{dQ}{dt} + \omega_0^2 Q = 0. \quad (18.24)$$

Розв'язок цього рівняння має вигляд *

$$Q = Q_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (18.25)$$

де коефіцієнт згасання

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad (18.26)$$

а частота

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (18.27)$$

Отже,

амплітуда згасаючих коливань зменшується з часом за експоненціальним законом:

$$Q_t = Q_0 e^{-\delta t}, \quad (18.28)$$

де Q_t – амплітуда коливань у момент часу t ; Q_0 – початкова амплітуда коливань у момент часу $t = 0$.

Залежність (18.25) зображено на рис. 18.6 суцільною лінією, а залежність (18.28) – штриховою.

З (18.25) випливає, що коливання можливі лише доти, поки ω – дійсна величина, тобто $\delta < \omega_0$.

Якщо коливання згасають повільно, то можна користуватися поняттями, введеними для незгасаючих коливань. Період згасання коливань визначають за формулою

* У цьому можна впевнитись, двічі здиференціювавши рівняння (18.25) і підставивши в рівняння (18.24). Врахуйте, що $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}, \quad (18.29)$$

де ω_0 – власна частота вільних незгасаючих коливань.

Порівнявши формули (18.14) і (18.29), побачимо, що період згасаючих коливань більший, ніж власних незгасаючих.

Швидкість згасання коливань у контурі характеризується *логарифмічним декрементом затухання* θ – логарифмом відношення амплітуд коливань у моменти часу, які відрізняються на період

$$\theta = \ln \frac{Q_t}{Q_{(t+T)}} = \delta T. \quad (18.30)$$

Проміжок часу, протягом якого амплітуда згасаючих коливань зменшується в e разів, називають часом релаксації

$$\tau = \frac{1}{\delta}. \quad (18.31)$$

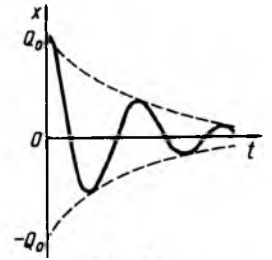


Рис. 18.6

§ 162. Автоколивання.

Генератор незгасаючих коливань

Автоколивання

Для техніки важливе значення має можливість підтримувати незгасаючі коливання. Якщо поповнювати втрати енергії реальної коливальної системи, то коливання будуть незгасаючими. Особливо важливі і широко застосовуються *автоколивання* – незгасаючі коливання, які підтримуються у коливальній системі завдяки постійному зовнішньому джерелу енергії, причому властивості цих коливань визначаються самою системою.

Розглянемо систему, яка складається з джерела енергії, тіла, здатного здійснювати коливання, і пристрою, який передає енергію джерела до тіла. Ця система здатна регулювати надходження енергії до коливного тіла для компенсації втрат на тертя, Джоулеву теплоту, випромінювання тощо. Прикладом такої системи є годинник з маятником (рис. 18.7). Тут чітко виділяються три основних елементи. Джерелом енергії

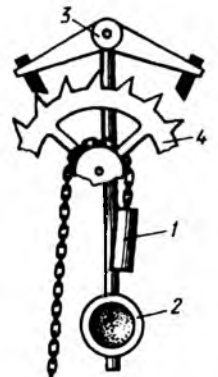


Рис. 18.7

є пружинний або гирьовий завод 1, а коливною системою – маятник 2 або балансир (коліщатко з пружинкою) і, нарешті, пристрій, що регулює надходження енергії від джерела до тіла, – анкерний хід 3. Система має певний запас енергії – потенціальну енергію гирі або енергію стисненої пружини. Гиря надає руху храповому колесу 4. Анкерний пристрій (планка, виконана у вигляді якоря) жорстко зв'язаний з маятником і керує обертанням храпового колеса, яке своїми зубами впирається то в лівий, то в правий виступи анкерного пристрою. При цьому маятник дістає імпульс то в один бік, то в другий, відкриваючи або закриваючи доступ енергії від джерела. Внаслідок цього відбуваються незгасаючі коливання маятника (хід годинника) з частотою, яка майже дорівнює частоті його вільних коливань, за умови, що тертя в системі мале. Системи, подібні до розглянутої, називають *автоколивальними*. Прикладом таких систем є органна труба, струна скрипки, якщо смичок рівномірно рухається, електричний дзвінок з переривником, генератор незгасаючих коливань.

Будь-яка автоколивальна система складається з таких основних частин: 1) коливальної системи; 2) джерела енергії, завдяки якому поповнюється енергія в коливальній системі; 3) клапана – пристрою, який регулює надходження енергії в коливальну систему певними порціями; 4) зворотного зв'язку, за допомогою якого коливальна система керує клапаном (рис. 18.8, а).

Генератор незгасаючих електромагнітних коливань

У генераторі (рис. 18.8, б) коливальною системою є контур (L і C), що має малий опір; джерелом енергії – батарея (випрямляч), яка живить напругою транзистор; роль клапана виконує транзистор, який регулює надходження енергії порціями від джерела в коливальний контур. Самозбуджує коливання котушка зворотного зв'язку $L_{зв}$, індуктивно пов'язана з котушкою коливального контуру L . У генераторі роль клапана виконує транзистор типу $p-n-p$. Транзистор має три електроди: емітер E , колектор K , базу B . Емітерний перехід відкритий, якщо позитивний полюс джерела



Рис. 18.8

з'єднаний з емітером, а негативний – з базою. Транзистор не пропускає струму, якщо потенціал бази позитивний відносно емітера. Залежно від потенціалу бази відносно емітера транзистор буде “закритий” або “відкритий”.

Якщо ключ замкнути, то в колі транзистора виникає струм, який заряджає конденсатор C коливального контуру. У контурі виникають *вільні коливання*. Струм, що проходить через котушку L контуру, індукує змінну напругу в котушці зворотного зв'язку $L_{зв}$, яка подається на емітерний перехід транзистора. У перший півперіод коливань транзистор буде “відкритий”, тобто в колекторному колі транзистора проходить струм. Цей струм збігається за напрямом із струмом у котушці контуру. Під час другого півперіоду струм у контурі змінює напрям, транзистор буде “закритий”, коливальний контур протягом півперіоду буде від'єднаний від джерела енергії. У наступний період процес повторюється. Отже, транзистор вмикає і вимикає джерело постійного струму, завдяки енергії якого в контурі підтримуються незгасаючі коливання.

Амплітуда і період коливань визначаються властивостями коливальної системи.

§ 163. Вимушені електромагнітні коливання

Вимушені електромагнітні коливання

Розглянуті вище коливання відбувалися з частотами, які визначаються параметрами самої коливальної системи. Щоб у реальній коливальній системі збудити незатухаючі коливання, треба компенсувати втрати енергії. *Коливання, що виникають під дією зовнішньої ЕРС, яка періодично змінюється, називають вимушеними електромагнітними коливаннями.*

Для того щоб у коливальному контурі виникали вимушені коливання, треба до контуру підвести зовнішню ЕРС, яка періодично змінюється за гармонійним законом, або змінну напругу

$$U = U_0 \sin \omega t, \quad (18.32)$$

де U_0 – максимальне значення напруги; ω – циклічна (колова) частота.

Тоді рівняння (18.23) з урахуванням (18.32) можна записати у вигляді

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{Q}{C} = U_0 \sin \omega t.$$

Поділивши цей вираз на L , дістанемо

$$\frac{dI}{dt} + \frac{R}{L} I + \frac{1}{LC} Q = \frac{U_0}{L} \sin \omega t.$$

Урахувавши, що

$$I = dQ/(dt), \quad \omega_0^2 = 1/(LC), \quad \delta = R/(2L),$$

маємо

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + 2\delta \frac{dQ}{dt} + \omega_0^2 Q = \frac{U_0}{L} \sin \omega t. \quad (18.33)$$

Це рівняння має розв'язок

$$Q = Q_0 \sin(\omega t - \varphi). \quad (18.34)$$

В усталеному режимі вимушені коливання відбуваються з частотою ω і є гармонічними.

Амплітуда і фаза коливань залежать від ω і визначаються такими виразами:

$$Q_0 = \frac{U_0}{\omega \sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}}, \quad (18.35)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{1/(\omega C) - \omega L}. \quad (18.36)$$

Силу струму в контурі за умови, що коливання встановилися, знайдемо, здиференціювавши рівняння (18.34):

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega Q_0 \cos(\omega t - \varphi). \quad (18.37)$$

З порівняння формул (18.34) і (18.37) випливає, що **коливання заряду (напруги) і струму зсунуті на $\pi/2$.**

Резонанс

З наближенням частоти ω змушуючої ЕРС до частоти власних коливань контуру ω_0 амплітуда вимушених коливань різко зростає. В ідеальному контурі амплітуда вимушених коливань при $\omega = \omega_0$ максимальна і прямує до нескінченності. У реальних контурах амплітуда скінченна і досягає найбільшого значення при частотах, які трохи менші від ω_0 . *Явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, коли частота їх ω наближається до частоти власних коливань системи ω_0 , називається резонансом.*

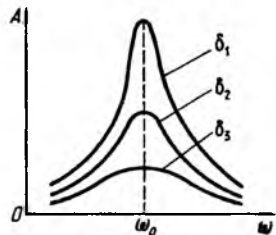


Рис. 18.9

На рис. 18.9 подано резонансні криві для різних коефіцієнтів згасання δ ($\delta_3 > \delta_2 > \delta_1$). Як вид-

но з рисунка, із збільшенням коефіцієнта згасання криві стають пологішими. Звідси випливає, що коливальна система з малим коефіцієнтом згасання одержує при резонансі більше енергії, ніж система з більшим коефіцієнтом згасання.

§ 164. Змінний струм. Генератор змінного струму

У широкому розумінні *електричний струм, який змінюється з часом, називають змінним*. Розглянемо змінний електричний струм, який змінюється з часом за гармонічним законом. Це вимушені коливання струму в електричному полі, які відбуваються з частотою ω , що збігається з частотою змушуючої ЕРС.

Розглянемо замкнений контур площею S в однорідному магнітному полі з індукцією \mathbf{B} . Контур рівномірно обертається навколо осі OO' з кутовою швидкістю ω (рис. 18.10).

Магнітний потік, який пронизує контур, визначається формулою $\Phi = BS \cos \alpha$, де α – кут між вектором нормалі \mathbf{n} до площини контуру і вектором \mathbf{B} . У процесі рівномірного обертання контуру кут повороту α змінюється з часом за законом $\alpha = \omega t$, а магнітний потік, який пронизує контур, – за законом

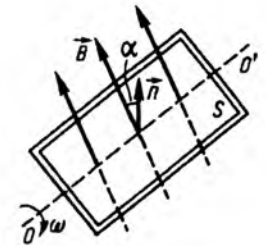


Рис. 18.10

$$\Phi = BS \cos \omega t. \quad (18.38)$$

У замкнутому контурі виникає ЕРС індукції (див. § 152)

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt}. \quad (18.39)$$

Визначимо зміну потоку $d\Phi$ за малий проміжок часу dt . Здиференціювавши (18.38), дістанемо

$$d\Phi = -\omega BS dt \sin \omega t. \quad (18.40)$$

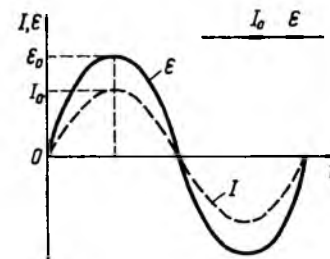


Рис. 18.11

Підставивши вираз (18.40) у формулу (18.39), дістанемо миттєве значення ЕРС:

$$\mathcal{E} = \omega BS \sin \omega t. \quad (18.41)$$

Як випливає з (18.41), ЕРС індукції, яка виникає в замкнутому контурі, в процесі його рівномірного обертання в однорідному магнітному полі змінюється з часом за законом синуса (рис. 18.11). ЕРС індукції мак-

симальна при $\sin \omega t = 1$, тобто при $\alpha = \omega t = \pi/2$. Величина $\xi_0 = \omega BS$ називається *амплітудним значенням ЕРС індукції*.

Якщо такий контур замкнути на зовнішнє коло, то по колу проходить струм, сила і напрям якого змінюються.

Миттєве значення змінного струму, що проходить активним опором R , визначимо за законом Ома:

$$I = \frac{\xi}{R} = \frac{\xi_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (18.42)$$

де $I_0 = \xi_0 / R$ – амплітудне значення сили струму. Струм за фазою збігається з ЕРС (рис. 18.11).

Проміжок часу T , протягом якого змінна ЕРС здійснює одне повне коливання, називається періодом змінного струму. Кількість повних коливань, які здійснюються за 1 с, називають частотою змінного струму ν . Наприклад, частота змінного струму 50 Гц, тобто 50 коливань за секунду. Це означає, що ЕРС і струм змінюють свій напрям 100 разів за секунду. Між коловою частотою змінного струму ω , частотою і періодом існує такий зв'язок:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

§ 165. Ємнісний та індуктивний опори змінного струму

Ємність у колі змінного струму

Нехай у коло змінного струму ввімкнено конденсатор ємністю C . Напряга і заряд на обкладках конденсатора змінюються за законом

$$U = U_0 \sin \omega t, \quad Q = CU = CU_0 \sin \omega t. \quad (18.43)$$

Сила струму в колі $I = dQ/dt$. Використавши співвідношення (18.5) для швидкості коливної точки, можна стверджувати, що струм – швидкість зміни заряду – випереджає коливання заряду за фазою на $\pi/2$:

$$I = C\omega U_0 \sin(\omega t + \pi/2) = I_0 \sin(\omega t + \pi/2). \quad (18.44)$$

Тут позначено $I_0 = C\omega U_0$. З порівняння виразів (18.43) і (18.44) випливає:

змінний струм у колі з ємністю випереджає напругу за фазою на $\pi/2$ (рис. 18.12, а, б).

Це відбувається тому, що при періодичному заряджанні конденсатора в колі проходить змінний струм, який досягає максимального значення в

ті моменти часу, коли напруга дорівнює нулю. Для такого кола виконується закон Ома не для *миттєвих*, а для *амплітудних* значень. Якщо коло з увімкненим конденсатором має опір X_C , який називають ємнісним, то закон Ома має вигляд

$$I_0 = \frac{U_0}{X_C}. \quad (18.45)$$

З порівняння формул (18.44) і (18.45) випливає:

ємнісний опір обернено пропорційний ємності і коловій частоті змінного струму:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (18.46)$$

Індуктивність у колі змінного струму

Нехай по колу, яке містить тільки індуктивність L , проходить змінний струм вигляду (18.42). Цей струм збуджує в котушці ЕРС самоіндукції (17.9)

$$\xi = -L \frac{dI}{dt}.$$

За співвідношенням (18.42) запишемо

$$\frac{dI}{dt} = \omega I_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Підставимо цей вираз у (17.9), позначивши

$$U_0 = \omega L I_0;$$

$$\xi = -\omega L I_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (18.47)$$

Напряга на індуктивності зрівноважується ЕРС самоіндукції, тобто

$$U = -U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Отже,

змінний струм у колі з індуктивністю відстає за фазою від напруги на $\pi/2$ (рис. 18.13, а, б).

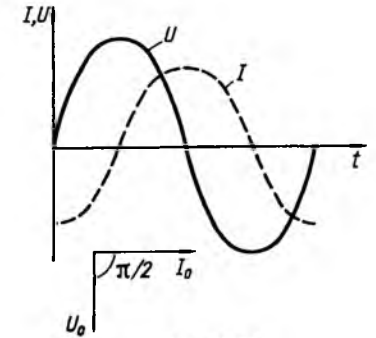


Рис. 18.12

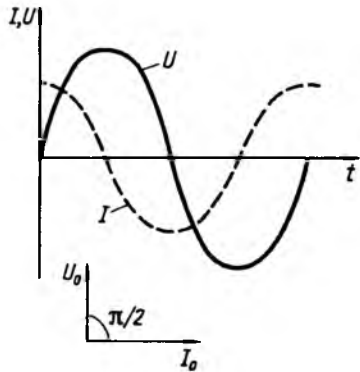


Рис. 18.13

індуктивний опір пропорційний індуктивності і коловій частоті:

$$X_L = \omega L. \quad (18.49)$$

Індуктивний X_L і ємнісний X_C опори на відміну від активного опору R називають *реактивними*.

§ 166. Закон Ома для електричного кола змінного струму

Послідовне з'єднання R, C, L

Якщо електричне коло складається з послідовно з'єднаних активного опору R , ємності C та індуктивності L , то повну напругу в цьому колі можна визначити з векторної діаграми. Додаючи вектори амплітуд напруг, дістанемо амплітуду результуючого коливання. Розмістимо вісь струмів горизонтально (рис. 18.14). Оскільки струм і напруга на активному опорі R збігаються за фазою, то на діаграмі вектор U_R (амплітудне значення напруги на активному опорі) розміщений горизонтально. Напруга на ємності відстає від струму на $\pi/2$, тому вектор U_C повернутий відносно струму на кут $\pi/2$ за рухом стрілки годинника. Напруга на індуктивності випереджає струм на $\pi/2$, тому вектор U_L повернутий відносно струму на кут $\pi/2$ проти руху стрілки годинника. Як видно з рис. 18.14, вектори U_L і U_C напрямлені в протилежні боки, тому від їх додавання дістаємо вектор, модуль якого дорівнює $|U_L - U_C|$ і напрямлений у бік більшого век-

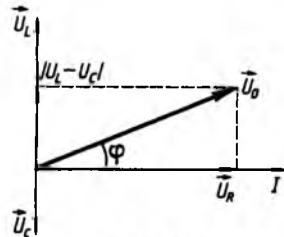


Рис. 18.14

Це відбувається тому, що при збільшенні сили струму ЕРС самоіндукції спричинює індукційний струм, який перешкоджає збільшенню основного струму, внаслідок цього сила струму досягає максимального значення пізніше, ніж напруга.

Записавши закон Ома для амплітудних значень у вигляді

$$I_0 = \frac{U_0}{X_L}, \quad (18.48)$$

де X_L – індуктивний опір, і порівнявши формули (18.47) і (18.48), можна зробити висновок:

тора. Додавши послідовно вектори, знайдемо амплітудне значення вектора, який результує напругу U_0 . Як видно з діаграми, вектор U_0 зсунутий відносно струму на кут φ .

Значення кута φ залежить від відношення U_L і U_C .

Якщо $U_L = U_C$, кут $\varphi = 0$, струм і напруга збігаються за фазою.

Значення U_0 можна визначити за теоремою Піфагора:

$$U_0 = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Аналогічно визначаємо повний опір Z кола змінного струму:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Закон Ома для амплітудних значень сили струму I_0 і напруги U_C в колі змінного струму можна записати у вигляді

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (18.50)$$

Амплітуда сили змінного струму пропорційна амплітуді напруги і обернено пропорційна повному опору кола.

Резонанс напруг

Якщо індуктивний опір кола дорівнює ємнісному, то в колі буде резонанс, при цьому реактивний опір кола дорівнює нулю, повний опір кола – активному опору. Тоді закон Ома [див. (18.50)] набуває вигляду

$$I_0 = \frac{U_0}{R}.$$

Під час резонансу сила струму в колі буде найбільша і за фазою збігатиметься з напругою.

В електротехніці резонанс в колі послідовно з'єднаних опорів, ємності та індуктивності назвали *резонансом напруг*, бо напруга на котушці індуктивності і конденсаторі в резонансі може значно перевищувати напругу на вході кола.

§ 167. Робота і потужність змінного струму

Робота і потужність змінного струму

Раніше було показано, що потужність постійного електричного струму

$$P = IU = I^2 R, \quad (18.51)$$

де U – напруга між кінцями ділянки кола; I – сила струму на цій ділянці; R – активний опір.

Сила змінного струму залежить не тільки від активного опору кола, а й від індуктивного та ємнісного опорів [див. (18.50)].

Якщо в колі є конденсатор, то процес проходження через нього струму – це багаторазове перезаряджання конденсатора. У цьому разі, якщо знехтувати дуже малими втратами на нагрівання діелектрика в конденсаторі, проходження струму через нього не пов’язане з виділенням у ньому енергії. Протягом тієї чверті періоду, коли конденсатор заряджається, енергія запасається в ньому; коли конденсатор розряджається, він віддає в коло запасену енергію.

Якщо в колі є котушка індуктивності, то аналогічно, коли сила струму наростає, в котушці створюється магнітне поле, яке має запас енергії. Якщо сила струму зменшується, то магнітне поле зникає і запасена в ньому енергія повертається до джерела струму. Отже, якщо в колі є індуктивний і ємнісний опори, то конденсатор або котушка індуктивності обмінюються енергією з джерелом струму, в колі витрачається потужність $P = IU / k$, де $k = \cos \varphi$ – коефіцієнт потужності кола, а φ – зсув фази між силою струму в колі і напругою між кінцями розглядуваної ділянки. Отже,

$$P = IU \cos \varphi. \quad (18.52)$$

Ця формула відрізняється від формули (18.51) наявністю додаткового множника $\cos \varphi$. Вона показує, що

потужність, яка виділяється в колі змінного струму, залежить не тільки від сили струму і напруги, а й від зсуву фаз між напругою і силою струму.

Якщо $\varphi = 90^\circ$, то $\cos \varphi = 0$ і потужність дорівнює нулю, якими б великими не були напруга і сила струму. У цьому разі енергія, яка передається за чверть періоду від джерела до кола, дорівнює енергії, яка передається від кола до джерела протягом наступної чверті періоду, тобто вся енергія коливається між джерелом і колом.

Середня потужність змінного струму

Протягом малого проміжку часу змінний струм можна розглядати як постійний, тому в колі з активним опором миттєва потужність змінного струму

$$p_t = IU = I_0 U_0 \sin^2 \omega t.$$

Враховавши, що

$$\sin^2 \omega t = 1/2(1 - \cos 2\omega t),$$

маємо

$$p_t = I_0 U_0 (1 - \cos 2\omega t),$$

де I і U – миттєві, а $I_0 U_0$ – амплітудні значення сили струму і напруги.

Робота $dA = p_t dt$ за малий проміжок часу, а за час повного періоду T коливань

$$A = I_0 U_0 \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt.$$

Враховавши, що $\omega = 2\pi / T$, маємо

$$A = I_0 U_0 \int_0^T \left(1 - \cos \frac{4\pi}{T} t\right) dt = \frac{I_0 U_0 T}{2}, \quad A_T = \frac{1}{2} I_0 U_0 T.$$

Середня потужність змінного струму

$$P_{\text{ср}} = \frac{A_T}{T} = \frac{I_0 U_0}{2}. \quad (18.53)$$

Діюче значення сили струму, напруги, ЕРС

Назвемо діючою (ефективною) силою струму і діючою $I_{\text{еф}}$ (ефективною) напругою $U_{\text{еф}}$ такі силу і напругу постійного струму, при проходженні якого по тому самому колу за той самий час виділяється така сама кількість теплоти, що й при даному змінному струмі. При цьому потужність

$$P = I_{\text{еф}} U_{\text{еф}} = R I_{\text{еф}}^2 = \frac{U_{\text{еф}}^2}{R}. \quad (18.54)$$

Порівнявши цю формулу з виразами для потужності змінного струму (18.53), дістанемо

$$I_{\text{еф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{еф}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}. \quad (18.55)$$

Аналогічно, діюче значення ЕРС змінного струму в полі менше від його амплітудного значення:

$$\varepsilon_{\text{еф}} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}. \quad (18.56)$$

Знаючи ефективні значення, середню потужність змінного струму можна обчислити за тими самими формулами, що й потужність постійного струму. Всі вольтметри, призначені для змінного струму, показують ефективні значення ЕРС і напруги.

Коефіцієнт потужності

Проаналізувавши формулу (18.52), можна сказати, що за цією формулою можна обчислювати середню або активну потужність кола змінного струму.

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ характеризує втрати енергії в колі і, отже, є найважливішою характеристикою для проектування ліній електропередачі на змінному струмі. Якщо навантаження в колі мають великі емнісні або індуктивні опори, то $\varphi \neq 0$ і $\cos \varphi$ може бути набагато менший від одиниці. Щоб передати потрібну потужність, треба збільшити силу струму $I_{\text{еф}}$, що призводить до виділення в колі великої кількості теплоти. Тому доводиться або збільшувати переріз проводів, або так розподіляти навантаження, щоб $\cos \varphi$ був якомога ближчий до одиниці. Проектуючи лінії електропередачі, слід прагнути до підвищення коефіцієнта потужності.

§ 168. Генератори струму

Генератори електричного струму – це пристрої перетворення різних видів енергії – механічної, хімічної, теплової, світлової тощо – в електричну.

Робота сучасних генераторів ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. На рис. 18.15, а зображено найпростішу схему генератора змінного струму. У рамці, яка обертається в магнітному полі, виникає

змінна ЕРС індукції. Якщо коло замкнути, то в колі проходитиме змінний струм. Із зовнішнім колом рамка з'єднується кільцями, закріпленими на одній осі з рамкою. За допомогою нерухомих ковзних контактів-щіток кільця з'єднуються із зовнішнім колом. За один оберт рамки полярність щіток змінюється двічі. Щоб збільшити напругу, яку знімають з клем генератора, на рамки намотують не один, а багато витків. У всіх промислових генераторах змінного струму витки, в яких індукується змінний струм, установлюють нерухомо, а обертається магнітна система. Нерухому частину генератора називають *статором*, а рухома – *ротором*. Якщо ротор обертати за допомогою зовнішньої сили, то разом з ротором обертатиметься і магнітне поле, яке він створює, при цьому в провідниках статора індукується ЕРС.

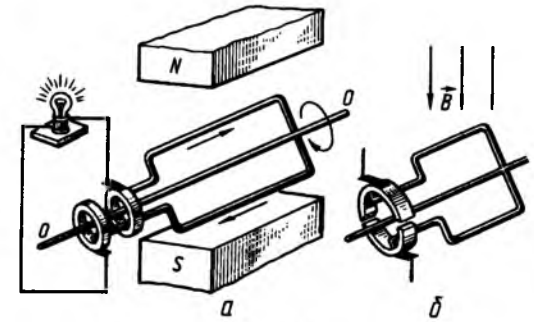


Рис. 18.15

Електрогенератори, які працюють з гідротурбінами, називають *гідрогенераторами*, а ті, що працюють з паровими турбінами, – *турбогенераторами*.

Тепер статори генераторів виготовляють з тонких листів електротехнічної сталі, що мають вузьку петлю гістерезису, набраних у пакет і скріплених болтами. Ротор складають з товстих сталевих листів і насаджують на спільний вал з турбіною.

У генераторі змінного струму ЕРС двічі за один оберт змінює напрям. Щоб добути постійний за напрямом струм, застосовують спеціальний пристрій, який називається *колектором*. Найпростіший колектор – це два ізольовані один від одного півкільця, до яких приєднують кінці витка (рис. 18.15, б). У ті моменти, коли струм у витку змінює напрям, півкільця змінюють щітки. У зовнішньому колі проходить струм однакового напрямку. На рис. 18.16 показано, як змінюється напруга, що знімається з цього колектора. Такий генератор дає пульсуючий струм; його напрям постійний, але сила змінюється. Якщо замість одного витка

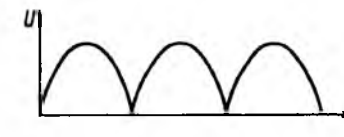


Рис. 18.16

одночасно обертати велику кількість витків, то можна добути струм, який не змінюється не тільки за напрямом, а й за значенням. Такий колектор складений з великої кількості ізольованих одна від одної пластин.

§ 169. Трансформатори

Трансформатор

Трансформатор – це прилад, призначений для перетворення параметрів змінного струму, що складається з виготовленого з м'якого феромагнетика осердя замкнутої форми, на якому встановлено дві обмотки – первинну і вторинну (на рис. 18.17, а вони мають різну кількість витків). Кінці первинної обмотки, які називають *входом* трансформатора, приєднують до мережі живильного змінного струму; кінці вторинної обмотки, які називають *виходом* трансформатора – до споживача. На рис. 18.17, б зображено умовне позначення трансформаторів на радіосхемах.

В основі роботи трансформатора – явище електромагнітної індукції. Розглянемо принцип дії трансформатора. Нехай на вхід трансформатора подається змінна напруга U_1 . В осерді трансформатора виникає змінний магнітний потік, який пронизує як первинну, так і вторинну обмотки трансформатора. У первинній і вторинній обмотках відповідно виникають ЕРС самоіндукції:

$$\xi_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad \xi_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

де N_1 і N_2 – кількість витків первинної і вторинної обмоток.

Використавши друге правило Кірхгофа, знайдемо напруги на вході і виході трансформатора:

$$U_1 = I_1 R_1 - \xi_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (18.57)$$

$$U_2 = I_2 R_2 - \xi_2 = I_2 R_2 + N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (18.58)$$

де R_1 і R_2 – відповідно опори первинної і вторинної обмоток трансформатора; I_1 і I_2 – сили струмів, які проходять по первинній і вторинній обмотках.

Розглянемо випадок, коли вторинна обмотка розімкнена, тобто $I_2 = 0$ (*холостий хід*). Технічні трансформатори конструюють так, щоб виконувалась умова $I_1 R_1 \ll \xi_1$, тобто обмотки трансформатора мають невеликий активний опір, але велику індуктивність.

Поділивши почленно рівняння (18.57) на рівняння (18.58), дістанемо

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (18.59)$$

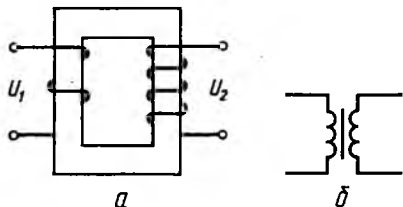


Рис. 18.17

Напруга на кінцях вторинної обмотки трансформатора так відноситься до напруги на кінцях його первинної обмотки, як кількість витків вторинної обмотки відноситься до кількості витків первинної обмотки.

Коефіцієнт трансформації

Відношення $k = N_1 / N_2$ називають *коефіцієнтом трансформації*. Якщо на вторинній обмотці витків більше, то трансформатор називають *підвищувальним* ($N_2 > N_1$), якщо менше – *знижувальним* ($N_2 < N_1$).

Якщо трансформатор навантажений, то спадом напруги у вторинній обмотці порівняно з ЕРС індукції нехтувати не можна, тому вираз (18.59) має складніший характер.

Типи трансформаторів

Є також конструкції трансформаторів, в яких частина первинної обмотки є вторинною або навпаки (рис. 18.18). Такі трансформатори називають *автотрансформаторами*. Якщо один з контактів автотрансформатора зробити рухомим, то можна плавно змінювати вихідну напругу. Один з типів трансформаторів, які використовують у лабораторних дослідженнях, називають ЛАТР.

Для добування в лабораторних умовах змінного струму високої напруги завдяки енергії постійного струму застосовують трансформатор особливої конструкції, який називають *індукційною котушкою Румкорфа*. Ця котушка дає можливість добути між кінцями вторинної обмотки напругу близько 10 кВ.

У процесі роботи трансформатори нагріваються, тому їх треба охолоджувати. Малопотужні трансформатори охолоджують повітрям, потужні – мінеральним трансформаторним маслом. Для цього осердя з обмотками занурюють у масло, а зовні корпусу встановлюють масляні радіатори, через які пропускають або холодне повітря, або воду.

Потужність сучасних трансформаторів досягає 1000 МВт, напруга підвищувальних обмоток 750 кВ. При таких параметрах розміри сталюого осердя і обмоток великі, і такі трансформатори є величезними спорудами масою в сотні тонн.

Трансформатор – найсучасніший перетворювач енергії, коефіцієнт корисної дії потужних трансформаторів досягає 94–99 %.

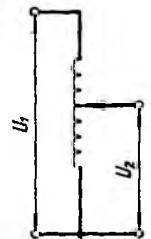


Рис. 18.18

§ 170. Струми високої частоти

Струми, які мають частоту 50–10 000 Гц, називають *струмами низької частоти*, струми, частота яких перевищує 10 000 Гц – *струмами високої частоти*.

Якщо в однорідному провіднику із сталим поперечним перерізом проходить постійний струм, то густина струму однакова в різних точках перерізу провідника. Якщо проходить змінний струм, то в цьому разі густина струму не буде однаковою по перерізу: вона найбільша на поверхні і найменша на осі провідника. Її нерівномірність тим більша, чим товщий провідник і чим більша частота змінного струму, а за дуже великих частот струм практично існує лише в тонкому поверхневому шарі. Це явище називають *скін-ефектом* (від англ. “skin” – шкіра). Воно пояснюється виникненням вихрового електричного поля електромагнітної індукції.

Для таких струмів суцільні проводи можна замінювати тонкостінними трубками-хвилеводами, які покривають шаром срібла, що добре проводить струм, оскільки їх опір практично зумовлений лише поверхневим шаром. Це явище широко застосовують у радіотехніці надвисоких частот.

Тепер струми високої частоти застосовують для швидкого прогрівання і плавлення металів, поверхневого гартування сталевих виробів, прогрівання діелектриків, сушіння деревини, харчових продуктів, у медицині – для прогрівання уражених органів тіла людини.

Розглянемо приклад поверхневого гартування сталевих виробів. За досить високої частоти струми зосереджуються біля поверхні деталі, яку гартують, за короткий час її прогривають, а всередині метал не досягає температури гартування. Поверхня деталі після гартування набирає потрібної твердості і не стає крихкою, бо всередині неї метал не гартувався.

§ 171. Поняття про трифазний струм

Трифазною системою електричних кіл називають систему, що складається з трьох електричних кіл змінного струму однакової частоти, ЕРС яких зсунуті за фазою на 1/3 періоду. Якщо амплітуди ЕРС однакові між собою, то систему називають *симетричною*. Кожне окреме коло трифазної системи скорочено називають *фазою*.

До 90-х років XIX ст. використовували однофазний струм, від генератора до споживача йшла лінія з двох проводів. Проте спроби створити потужні електродвигуни однофазного струму були невдалі, тому довго змінний струм застосовували переважно для освітлення. В кінці 80-х років XIX ст. італійський учений Г. Ферраріс і сербський електротехнік Н. Тесла незалежно один від одного розробили теорію використання багатофазного струму.

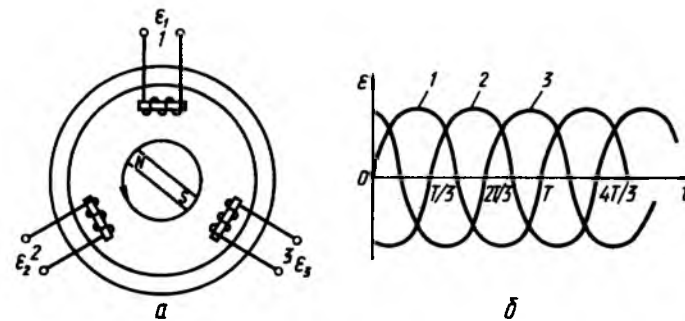


Рис. 18.19

У 1889–1891 рр. російський електротехнік М. О. Доливо-Добровольський запропонував систему *трифазного струму*, яка швидко завоювала всесвітнє визнання. Система трифазного струму поширилась в усьому світі як система, що забезпечує вигідне передавання енергії і дає можливість створити надійні в роботі і прості за будовою електродвигуни, генератори і трансформатори. Після виходу в світ праць Доливо-Добровольського практично вся електротехніка стала електротехнікою *трифазного струму*.

На рис. 18.19 схематично зображено будову найпростішого генератора трифазного струму. Генератор має три обмотки, зміщені одна відносно одної на $2/3\pi$. При обертанні ротора із сталою швидкістю в котушках індукуються змінні ЕРС тієї самої частоти, які мають однакові амплітуди, але відрізняються за фазами на $1/3$ періоду. Якщо коливання ЕРС в обмотці 1 визначаються формулою $\xi_1 = \xi_0 \sin \omega t$, то для ЕРС обмоток 2 і 3 маємо

$$\xi_2 = \xi_0 \sin(\omega t - 2/3\pi), \quad \xi_3 = \xi_0 \sin(\omega t - 3/4\pi).$$

Зміну в часі ЕРС у трьох обмотках графічно зображено на рис. 18.19, б. Кожна з обмоток трифазного генератора є самостійним джерелом електричної енергії. Отже, генератор трифазного струму є сукупністю трьох генераторів однофазного змінного струму. Якщо ці однофазні генератори розглядати як нез'язані, то для передавання енергії до споживача потрібно буде шість проводів (рис. 18.20). Така система не має ніякого практичного значення. Кількість проводів, які з'єднують генератор із споживачем, можна зменшити, якщо обмотки генератора з'єднати зіркою (рис. 18.21) або трикутником (рис. 18.22).

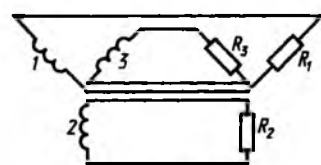


Рис. 18.20

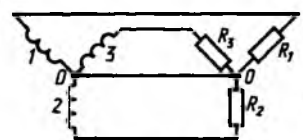


Рис. 18.21

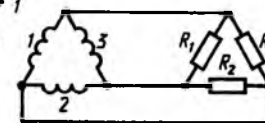


Рис. 18.22

§ 172. З'єднання обмоток трифазного генератора зіркою і трикутником

З'єднання зіркою

Для електричних явищ важливі тільки різниці потенціалів, тому один провід кожного кола можна зробити спільним. Для цього при з'єднанні *зіркою* початки всіх обмоток з'єднують в одну точку, яку називають *нульовою* (рис. 18.21). Провід, приєднаний до нульової точки, називають *нульовим*. Проводи, приєднані до кінців обмоток, називають *лінійними*. Як видно з рис. 18.21, струм генератора, обмотки якого з'єднано зіркою, підведено до приймачів енергії чотирма проводами.

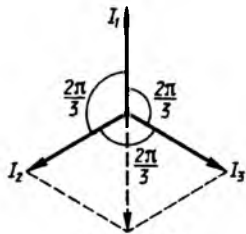


Рис. 18.23

Напругу між початками і кінцями фаз або між кожним з лінійних проводів і нульовим проводом називають *фазною напругою*.

Напругу між кінцями обмоток або між лінійними проводами називають *лінійною напругою*. Якщо між нульовим і кожним з лінійних проводів увімкнено однакові навантажувальні опори, наприклад двигуни, електролампи і т. д., то струм у нейтральному проводі, який дорівнює геометричній сумі фазних струмів

(рис. 18.23), дорівнює нулю. У розглядуваному випадку по нульовому проводу йтимуть три струми I_1 , I_2 , I_3 , які зсунуті за фазою на $2/3\pi$ і тому дають сумарну силу струму $I = 0$. Отже, у цьому разі нульовий провід не потрібний, і чотирипровідну лінію можна замінити трипровідною.

З'єднання трикутником

Якщо обмотки генератора з'єднані трикутником (див. рис. 18.22), то *фазні напруги дорівнюють лінійним* і три фази генератора утворюють замкнений контур. Таке з'єднання можливе тільки тоді, коли сума ЕРС, які діють у цьому контурі, дорівнює нулю. У цьому разі, якщо генератор навіть не навантажений, не тільки не виникає короткого замикання, але й струму в обмотках немає. Якщо обмотки генератора з'єднані трикутником, то лінія електропередачі *трипровідна*.

Потужність трифазного струму

Потужність у колі трифазного струму, якщо всі фази навантажені однаково, дорівнює

$$P = \sqrt{3} U_{0л} I_{0л} \cos \varphi, \quad (18.60)$$

де $U_{0л}$, $I_{0л}$ – амплітуди лінійних напруг і сили струму; φ – зсув фаз між фазним струмом і фазною напругою, тобто силою струму і напругою в одній з обмоток генератора.

При з'єднанні зіркою $U_{0л} = \sqrt{3} U_{0ф}$ (при $U_{0ф} = 127$ В, $U_{0л} = 220$ В, $I_{0л} = I_{0ф}$).

При з'єднанні трикутником $U_{0л} = U_{0ф}$, а $I_{0л} = \sqrt{3} I_{0ф}$.

Обертове магнітне поле

Таке поле виникає як результуюче поле від накладання двох (і більше) змінних магнітних полів, що мають однакову частоту, але зсунуті одно відносно одного за фазою і в просторі. Це явище застосовують в електродвигунах, вимірювальних приладах і різній апаратурі регулювання та керування на змінному струмі.

§ 173. Добування, передавання і розподіл електроенергії в галузях промисловості та сільського господарства

Добування електроенергії

Перші генератори постійного струму були створені в 50-х роках XIX ст., а вже в 70-х роках почалося їх промислове виробництво.

Тепер рівень виробництва і споживання енергії – найважливіший показник розвитку продуктивних сил суспільства. Головне значення при цьому має електроенергія – найуніверсальніша і найзручніша для використання форма енергії.

Електроенергію виробляють на трьох типах електростанцій: теплових (ТЕС і ТЕЦ), гідро (ГЕС) і атомних (АЕС).

Джерелом енергії на ТЕС і ТЕЦ (теплоелектроцентраль) є вугілля, газ, торф, мазут та ін.

Джерелом енергії на ГЕС є потенціальна енергія води, піднятої греблею.

Джерелом енергії АЕС є ядерне паливо, розміщене в тепловідільних елементах (ТВЕЛ) ядерного реактора.

Передавання і розподіл електроенергії

Передавати струм низької напруги (100–200 В) на відстань понад 2 км через великі втрати в проводах не вигідно. Для зменшення втрат треба збільшувати напругу. Але струм високої напруги не можна

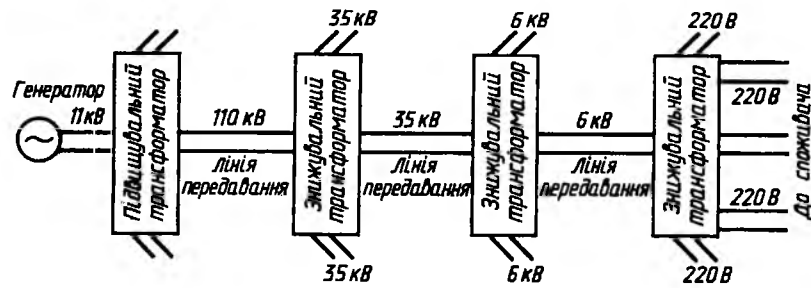


Рис. 18.24

підводити в будинки, на фабрики і заводи, оскільки доторкання до проводу, який буде під високою напругою, небезпечне для життя людини. Цю проблему можна розв'язати, якщо мати пристрій, який міг би струм високої напруги перетворювати в струм низької напруги. Для постійного струму такі перетворення пов'язані з багатьма труднощами. Напругу змінного струму можна легко змінювати за допомогою пристрою, який назвали трансформатором.

Схему передавання змінного струму на великі відстані зображено на рис. 18.24. Струм низької напруги, який виробляє електрогенератор, подається на трансформатор. Трансформатор перетворює струм низької напруги в струм високої напруги, потім по лінії електропередачі струм надходить до місця споживання електроенергії. У місці споживання електроенергії трансформатор перетворює струм високої напруги в струм низької напруги. Після перетворення електроенергія надходить до споживача.

Із споживачами електроенергії електростанції пов'язані або повітряними, або кабельними лініями електропередачі (ЛЕП). Повітряні лінії електропередачі – це проводи, підвішені на ізоляторах до сталевих або залізобетонних опор.

За законом Джоуля – Ленца, втрати, які виникають у процесі передавання електроенергії, залежать від сили струму. Із збільшенням напруги, при тій самій потужності, сила струму в лінії зменшується; отже, зменшуються і втрати. Необхідність передавання електроенергії на великі відстані під високою напругою і при великих передаваних потужностях призводить до того, що устаткування ЛЕП стає дорогим, але це доводиться робити, бо потужні гідралічні і теплові електростанції не завжди розміщені поблизу великих промислових районів.

У містах струм високої напруги передається по кабельних лініях електропередачі, потім його розподіляють між знижувальними трансформаторними підстанціями.

Перспективні кабельні лінії передавання великих потужностей розміщені в трубах, заповнених для зменшення втрат рідким воднем (при темпера-

турі 20 К) або гелієм (4 К). За таких високих температур опір алюмінієвих або мідних кабельних проводів зменшується в тисячі разів, пропорційно опору зменшуються втрати в процесі передавання електроенергії.

§ 174. Електрифікація країни

Електрифікація – єдиний у часі процес виробництва, розподілу і споживання електроенергії.

Після 2-ї світової війни в електроенергетику країн світу було інвестовано десятки мільярдів доларів. Це було зумовлено швидким зростанням попиту на електроенергію. Основну увагу приділяли тепловим електростанціям (ТЕС), а також гідроелектростанціям (ГЕС).

Гідроенергія – один з найдешевших і найчистіших енергоресурсів. Рівень розвитку гідроенергетики у різних країнах на різних континентах неоднаковий. Більше всього гідроенергії виробляють Сполучені Штати, Російська Федерація, Україна, Канада, Японія, Бразилія, Китай і Норвегія. На гідроелектростанціях і гідроакмулюючих електростанціях (ГАЕС) використовують потенціальну енергію води, що накопичується за допомогою греблі.

Енергетична система – це об'єднання окремих електростанцій лініями високої напруги. В енергетичній системі краще за все вирішуються питання рівномірного завантаження окремих станцій і безперебійного постачання електроенергією споживачів.

Розвиток галузей промисловості та сільського господарства тісно пов'язаний з розвитком паливно-енергетичного комплексу. Головним джерелом енергії є електростанції.

Перше місце щодо виробництва електроенергії займають теплові електричні станції, які працюють на вугіллі, нафтопродуктах та іншому паливі. ККД теплових електростанцій порядку 40 %, і близько 70 % станцій з теплоелектроцентральною (ТЕЦ). На другому місці з виробництва електроенергії – гідралічні електростанції (ГЕС), які використовують енергію падаючої води. ККД цих станцій досягає 80–90 %.

У зв'язку з вичерпанням світових запасів органічного палива з'явилися атомні електростанції, які мають важливе значення у тих районах, де немає гідроресурсів, мало палива, а також в освоєнні необжитих територій.

У наступні 2–3 десятиріччя можливі серйозні труднощі, якщо не з'являться альтернативні джерела енергії або не буде обмежене зростання її споживання. Необхідність більш раціонального використання енергії є очевидною. Неперервне зростання споживання енергії спричинює вичерпання енергоресурсів і забруднення навколишнього середовища, але і може нарешті призвести до значних змін температури і клімату на Землі.

Короткі висновки

- Гармонічним осцилятором називають систему, яка описується рівнянням

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0.$$

- Електромагнітні коливання – це періодичні взаємозв’язані зміни зарядів, струмів, напруженостей електричного і магнітного полів. Найпростішою системою, в якій збуджуються вільні електромагнітні коливання, є коливальний контур. Період вільних гармонічних коливань в ідеальному контурі визначається формулою Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Повна енергія електромагнітного поля коливального контуру дорівнює

$$W = W_e + W_m = \frac{1}{2}\omega_0^2 L Q_0^2.$$

- У реальному коливальному контурі, що має омичний опір, здійснюються згасаючі електромагнітні коливання.

Амплітуда згасаючих коливань з часом змінюється за законом

$$Q_t = Q_0 e^{-\delta t}.$$

- Швидкість згасання коливань у контурі характеризується логарифмічним декрементом

$$\theta = \ln \frac{Q_t}{Q_{t+T}} = \delta T.$$

Для збудження незгасаючих коливань використовують автоколивальні системи.

- Коливання, що виникають під дією зовнішньої ЕРС, яка періодично змінюється, називають вимушеними електромагнітними коливаннями. Якщо частота зовнішньої змінної напруги збігається з власною частотою коливального контуру, то настає резонанс – різко зростає амплітуда вимушених коливань.
- Електричний струм, який змінюється з часом, називають змінним. Це – вимушені коливання струму в електричному колі, які відбуваються з частотою, що збігається з частотою змушуючих ЕРС. Змінний струм отримують за допомогою генераторів струму. Робота більшості сучасних генераторів ґрунтується на явищі електромагнітної індукції.
- Сила електричного струму, який виникає в замкненому контурі, що обертається в однорідному магнітному полі, змінюється за синусоїдним законом $I = I_0 \sin \omega t$.
- Закон Ома для амплітудних значень сили струму і напруги в полі змінного струму має вигляд

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

- Пристрій для перетворення змінної напруги і сили струму називають трансформатором. Основною його характеристикою є коефіцієнт трансформації $k = N_1 / N_2$.

- Трифазна система забезпечує вигідніше передавання енергії, дає можливість створювати прості й надійні за будовою електродвигуни, генератори, трансформатори.

Генератор трифазного струму має три обмотки, зміщені одна відносно одної на $2/3\pi$.

Потужність трифазного струму

$$P = \sqrt{3} U_{0л} I_{0л} \cos \phi.$$

- Електроенергію виробляють на теплових, гідро- і атомних електростанціях. Кількість виробленої електроенергії – важливий показник економічності потужності держави.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Який рух називають коливальним? 2. Які коливання називають гармонічними? 3. Дайте означення параметрів коливального руху (амплітуда, період, частота, фаза). 4. Як виникають вільні коливання в коливальному контурі? 5. Від чого залежить період власних коливань у контурі? 6. Які коливання називають згасаючими? 7. Що таке автоколивальна система? 8. Які коливання називають вимушеними? 9. Яке явище називають електричним резонансом? 10. Який струм називають змінним? 11. Як генерують змінний струм? 12. Що називають миттєвим значенням струму? напруги? ЕРС? 13. Як визначають діючі (ефективні) значення струму і напруги? 14. Сформулюйте закон Ома для кола змінного струму. 15. Чому дорівнює потужність у колі змінного струму? 16. Як побудований трансформатор і чим визначається коефіцієнт трансформації? 17. Дайте поняття трифазного струму. 18. Поясніть схему з’єднання генератора із споживачем зіркою і трикутником. 19. Як добувають, передають і розподіляють електроенергію?

Приклади розв’язування задач

Задача 1. У коливальному контурі, який складається з індуктивності і ємності, максимальний струм у котушці 1 А, а максимальна напруга на конденсаторі 1 кВ. Через час $1,57 \cdot 10^{-6}$ с, відлічуючи його від того моменту, коли напруга дорівнювала нулю, енергія в котушці дорівнюватиме енергії в конденсаторі. Обчислити період коливань контуру і його енергію (вважати, що омичний опір дуже малий і ним можна знехтувати).

Дано: $I_0 = 1$ А; $U_0 = 1000$ В; $t = 1,57 \cdot 10^{-6}$ с; $W_e = W_m$.

Знайти: T, W .

Розв’язання. Знаходимо період коливань контуру. За умовою в заданий момент енергія магнітного поля котушки дорівнює енергії електричного поля в конденсаторі: $1/2LI^2 = 1/2CU^2$, де L – індуктивність контуру, I – струм у контурі, C – ємність конденсатора; U – напруга на пластинках конденсатора. Сума цих енергій визначає повну енергію контуру:

$$W = 1/2LI^2 + 1/2CU^2 = CU^2. \quad (1)$$

Визначимо повну енергію контуру через максимальну напругу U_0 :

$$W = \frac{1}{2}CU_0^2. \quad (2)$$

З (1) і (2) визначимо, що

$$U = U_0\sqrt{2}. \quad (3)$$

Використаємо рівняння гармонічного коливання напруги (відлік ведемо від напруги, яка дорівнює нулю):

$$U = U_0 \sin \frac{2\pi}{T}t,$$

де T – період коливань; t – час. Врахувавши (3), дістанемо $(2\pi/T)t = \pi/4$, звідси $T = 8t$.

Обчислимо тепер повну (максимальну) енергію контуру. Вона дорівнює максимальній електричній енергії конденсатора (енергія магнітного поля при цьому дорівнює нулю) [див. (2)], або максимальній енергії магнітного поля (енергія електричного поля дорівнює нулю):

$$W = \frac{1}{2}LI_0^2, \quad (4)$$

де I_0 – максимальна сила струму в котушці. З формули Томсона (15.1) знаходимо

$$\sqrt{LC} = T/(2\pi). \quad (5)$$

Перемноживши (2) і (4), добудемо корінь

$$W = \frac{1}{2}I_0U_0\sqrt{LC}.$$

З урахуванням (5) дістанемо

$$W = \frac{I_0U_0T}{4\pi}.$$

Обчислення:

$$T = 8 \cdot 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 12,6 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

$$W = \frac{1 \text{ А} \cdot 10^3 \text{ В} \cdot 12,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{4 \cdot 3,14} = 0,001 \text{ Дж}.$$

Задача 2. Рамка, яка має 100 витків з площею поперечного перерізу витка 400 см^2 , обертається в магнітному полі з напруженістю $1 \cdot 10^4 \text{ А/м}$. Визначити ЕРС індукції через 0,01 с після початку руху рамки, якщо амплітудне значення ЕРС дорівнює 2,5 В.

Дано: $N = 100$; $S = 400 \text{ см}^2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; $H = 10^4 \text{ А/м}$; $t = 0,01 \text{ с}$; $\xi_0 = 2,5 \text{ В}$.

Знайти: ξ .

Розв'язання. ЕРС індукції рамки, яка обертається в однорідному магнітному полі напруженості H із сталою кутовою швидкістю ω , змінюється за законом

$$\xi = \xi_0 \sin \omega t. \quad (1)$$

Максимальне (амплітудне) значення ЕРС змінного струму

$$\xi_0 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \mu\mu_0 HSN\omega, \quad (2)$$

оскільки $B = \mu\mu_0 H$. З виразу (2) визначаємо $\omega = \xi_0 / (\mu\mu_0 HSN)$.

Обчислення:

$$\omega = \frac{2,5 \text{ В}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 10^4 \text{ А/м} \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 10^2} = 49,8 \text{ рад/с}.$$

При даному значенні ω фаза через $t = 0,01 \text{ с}$ становитиме

$$\omega t = 49,8 \text{ рад/с} \cdot 0,01 \text{ с} = 0,489 \text{ рад} = 28^\circ 30'.$$

За формулою (1) визначаємо миттєве значення ЕРС індукції через 0,01 с:

$$\xi = 2,5 \text{ В} \cdot \sin 28^\circ 30' = 1,2 \text{ В}.$$

Задача 3. Трансформатор підвищує напругу з 220 до 3000 В. У вторинній обмотці проходить струм 0,1 А. Визначити силу струму в первинній обмотці, якщо ККД трансформатора становить 96 %.

Дано: $U_1 = 220 \text{ В}$; $U_2 = 3000 \text{ В}$; $I_2 = 0,1 \text{ А}$; $\eta = 0,96$.

Знайти: I_1 .

Розв'язання. ККД трансформатора визначають за формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1},$$

звідки

$$I_1 = \frac{I_2 U_2}{\eta U_1}.$$

Обчислення:

$$I_1 = \frac{0,1 \text{ А} \cdot 3000 \text{ В}}{0,96 \cdot 220 \text{ В}} = 1,4 \text{ А}.$$

Задача 4. Визначити опір вторинної обмотки трансформатора, якщо при вмиканні первинної обмотки в мережу з напругою 220 В у вторинній обмотці проходить струм 5 А, а напруга на її кінцях становить 12 В. Коефіцієнт трансформації дорівнює 0,10. Втратами енергії в первинній обмотці знехтувати.

Дано: $U_1 = 220 \text{ В}$; $I_2 = 5 \text{ А}$; $U_2 = 12 \text{ В}$; $k = 0,10$.

Знайти: r_2 .

Розв'язання. Якщо втратами в первинній обмотці можна знехтувати, то ЕРС індукції ξ_1 в первинній обмотці дорівнює напрузі: $\xi_1 = U_1$. Знаючи коефіцієнт трансформації, можна визначити ЕРС індукції вторинної обмотки: $k = \xi_2 / \xi_1$. Звідси $\xi_2 = k\xi_1 = kU_1$. Для вторинної обмотки, за законом Ома,

$$\xi_2 = I_2 r_2 + U_2, \text{ або } I_2 r_2 = \xi_2 - U_2 = kU_1 - U_2.$$

Тоді

$$r_2 = \frac{kU_1 - U_2}{I_2}$$

Обчислення:

$$r_2 = \frac{0,1 \cdot 220 \text{ В} - 12 \text{ В}}{5 \text{ А}} = 2 \text{ Ом.}$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Коливальний контур має ємність 26 пФ та індуктивність 0,12 мГн. Якої довжини електромагнітні хвилі у вакуумі створює цей контур, коли в ньому відбуваються коливання з власною частотою?
2. Котушку, індуктивність якої $3 \cdot 10^{-5}$ Гн, приєднано до плоского конденсатора з площею пластин 100 см² і відстанню між ними 0,1 мм. Чому дорівнює діелектрична проникність середовища, яке заповнює простір між пластинами, якщо контур резонує на хвилю завдовжки 750 м?
3. Яку індуктивність треба ввімкнути в коливальний контур, щоб при ємності 2 мкФ дістати звукову частоту 1000 Гц? Опором контуру знехтувати.
4. Коливальний контур складається з конденсатора і котушки індуктивності. Обчислити енергію контуру, якщо максимальний струм у котушці дорівнює 1,2 А, максимальна різниця потенціалів на обкладках конденсатора становить 1200 В, частота коливань контуру 10^5 с⁻¹. (Витратами знехтувати.)
5. Розв'язати попередню задачу за умови, що дано не частоту, а період коливань контуру, який дорівнює 10^{-6} с.
6. Максимальна енергія магнітного поля коливального контуру дорівнює 10^{-3} Дж при силі струму 0,8 А. Чому дорівнює частота коливань контуру, якщо максимальна різниця потенціалів на обкладках конденсатора становить 1200 В?
7. За умовою попередньої задачі знайти не частоту, а період коливань контуру.
8. Період коливань контуру, який складається з індуктивності і ємності, становить 10^{-5} с. Чому дорівнює максимальний струм у котушці, якщо максимальна різниця потенціалів на обкладках конденсатора становить 900 В? Максимальна енергія електричного поля дорівнює $9 \cdot 10^{-4}$ Дж.
9. Виток дроту площею 4000 см² рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією 0,20 Тл. Визначити найбільше значення ЕРС, якщо частота обертання витка дорівнює 50 с⁻¹.
10. В однорідному магнітному полі з індукцією 1 Тл рівномірно обертається прямокутна рамка розміром 20 × 30 см з 10 витків дроту. Знайти амплітудне значення ЕРС індукції, якщо кількість обертів рамки за хвилину дорівнює 120.
11. Визначити ККД трансформатора, якщо він підвищує напругу зі 110 до 500 В. У первинній обмотці проходить струм 2,4 А, у вторинній – 0,5 А.

12. Визначити опір вторинної обмотки трансформатора з коефіцієнтом трансформації 10, якщо при вмиканні первинної обмотки в мережу з напругою 24 В у вторинній обмотці проходить струм 2 А, а її напруга дорівнює 200 В. Втратами енергії в первинній обмотці знехтувати.
13. Первинна котушка трансформатора має 10³ витків. На її осердя надіто чотири вторинні котушки з кількістю витків 250, 500, 1500, 10 000. Яка напруга виникає на затискачах кожної з цих котушок, якщо на первинну котушку подати 120 В?

ГЛАВА 19

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

§ 175. Електромагнітне поле як особливий вид матерії

Взаємозв'язок електричного і магнітних полів

У 60-х роках XIX ст. Дж. Максвелл розробив теорію електромагнітного поля, за якою *змінне електричне поле породжує змінне магнітне*. Ці поля мають вихровий характер: силові лінії поля, яке породжує, концентрично охоплені силовими лініями поля, яке породжується. Внаслідок цього утворюється система «переплетених» між собою електричних і магнітних полів. Деяке уявлення про характер змінного електромагнітного поля може дати рис. 19.1, який є ніби моментальним знімком цього поля. Пряма лінія \vec{E}_0 зображує первинне змінне електричне поле, кола \vec{B} в горизонтальній площині – вторинні змінні магнітні поля, а кола \vec{E} у вертикальній площині – вторинні змінні електричні поля.

Магнітне поле виникає навколо провідників, по яких проходять струми. Силові лінії магнітного поля завжди замкнені, звідси випливає, що електричні струми, які породжують магнітне поле, також мають бути замкнені.

Якщо по провіднику проходить постійний струм, тобто струм провідності, то лінії струму замкнені.

Розглянемо випадок, коли в електричне коло ввімкнено конденсатор. Між обкладками конденсатора заряди переміщуватись не можуть. Це веде до того, що лінії струму обриваються біля поверхні обкладок конденсатора, струм провідності, який проходить по провіднику, що з'єднує обкладки конденсатора, розімкнеться. Якщо напруга джерела струму змінна, то при замиканні ключа K (рис. 19.2) конденсатор поперемінно заряджається і розряд-

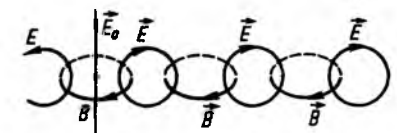


Рис. 19.1

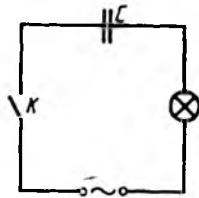


Рис. 19.2

жається, у колі проходить струм, лампочка, увімкнена в це коло, горить. Це свідчить про те, що лінії струму замкнені. Між обкладками конденсатора змінюваний електричний заряд створює змінне електричне поле, яке Максвелл назвав *струмом зміщення*.

Струм зміщення – змінне електричне поле, як і струм провідності, породжує магнітне поле, силові лінії якого завжди замкнені.

Отже,

електричне і магнітне поля взаємозв'язані. Зміна одного з них породжує друге. Ці поля – прояв єдиного електромагнітного поля.

Енергія електромагнітного поля і його матеріальність

Електромагнітне поле – особлива форма матерії. Воно існує реально, тобто незалежно від нас, від наших знань про нього. Невід'ємною характеристикою матерії є енергія. Під енергією електромагнітного поля розуміють суму енергій електричного і магнітного полів:

$$W = W_e = W_m.$$

Відповідно густина енергії електромагнітного поля дорівнює сумі густин енергій електричного і магнітного полів:

$$\omega = \omega_e + \omega_m = \frac{\epsilon \epsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu\mu_0},$$

або

$$\omega = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}, \quad (19.1)$$

оскільки $B = \mu\mu_0 H$.

§ 176. Електромагнітні хвилі

Електромагнітні хвилі

У загальному випадку стверджувати, що в даній точці простору існує тільки електричне або тільки магнітне поле, не можна. Припустимо, що заряд, який перебуває в спокої відносно Землі, створює неоднорідне електричне поле, магнітного поля навколо заряду немає. Якщо спостерігач перебуває в системі координат, яка рухається відносно Землі, то

неоднорідне електричне поле, створене цим зарядом, для нього вже буде змінне в часі. Це змінне електричне поле породжує магнітне. Отже, для цього спостерігача існують одночасно і електричне, і магнітне поля.

Індукція B магнітного поля, яке виникає внаслідок зміни електричного, пропорційна швидкості зміни напруженості електричного поля: $B \approx \frac{dE}{dt}$. Напруженість E електричного поля, яке виникає внаслідок зміни магнітного поля за законом Фарадея, пропорційна швидкості зміни індукції магнітного поля: $E \approx \frac{dB}{dt}$.

Якщо в якій-небудь точці простору збудити вихрове електричне поле, то силові лінії змінного магнітного поля, яке виникає, охоплюють силові лінії електромагнітного поля концентричними колами. Мінливе магнітне поле породжує електричне поле, силові лінії якого охоплюють силові лінії магнітного поля і т. д.

Отже, змінні електричне і магнітне поля взаємозв'язані, вони підтримують одне одного і можуть існувати незалежно від джерела, яке їх породило, поширюючись у просторі у вигляді електромагнітної хвилі. Інакше кажучи,

електромагнітні хвилі – це змінне електромагнітне поле, яке поширюється в просторі.

З теорії Максвелла випливає, що електромагнітні хвилі – поперечні: вектори E і B взаємно перпендикулярні і лежать у площині, перпендикулярній до вектора v – швидкості поширення хвилі. Крім того, в електромагнітній хвилі вектори E і B завжди коливаються в однакових фазах, одночасно досягають максимуму, одночасно перетворюються в нуль (рис. 19.3).

Отже,

електромагнітна хвиля – хвиля поперечна.

Швидкість поширення хвилі

За теорією Максвелла, швидкість поширення електромагнітних хвиль – величина скінченна, вона визначається електричними і магнітними властивостями середовища, в якому поширюється електромагнітна хвиля:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}}, \quad (19.2)$$

де ϵ_0 і μ_0 – електрична і магнітна сталі; ϵ і μ – відносні діелектрична і магнітна проникності середовища.

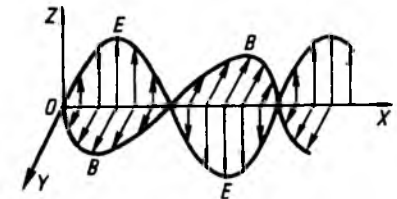


Рис. 19.3

Якщо електромагнітна хвиля поширюється у вакуумі, то $\epsilon = 1$, $\mu = 1$. Обчислимо швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює швидкості світла у вакуумі: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Довжина хвилі

Відстань, на яку переміщується електромагнітна хвиля за час, що дорівнює одному періоду коливання, називають довжиною хвилі.

Якщо v – швидкість поширення електромагнітної хвилі в однорідному середовищі, T – її період, ν – частота, а λ – довжина, то $\lambda = vT$, або $\lambda = v/\nu$. Для вакууму $\lambda_0 = cT$, або

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}. \quad (19.3)$$

Оскільки швидкість хвилі залежить від ϵ і μ середовища, то, якщо хвиля переходить з одного середовища в інше, змінюються v і λ , а частота коливань залишається тією самою.

Якщо хвиля переходить з вакууму в середовище з діелектричною проникністю ϵ і магнітною μ , то довжина хвилі зменшується:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

де λ_0 – довжина хвилі у вакуумі.

Електричний диполь

Найпростішою системою, яка випромінює електромагнітні хвилі, є коливний електричний диполь. Диполь – це система двох різноіменних точкових зарядів $+Q$ і $-Q$, розміщених на відстані l один від одного. Диполь, розміри якого малі порівняно з довжиною хвилі $l \ll \lambda$, називають елементарним. Як елементарні диполі можна розглядати електрони, зв'язані в атомах речовини, відносно електромагнітного випромінювання, яке взаємодіє з речовиною. Вони здатні здійснювати гармонічні коливання навколо положення рівноваги.

Якщо заряд здійснює гармонічні коливання, то диполь випромінює монохроматичну хвилю з частотою, яка дорівнює частоті коливання заряду. Якщо коливання відбуваються не за гармонічним законом, то випромінювання складається з набору частот.

§ 177. Вібратор Герца.

Відкритий коливальний контур

Відкритий коливальний контур

У закритому коливальному контурі, який зображено на рис. 18.5, електромагнітне поле локалізоване в тій області простору, де розміщений цей контур, тому електромагнітних хвиль цей контур не випромінює. Використання коливального контуру для випромінювання електромагнітних хвиль запропонував Г. Герц. Він увів у коливальний контур (рис. 19.4) іскровий проміжок 1, на який подавали змінну напругу з вторинної обмотки індукційної котушки 2.

Коли різниця потенціалів між обкладками конденсатора ставала дуже великою, в іскровому проміжку виникала іскра, яка замикала контур і водночас від'єднувала ("закорочувала") індукційну котушку 2. У цей час у контурі здійснювалась серія електромагнітних коливань. Якщо іскра зникала, контур розмикався і коливання припинялись. Але тоді індукційна котушка знову заряджала конденсатор; в іскровому проміжку знову проскакувала іскра, а в контурі здійснювалась повторна серія електромагнітних коливань і т. д.

У дальшому, щоб збільшити частоту коливань і тим самим підвищити інтенсивність електромагнітного випромінювання контуру, Герц зменшив індуктивність і ємність контуру, розсунувши пластини конденсатора (рис. 19.5). Нарешті, він здійснив так званий відкритий коливальний контур (вібратор Герца) – прямолінійний провідник з іскровим проміжком посередині, який має дуже малу ємність та індуктивність (1 на рис. 19.6). Оскільки $\nu = \frac{1}{T}$ і $T = 2\pi\sqrt{LC}$, то із зменшенням L і C частота

коливань зростає. У цьому вібраторі змінне електричне поле вже не було зосереджене всередині конденсатора, а оточувало вібратор зовні, що істот-

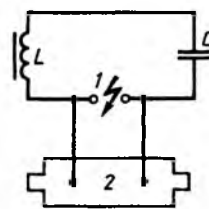


Рис. 19.4

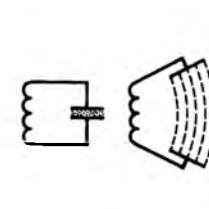


Рис. 19.5

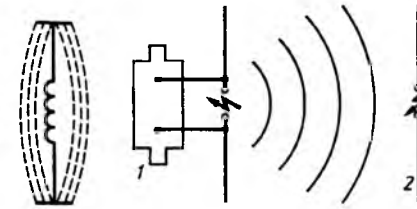


Рис. 19.6

но підвищувало інтенсивність електромагнітного випромінювання. Електромагнітне випромінювання відкритого вібратора (рис. 19.6) Герц реєстрував за допомогою другого вібратора 2, настроєного в резонанс із випромінювачем (резонатора). Коли електромагнітні хвилі досягали резонатора, у ньому виникали електромагнітні коливання, які супроводились проскакуванням іскри через іскровий проміжок.

Можливість виявлення електромагнітних хвиль свідчить про те, що вони переносять енергію.

Властивості електромагнітних хвиль

Користуючись вібратором і резонатором, Герц установив, що електромагнітні хвилі *мають властивості, притаманні будь-яким іншим хвилям*: відбиваються від перешкод (металевих), заломлюються на межі двох середовищ (діелектричних), інтерферують одна з одною.

За допомогою вібратора Герц добув плоскі хвилі завдовжки від 0,6 до 10 м. Герц показав, що електромагнітні хвилі – поперечні. Він добув стоячі електромагнітні хвилі і за їх допомогою визначив швидкість поширення електромагнітних хвиль, яка збіглася із швидкістю світла.

Дослідженнями російських учених П. М. Лебедева і О. А. Глаголевої-Аркадьєвої було доведено:

усі властивості електромагнітних хвиль збігаються із властивостями світла.

З цього випливає дуже важливий висновок:

видиме світло – це електромагнітне випромінювання.

Наступні дослідження підтвердили, що не тільки видиме світло, а й інфрачервоне, ультрафіолетове, рентгенівське і гамма-випромінювання мають електромагнітну природу, тобто електромагнітні хвилі мають дуже широкий діапазон частот або довжин хвиль.

Маючи широкий діапазон частот або довжин хвиль, електромагнітні хвилі відрізняються одна від одної за способами їх генерації і реєстрації, а також своїми властивостями. Тому електромагнітні хвилі ділять на кілька видів: радіохвилі, світлові хвилі, рентгенівське і гамма-випромінювання (див. нижче).

Деякі види електромагнітних хвиль

Випромінювання	Довжина хвилі, м	Частота хвилі, Гц	Джерело випромінювання
Радіохвилі	$10^3 - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$	Когівальний контур Вібратор Герца Масовий випромінювач Ламповий генератор

Випромінювання	Довжина хвилі, м	Частота хвилі, Гц	Джерело випромінювання
Світлові хвилі			
інфрачервоне випромінювання	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$	$6^{11} - 3,75 \cdot 10^{14}$	Лампи
видиме світло	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	Лазери
ультрафіолетове випромінювання	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	Лазери
Рентгенівське випромінювання	$2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$	Трубки Рентгена
Гамма-випромінювання	Менша ніж $6 \cdot 10^{-12}$	Більша за $5 \cdot 10^{19}$	Радіоактивний розпад Ядерні процеси Космічні процеси

Слід зазначити, що межі між різними видами електромагнітних хвиль дуже умовні. Електромагнітні хвилі всіх видів поширюються в просторі з тією самою швидкістю.

§ 178. Винайдення радіо О. С. Поповим. Поняття про радіозв'язок

Перший радіоприймач

Ідею використання електромагнітних хвиль для передавання сигналів на великі відстані вперше висловив у 1889 р. О. С. Попов. Він у 1895 р. збудував і продемонстрував у дії перший радіоприймач, який ґрунтується на релейній схемі: дуже мала енергія електромагнітних хвиль за допомогою спеціального пристрою – *когерера* – використовувалась для керування місцевим джерелом енергії (*електробатареєю*), яка живила реєструючий апарат (*електродзвінок*). Ще в 1896 р. Попов здійснив радіо-телеграфний зв'язок на відстані 250 м, а в 1899 р., застосувавши винайдену ним антену, – на відстані 50 км. У 1900 р. IV Всесвітній електротехнічний конгрес присудив О. С. Попову почесний диплом і золоту медаль за винайдення радіо. Так розпочалась ера радіо.

Схему першого радіоприймача подано на рис. 19.7. Електромагнітні коливання, прийняті антеною *M*, надходять на когерер *AB*. Назва “когерер” утворилась від латинського слова “когеренцію”, що означає “зчеплення”.

Когерер – пристрій, здатний виявляти електромагнітні хвилі. Це трубка з дрібними металевими ошурками. Ошурки мають великий опір,

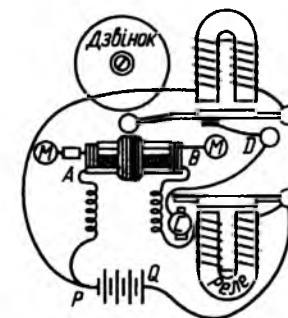


Рис. 19.7

струм через них не проходить. Але коли на ошурки потрапляє електромагнітна хвиля, то вони ніби “зчеплюються” одні з одними, опір їх зменшується; через них може проходити електричний струм. Якщо по трубці постукати, то опір ошурок зростає, струм через них не проходить. Електромагнітна хвиля, змінюючи опір когерера, робить його провідником електричного струму. Когерер, замикаючи коло батареї PQ , дає можливість струму проходити через обмотку реле, яке притягує яркір, контакт реле C замикається. Яркір, замикаючи контакт реле, дає струму можливість проходити через обмотку дзвінка. Дзвінок притягує свій яркір, молоточок ударяє по чашечці. Чути звук. Одночасно з цим контакт дзвінка D розриває коло, струм через дзвінок не проходить. Яркір дзвінка повертається в початкове положення, ударяючи по когереру, збільшуючи його опір. Система повернулася у початкове положення. Приймач знову готовий до прийняття електромагнітних хвиль.

Важливим моментом у розвитку радіо було винайдення в 1906 р. електронних ламп, які дали можливість створити джерела незгасаючих електромагнітних коливань. Цим було повністю розв’язано питання про передавання за допомогою радіомовлення музики.

Радіопередавач

Основою сучасного радіопередавача є генератор незгасаючих коливань, складений на лампах або транзисторах. Генератор виробляє коливання високої частоти, яку називають несучою (рис. 19.8). Якщо передавач випромінює незгасаючу синусоїдну хвилю, то в приймальній антені реєструються гармонічні коливання, які не несуть жодної інформації. Щоб передавати які-небудь сигнали, мовлення, музику, треба змінювати характер високочастотних коливань, наприклад амплітуду. Цей процес називають *модуляцією*. Наприклад, при телеграфній *модуляції* випромінювання перериваються за допомогою ключа, тобто посилаються короткі (крапка) і довгі (тире) сигнали – азбука Морзе (рис. 19.9).

Щоб можна було передавати звукові коливання, в коло генератора незгасаючих коливань вмикають *мікрофон* (рис. 19.10). Під дією звукових хвиль, які падають на мікрофон із звуковою частотою, змінюється опір

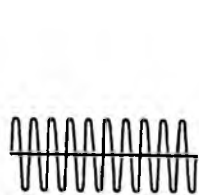


Рис. 19.8

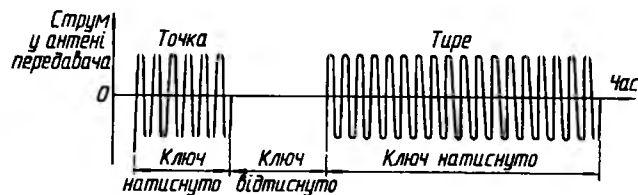


Рис. 19.9

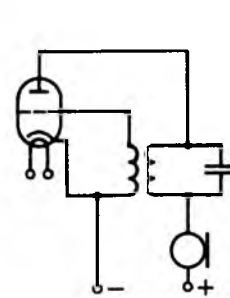


Рис. 19.10

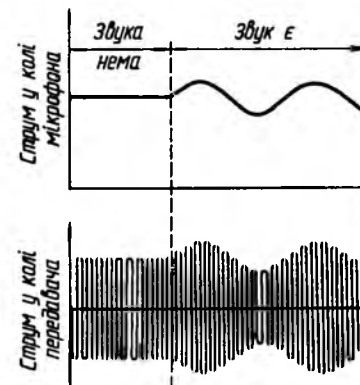


Рис. 19.11

мікрофона, а отже, і струм у первинній обмотці трансформатора. Це веде до виникнення змінної ЕРС у вторинній обмотці, тобто на сітку лампи подається змінна напруга звукової частоти. Амплітуда високочастотних коливань, які генеруються в контурі цієї лампи, змінюється разом з низькочастотною напругою на сітці, а отже, змінюється інтенсивність радіохвиль, що їх випромінює антена. Поки звуку немає, деякий постійний струм проходить по колу мікрофона (рис. 19.11). Якщо виникають звукові коливання, струм у колі мікрофона змінюється, амплітуда високочастотних коливань також змінюється за законом звукових коливань. Це явище називають *амплітудною модуляцією*.

Радіоприймач

Радіоприймач складається в основному з таких елементів: антени, коливального контуру, підсилювача, детектора, динаміка. До антени радіоприймача одночасно надходять модульовані сигнали від безлічі передавальних станцій. Щоб з цих сигналів виділити інформацію, яка нас цікавить, у приймачі використовують коливальний контур. До контуру приєднано конденсатор змінної ємності. Змінюючи ємність цього конденсатора, можна змінити власну частоту контуру. У такий спосіб приймальний контур настроюють у *резонанс* з електромагнітними коливаннями, які приймають. У коливальному контурі виникає *модульований слабкий струм* високої частоти (рис. 19.12, а), який надходить спочатку в підсилювач, а потім у детектор. У *детекторі* розділяються високочастотні несуча і звукові коливання, тобто відбувається *детектування*. Детектором є двохелектродна електронна лампа або напівпровідниковий діод, що має односторонню провідність. Після проходження через діод високочастотний модульований струм стає пульсуючим (рис. 19.12, б). Для виділення низь-

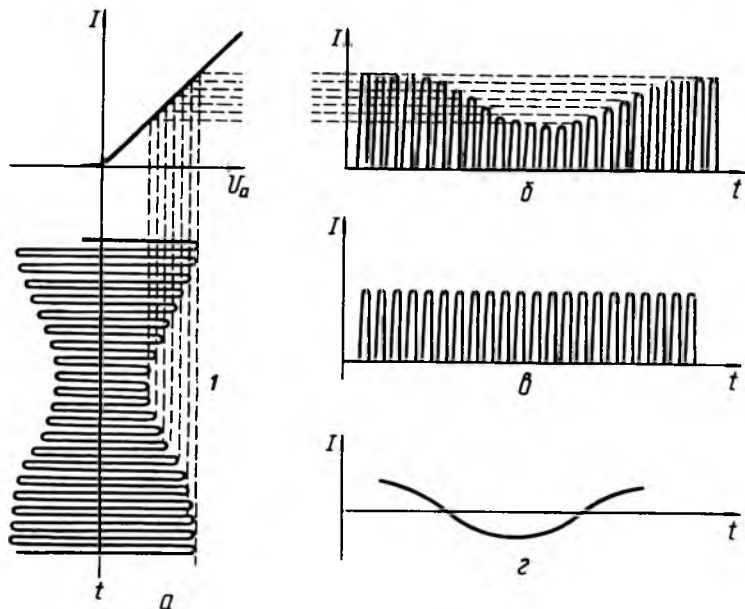


Рис. 19.12

кочастотного сигналу використовується *фільтр*, що складається з паралельно з'єднаних конденсатора та опору. Для струму низької (звукової) частоти конденсатор є великим опором, тому такий струм проходить через опір (рис. 19.12, *в*), після чого він підсилюється і передається на *динамік*. Струм високої частоти проходить через конденсатор (рис. 19.12, *а*).

Функціональну схему сучасного радіопередавача і радіоприймача зображено на рис. 19.13.

Генератор 1 незгасаючих коливань виробляє високочастотні коливання. Звукові коливання за допомогою мікрофона перетворюються в електричні коливання. Коливання від генератора 1 і звукові коливання надходять у модулятор 2. У ньому під дією звукових коливань змінюється або амплітуда (амплітудна модуляція), або частота (частотна модуляція) коливань, які виробляє генератор. Для передавання мовлення і музики модуляцію здійснюють звуковими частотами $(10 \div 13) \times 10^3$ Гц.

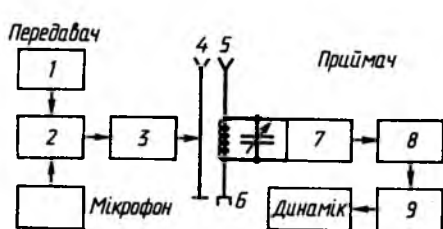


Рис. 19.13

Після підсилення в підсилювачі 3 модульовані коливання надходять у передавальну антену 4, яка, будучи відкритим коливальним контуром, випромінює електромагнітні хвилі в ефір. Безпосередньо передавати електромагнітні коливання звукової частоти не можна, оскільки

електромагнітні хвилі різних частот по-різному поширюються в атмосфері і по-різному взаємодіють з речовиною.

На відстані від радіопередавача розміщений радіоприймач. Електромагнітні хвилі надходять в антену радіоприймача 5 і в контурі 5–6 спричиняють електромагнітні коливання. Прийняті коливання власної частоти потім надходять у підсилювач 7, а далі – в детектор 8. Потім низькочастотні коливання підсилюються в підсилювачі 9 і подаються на динамік. Інформація, яка надійшла в мікрофон, відтворюється динаміком. Для радіомовлення використовують усі діапазони радіохвиль.

§ 179. Застосування електромагнітних хвиль

Телебачення

Сучасне суспільство не можна уявити без телебачення. Воно міцно ввійшло в наш побут, медицину, астрономію, системи автоматизованого керування та інші галузі діяльності людини.

Схема телебачення в основному збігається із схемою радіомовлення. Відмінність у тому, що в передавачі коливання модулюються не тільки звуковими сигналами, а й сигналами зображення. Зображення предметів перетворюються в електричні сигнали за допомогою електронно-променевої трубок, які називають *іконоскопами*. Електричні коливання від іконоскопа надходять до радіопередавача і модулюють випромінювану ним радіохвилю подібно до того, як змінний струм у колі мікрофона модулює радіохвилю при передаванні звуку.

У приймачі вакуумна електронно-променева трубка – *кінескоп* – одержаний сигнал перетворює у видиме зображення. Електронний пучок у приймачі рухається по екрану точно синхронно з рухом електронного пучка в передавачі. Телевізійні сигнали передаються в діапазоні ультракоротких хвиль (УКХ). Ці сигнали приймаються в межах прямої видимості. Московська Останкінська телебашта заввишки 540 м забезпечує надійне приймання телепередач на відстань до 130 км. Щоб передавати телепередачі на великі відстані, застосовують ретранслятори. За допомогою супутників зв'язку можна приймати і передавати телепрограми практично з будь-якої точки земної кулі.

Радіолокація

Радіолокація – це виявлення різних предметів і вимірювання відстані до них за допомогою радіохвиль. В основі радіолокації лежить явище відбивання УКХ від предметів.

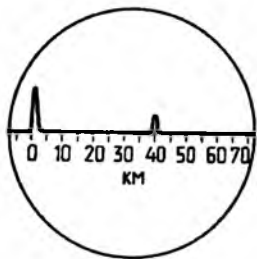


Рис. 19.14

Радіолокатор (радар) – це радіопередавач і радіоприймач, які мають спільну антену, що має перемикач з приймання на передавання. Ця антена створює гостронаправлене випромінювання – радіопромінь – короткими імпульсами тривалістю 10^{-6} с. Між двома послідовними імпульсами антена автоматично перемикається на приймання електромагнітної хвилі, відбитої від досліджуваного об'єкта.

У момент посилання радіосигналу датчик часу починає зміщувати електронний промінь. Радіосигнал надходить в антену, випромінюється у простір і одночасно створює на екрані електронно-променевої трубки відхилення електронного променя вздовж вертикалі, що зображено в лівій частині рис. 19.14 над нульовою поділкою шкали.

Радіосигнал, відбитий від предмета, приймає та сама антена, потім він проходить через приймач і на екрані електронно-променевої трубки дає вертикальне відхилення променя на деякій відстані від першого відхилення (рис. 19.14).

Знаючи час руху променя по горизонталі, відстань між вертикальними відхиленнями можна проградувати в кілометрах.

Напрям, в якому перебуває виявлений об'єкт, визначається положенням антени радіолокатора, при якому на екрані електронно-променевої трубки з'являється відбитий радіосигнал.

Радіолокацію і її методи широко застосовують як для воєнних, так і для мирних цілей. За її допомогою розв'язують завдання повітряної і морської навігації, визначено віддаль до Місяця і планет, спостерігають за метеоритами. Область застосування радіолокації дедалі розширюється.

Радіоастрономія

На відміну від радіолокації, яка досліджує тіла за допомогою відбитих ними радіохвиль, *радіоастрономія досліджує небесні тіла за їх власним радіовипромінюванням*. Радіоастрономічні спостереження здійснюють радіотелескопами, пристроями, що складаються з антенної системи і чутливого радіоприймача з підсилювачем. Найбільший телескоп у світі – РАТАН-600 (діаметр 600 м).

Джерела випромінювання в радіоастрономії – галактики, міжзоряне галактичне середовище, зорі, Сонце, планети, Місяць тощо.

Радіовипромінювання зір – це електромагнітне випромінювання їх у діапазоні радіохвиль. Радіовипромінювання в основному відбувається від нейтрального водню на довжині хвилі 0,21 м, а також від іонізованого гарячого водню світлих туманностей. Крім того, галактики є джерелами нетеплового

радіовипромінювання, причиною якого є гальмування електронів магнітним полем галактик. Таке випромінювання називають *синхротронним*.

У 1963 р. радіоастрономи відкрили нові зіркоподібні об'єкти – квазари (від лат. – зіркоподібне радіоджерело). Є кілька гіпотез походження квазарів. Вважають, що квазари – це великі куски матерії, викинуті з ядра Галактики під час вибуху, що стався в ньому. У спектрах цих об'єктів переважають лінії іонізованих елементів, що свідчать про тривалі вибухові процеси, які генерують потужне радіовипромінювання.

У 1967 р. було відкрито нові космічні джерела електромагнітного імпульсного випромінювання – *нейтронні зорі – пульсари*. У процесі обертання і одночасної пульсації такої зорі виникає випромінювання, яке повільно змінюється, що, очевидно, пов'язано із сповільненням обертання нейтронної зорі. Радіохвилі випромінюються пульсарами у вигляді окремих імпульсів з періодичністю, точність якої порівнянна з точністю кварцових і атомних еталонів часу. З відомих тепер пульсарів один знаходиться в Крабоподібній туманності, його період 0,033 с.

Сучасні дослідження дали можливість не тільки виявити тисячі космічних радіоджерел (Сонце, нейтронні зорі, квазари і т. д.), а й дослідити їх спектри. Було відкрито спектральні лінії багатьох хімічних елементів неорганічних і органічних молекул, що дало можливість підняти завісу над процесами утворення зір і планетних систем. Відкриття фонового (*реліктового*) випромінювання було підтвердженням моделі “гарячого” Всесвіту. Ці дослідження тривають.

Короткі висновки

- Електричне і магнітне поля – прояви єдиного цілого – електромагнітного поля. Електромагнітне поле – особлива форма матерії. Воно існує реально, тобто незалежно від нас, від наших знань про нього. Невід'ємною характеристикою матерії є енергія. Енергія електромагнітного поля дорівнює сумі енергій електричного і магнітного полів:

$$W = W_e + W_m,$$

$$W = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} V + \frac{B^2}{2\mu_0} V.$$

Густина енергії електромагнітного поля дорівнює

$$w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

- Електромагнітні хвилі – це змінне електромагнітне поле, яке поширюється в просторі. Електромагнітні хвилі поперечні. Швидкість поширення електромагнітних хвиль – величина скінченна, вона визначається електричними і магнітними властивостями середовища:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}}$$

У вакуумі швидкість електромагнітної хвилі дорівнює швидкості світла ($3 \cdot 10^8$ м/с).

- Електромагнітні хвилі випромінюються в процесі швидких коливань електричних зарядів I . Уперше електромагнітні хвилі добув Герц. Ідея практичного використання електромагнітних хвиль для передавання інформації належить О. С. Попову – винахіднику радіо.
- Сучасні дослідження дали можливість виявити велику кількість космічних радіоджерел. Інформація, добута від них, дає можливість для побудови гіпотез процесів утворення зір і планетних систем.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Чому дорівнює густина енергії електромагнітного поля? 2. Що являє собою електромагнітна хвиля? 3. Від чого залежить швидкість поширення електромагнітної хвилі? 4. Що називають довжиною електромагнітної хвилі? 5. Що таке відкритий коливальний контур? 6. На які види поділяють електромагнітні хвилі? 7. Як генерують і приймають електромагнітні хвилі? 8. З яких основних частин складаються і як працюють передавач і приймач радіохвиль? 9. Як здійснюється телевізійна передача? 10. У чому полягає принцип радіолокації? Де її застосовують? 11. Що ви знаєте про радіоастрономію? 12. Розкажіть про радіовипромінювання зір.

РОЗДІЛ 5 ОПТИКА

Оптика – розділ фізики, в якому розглянуто закономірності випромінювання, поглинання і поширення світла. Оптичне випромінювання – це електромагнітні хвилі, тому оптика є частиною загального вчення про електромагнітне поле. За традицією оптику поділяють на геометричну і фізичну.

Геометрична оптика не розглядає питань природи світла, її основними законами є прямолінійне поширення світла, відбивання і заломлення його. На основі законів геометричної оптики розраховують і конструюють оптичні прилади від лінз до окулярів і складних об'єктивів для величезних астрономічних інструментів. Фізична оптика вивчає проблеми, пов'язані з природою світла та світлових явищ.

Природа світла – двоїста. З одного боку, світло є електромагнітною хвилею, з другого – це потік частинок – фотонів. Дуалізм світла, зокрема, характеризується формулою Планка $\epsilon = h\nu$, оскільки енергія фотона є квантовою характеристикою, а частота коливань – хвильовою. Гіпотеза Планка про дискретність випромінювання поклала початок квантовій фізиці.

Глава 20 ПРИРОДА СВІТЛА

§ 180. Коротка історія розвитку уявлень про природу світла

Уявлення про дію світла як про деякий об'єктивний процес уперше виникло в античній період. Термін “світло”, який застосовували для позначення цього процесу, що діяв на око і спричинював зорові відчуття, пізніше дістав ширший зміст. *Оптика* (від грец. “оптикас” – зоровий), як спочатку називали вчення про видиме світло, надалі стала вченням про короткі електромагнітні хвилі взагалі. Предметом оптики було не тільки вивчення хвиль, які спричинювали в органах зору людини відчуття світла, а й довших і коротших хвиль.

Оптика, яка розвивалась у зв'язку із запитам матеріального життя суспільства, до XVIII ст. досягла великих успіхів, особливо в галузі астрономії. Що ж до поглядів на природу світла, то вони з часом змінювались.

З кінця XVII ст. в оптиці йшла боротьба між корпускулярною і хвильовою теоріями світла. Автор першої (І. Ньютон) вважав світло *поток*ом *корпускул* (від лат. “corpuskula” – тільце), які викидаються світним тілом і летять у просторі прямолінійно. З цим уявленням добре узгоджувались відомі на той час закон прямолінійного поширення світла і закон відбивання. Теорія Ньютона пояснювала і закон заломлення світла, причому з неї випливало, що в густішому середовищі світло поширюється з більшою швидкістю, ніж у менш густому.

Хвильову теорію світла запропонував сучасник Ньютона голландський учений Х. Гюйгенс. Вона ґрунтувалась на аналогії між світловими явищами і хвилями, які спостерігаємо на поверхні води або іншої рідини. Теорія Гюйгенса була дещо формальною. Вона не пояснювала основного закону – закону прямолінійного поширення світла, її автор не вживав навіть поняття довжини хвилі. З цієї теорії випливало, що швидкість світла велика в менш густих середовищах і має менше значення в більш густих.

Суперечність між корпускулярною і хвильовою теоріями в питанні про швидкість поширення світла була очевидною.

Ньютонівська корпускулярна теорія світла панувала аж до 1818 р. У цьому році на одному із засідань Паризької академії наук розглядалася доповідь О. Френеля, в якій було викладено теорію, що пояснювала прямолінійність поширення світла, при цьому світло розглядалось як потік хвиль. Закон *прямолінійного поширення світла*, відомий ще за дві тисячі років до Френеля, був обґрунтований з позицій хвильової теорії світла. З цього моменту хвильова теорія надовго запанувала.

Тим часом М. Фарадей показав, що оптичні явища не є ізольованим класом процесів і що існує зв'язок між оптичними і магнітними явищами.

Нарешті, теоретичні дослідження Дж. Максвелла (1865) показали, що зміни електричного і магнітного полів не локалізовані в просторі, а поширюються із швидкістю, яка дорівнює швидкості світла. Цей теоретичний висновок пізніше був підтверджений дослідями Г. Л. Герца і П. М. Лебедева. Отже, за Максвеллом, світло – електромагнітна хвиля, яка поширюється в середовищі зі швидкістю

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (20.1)$$

де c – швидкість світла у вакуумі; v – швидкість світла в середовищі, яке має відносну діелектричну проникність ϵ і відносну магнітну проникність μ . За означенням, показник заломлення світла

$$n = c/v = \sqrt{\epsilon\mu}.$$

Останнє співвідношення зв'язує оптичні, електричні і магнітні характеристики речовини. Але з нього не випливає залежність показника заломлення

речовини від довжини світлової хвилі, хоча досліди показують, що така залежність існує (це явище називають *дисперсією світла*). Теорія Максвелла не могла пояснити це явище. Це зробив Г. А. Лоренц, який створив *електронну теорію світла*. Однак незабаром було з'ясовано, що за допомогою електронної теорії не всі дослідні факти можна пояснити.

Ці утруднення були пояснені квантовою теорією світла, яку запропонував у 1900 р. М. Планк. Теорія Планка, ґрунтуючись на ідеї дискретності всіх процесів, у тому числі й оптичних процесів випромінювання світла, дала можливість пояснити явища, які суперечать теорії Лоренца. Квантову теорію світла далі розвивали в своїх працях А. Ейнштейн, Н. Бор, В. Гейзенберг, Е. Шредінгер, П. Дірак та ін. На основі сучасних уявлень

світло має подвійну корпускулярно-хвильову природу (корпускулярно-хвильовий дуалізм): з одного боку, воно має хвильові властивості (явища інтерференції, дифракції, поляризації), з другого – це потік частинок – фотонів, які мають нульову масу спокою і рухаються зі швидкістю, яка дорівнює швидкості світла у вакуумі. Корпускулярно-хвильовий дуалізм – це прояв найзагальнішого взаємозв'язку двох основних форм матерії, які вивчає фізика, – речовини і поля.

§ 181. Електромагнітна природа світла

Під світлом тепер розуміють електромагнітне випромінювання, яке сприймає око людини. Довжина хвиль сприйнятого електромагнітного випромінювання лежить в інтервалі від 0,38 до 0,76 мкм. У фізиці часто називають світлом і невидимі електромагнітні хвилі, що лежать за межами цього інтервалу: від 0,01 до 340 мкм.

Це пов'язано з тим, що фізичні властивості цих електромагнітних хвиль близькі до властивостей світлових хвиль.

У 1873 р. Дж. Максвелл сформулював рівняння, які встановлюють в будь-якій точці простору і в будь-який момент часу зв'язок між значеннями напруженості електричного \mathbf{E} і індукцією магнітного \mathbf{B} полів, густин електричного струмів \mathbf{j} і зарядів. З теорії Максвелла випливало, що зміни електричних і магнітного полів взаємозв'язані. На основі цієї теорії було сформульовано найважливіше поняття у фізиці – *електромагнітне поле*. У рівняння Максвелла ввійшла швидкість, з якою мають поширюватись у просторі змінювані електричне і магнітне поля, тобто електромагнітна хвиля. Ця швидкість дорівнює швидкості *світла*. Ось що про це сказав Максвелл: “Навряд чи ми можемо уникнути висновку, що світло – це поперечний хвильовий рух тієї самої природи, яка спричинює електричні і магнітні явища”. Отже, на основі своїх теоретичних досліджень Максвелл зробив висновок:

світло має електромагнітну природу.

Електромагнітна теорія світла експериментально була підтверджена в дослідях Герца, який показав, що електромагнітні хвилі, як і світло на межі поділу двох середовищ, зазнають відбивання і заломлення. Крім того, тотожність природи світлових і електромагнітних хвиль підтверджувалась однаковою швидкістю їх поширення.

З рівнянь Максвелла для електромагнітного поля, що визначають зв'язок між \mathbf{E} і \mathbf{B} , виведено формулу (20.1), яка пов'язує швидкість поширення світла і електромагнітних хвиль у речовині з її електричними і магнітними властивостями.

Амплітуди гармонічних коливань частоти ν (частота хвилі), які здійснюють вектори \mathbf{E} і \mathbf{B} електромагнітної плоскої монохроматичної хвилі, що поширюється, описуються виразами

$$E = E_0 \sin(2\pi\nu t + \varphi_0), \quad B = B_0 \sin(2\pi\nu t + \varphi_0), \quad (20.2)$$

де E_0 і B_0 – максимальні (амплітудні) значення векторів \mathbf{E} і \mathbf{B} ; φ_0 – початкова фаза. Вектори \mathbf{E} і \mathbf{B} завжди взаємно перпендикулярні і перпендикулярні до напрямку поширення (рис. 20.1) хвилі.

Електромагнітні хвилі – поперечні.

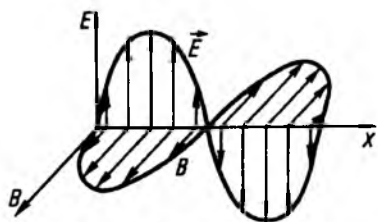


Рис. 20.1

З рис. 20.1 видно, що вектори \mathbf{E} і \mathbf{B} змінюються з часом за гармонічним законом. Вони одночасно досягають максимального і мінімального (нульового) значень. За час, який дорівнює періоду коливань T , вектори мають максимальні значення в моменти часу $T/4$ і $3T/4$ і нульові значення в моменти часу

$0, T/2$ і T . Довжиною хвилі λ називають відстань, яку електромагнітна хвиля проходить за час, що дорівнює періоду T , тобто за час повного коливання векторів \mathbf{E} і \mathbf{B} :

$$\lambda = cT. \quad (20.3)$$

Параметри, які характеризують електромагнітну хвилю, пов'язані між собою співвідношенням

$$c = \nu\lambda. \quad (20.4)$$

Поняття електромагнітної природи світла не тільки пояснювало спостережувані світлові явища, а й дало можливість передбачити таке явище, як тиск світла, який експериментально встановив російський фізик П. М. Лебедев (1899). Це було справжнім тріумфом електромагнітної природи світла. Ось що писав англійський фізик Томсон: “Я все своє життя воював

з Максвеллом, не визнаючи його світлового тиску, і ось досліди Лебедева змусили мене здатися”. Отже,

світло – це електромагнітні хвилі, які можуть поширюватись як у середовищі, так і у вакуумі.

§ 182. Швидкість поширення світла

Досліди Ремера і Майкельсона

З давніх давен люди робили спроби виміряти швидкості світла і звуку. Першу спробу визначити швидкість світла зробив Г. Галілей у 1607 р. Він запропонував метод визначення швидкості світла, схожий на той метод, за допомогою якого він визначив швидкість звуку. Але ця спроба зазнала невдачі. Труднощі вимірювання швидкості світла зв'язані з тим, що вона дуже велика. Тільки в 1675 р. датський астроном О. Ремер, спостерігаючи затемнення супутників Юпітера, показав, що швидкість поширення світла – величина скінченна. Схему методу Ремера зображено на рис. 20.2. Відстань від Юпітера (Ю) до Сонця більша за відстань від Землі (З) до Сонця приблизно в 5 раз. Метод Ремера ґрунтується на спостереженні затемнення супутника Юпітера U_0 . Ремер визначив, що при спостереженні затемнення тоді, коли Юпітер і Земля знаходяться на найменшій відстані між собою (положення $Ю_1$ і $З_1$), затемнення настає раніше, ніж тоді, коли планети найбільше віддалені одна від одної (положення $Ю_2$ і $З_2$). Запізнювання затемнення пов'язане з тим, що при найбільшому віддаленні планет одна від одної світло має пройти додаткову відстань, яка дорівнює діаметру орбіти Землі. Знаючи час запізнення затемнення і діаметр орбіти Землі, можна визначити швидкість світла. У той час Ремер не міг знайти досить точного значення швидкості світла, бо діаметр земної орбіти не був ще вимірюваний досить точно та й точність вимірювання часу була не дуже висока. Сучасне значення швидкості світла за методом Ремера, близьке до $3 \cdot 10^8$ м/с.

Було запропоновано ще кілька методів вимірювання швидкості світла. Вперше в земних умовах швидкість світла виміряв французький фізик І. Фізо в 1849 р. Метод Фізо також дав значення швидкості світла, близьке до $3 \cdot 10^8$ м/с. Згодом метод Фізо вдоско-

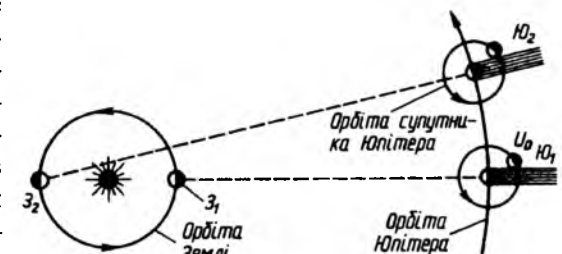


Рис. 20.2

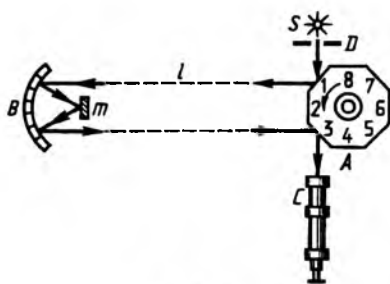


Рис. 20.3

налив американський фізик А. Майкельсон. Схему досліду Майкельсона подано на рис. 20.3.

Для вимірювання швидкості світла Майкельсон скористався двома гірськими вершинами (Антоніо і Вільсон), відстань l між якими було старанно виміряно. На вершині однієї гори було встановлено джерело світла S . Світло від нього, пройшовши щілину D , падало на восьмигранну дзеркальну призму A .

Відбите від дзеркальної грані призми світло падало на вгнуте дзеркало B , встановлене на вершині іншої гори. Відбившись від нього, світло падало на дзеркало m і, відбившись, знову на дзеркало B , після чого потрапляло на другу грань дзеркальної призми A . Відбите від призми A світло вловлювалось за допомогою зорової труби C . Призма A оберталася з такою швидкістю, щоб у зорову трубу C безперервно було видно зображення щілини D . Це можливо тоді, коли за час повороту призми на $1/8$ оберту світло проходить відстань $2l$. Майкельсон визначив швидкість світла, близьку до $3 \cdot 10^8$ м/с.

Крім того, він визначив швидкість світла у вакуумі та інших середовищах. З цих дослідів було зроблено важливі висновки:

по-перше, швидкість світла у вакуумі більша, ніж в інших середовищах; по-друге, швидкість світла не залежить від швидкості джерела, тобто світло не підпорядковується класичному правилу додавання швидкостей.

Це дослідне положення – незалежність швидкості світла від швидкості джерела – лежить в основі теорії відносності. У природі не існує швидкості, більшої від швидкості світла у вакуумі. За сучасними даними, швидкість світла у вакуумі $c = (299792,5 \pm 0,4)10^3$ м/с. Отже,

електромагнітна хвиля у вакуумі поширюється із швидкістю $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

§ 183. Джерела світла

Джерела світла

Під джерелами світла розуміють перетворювачі різних видів енергії в електромагнітну енергію оптичного діапазону, з умовними межами у вакуумі від 10^{-3} м до 10^{-9} м. Джерела світла поділяють на природні і штучні.

Природні джерела світла. До природних джерел світла належать Сонце, зорі, температурні розряди тощо, а також об'єкти тваринного і рослинного світу, які люмінесціюють.

Основними джерелами світла у Всесвіті є зорі, в яких відбувається реакція термоядерного синтезу.

За цієї реакції синтезується ядро гелію з чотирьох ядер водню з виділенням енергії.

Найближча до нас зоря *Сонце* – потужне джерело енергії, яке постійно випромінює її в усьому діапазоні електромагнітних хвиль. Це випромінювання значною мірою впливає на всі планети Сонячної системи – нагріває їх, впливає на атмосфери, дає світло і тепло, потрібне для життя на Землі.

Штучні джерела світла. Ці джерела розрізняють залежно від того, який процес лежить в основі випромінювання оптичного діапазону.

Джерела світла є теплові і ті, що люмінесціюють. До теплових джерел світла належать електричні лампи розжарювання, випромінювачі з газовим нагріванням. Вони мають суцільний спектр, положення максимуму якого залежить від температури речовини.

У джерелах, які люмінесціюють, використовується люмінесценція газів або твердих тіл. У цих джерелах електрична енергія перетворюється в світлове випромінювання, якщо електричний струм проходить через гази або пару металу (газові розряди). Спектр випускання більшості газорозрядних джерел лінійчатий, характерний для газу або пари, в якому відбувається розряд.

Більшість штучних і природних джерел не є когерентними. *Когерентне тільки випромінювання лазерів* (оптичних квантових генераторів). Когерентність хвиль означає рівність їх частот і сталу в часі різницю фаз.

§ 184. Світловий потік. Сила світла

Енергія світлового випромінювання

Світло – це форма енергії, що поширюється в просторі у вигляді електромагнітних хвиль з частотами, які сприймає око людини, тобто з довжинами хвиль приблизно від 0,38 до 0,76 мкм. Звичайно, крім видимої області, в поняття світла включають прилеглі широкі області спектра електромагнітних хвиль – інфрачервону і ультрафіолетову, які вивчають оптичними методами. Область спектра, яку включають у поняття світла, не має точних меж і принципових відмінностей від інших областей спектра електромагнітних хвиль. Але саме в цьому діапазоні довжин хвиль починає істотно проявлятися квантовий характер електромагнітного випромінювання. Згідно з двоїстою квантово-хвильовою природою світла, існують квантовий і хвильовий аспекти теорії світла, хоч принципово в будь-якому оптичному явищі проявляються його і хвильові, і квантові властивості.

Фотометрія

Розділ фізичної оптики, присвячений вимірюванню електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, називають *фотометрією*. Основною характеристикою процесів випромінювання, поширення і поглинання світла є потік випромінювання. *Потоком випромінювання* називають відношення енергії випромінювання до часу, за який воно відбулося. Ми побачимо, що потік випромінювання має розмірність потужності. Як і всяку потужність, потік світлової енергії виражають у ватах. Деякі приймачі променистої енергії, наприклад термоелементи, реагують тільки на кількість поглинутої енергії незалежно від спектрального складу випромінювання. Такого типу характеристики випромінювання називають *енергетичними*.

У техніці широко застосовують приймачі, реакція яких залежить не тільки від енергії, яку приносить світло, а й від його спектрального складу. Реакція таких приймачів на два типи випромінювання, які мають однако-ву енергію, але різний спектральний склад, різна. Такими селективними (вибірними) приймачами є фотоелементи, фотопластинки і особливо око людини.

Точкове джерело

Джерело світла вважають точковим, якщо його розміри дуже малі порівняно з відстанню, на якій оцінюють його дію. Так, наприклад відстані до зір настільки перевищують їх розміри, що їх можна вважати точковими джерелами, незважаючи на їх величезні розміри. Точкове джерело – така сама ідеалізація, як, наприклад, матеріальна точка, ідеальний газ тощо. Вважають, що точкове джерело випромінює промені рівномірно в усіх напрямках.

Усі питання, пов'язані з визначенням світлових величин, найпростіше можна розв'язувати тоді, коли джерело точкове.

Тілесний кут

Щоб дати поняття рівномірного випромінювання світла в усіх напрямках, треба ввести уявлення про *тілесний кут* Ω , який дорівнює відношенню площі поверхні S , вирізаної на сфері конусом з вершиною в точці O , до квадрата радіуса R сфери (рис. 20.4):

$$\Omega = S / R^2. \quad (20.5)$$

Це відношення не залежить від радіуса, бо із зростанням радіуса вирізувана конусом поверхня збільшується пропорційно квадрату радіуса. Одиницею тілесного кута є *стерадіан* (ср).

Стерадіан дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізує на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата із стороною, яка дорівнює радіусу сфери.

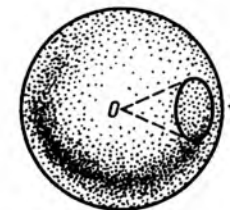


Рис. 20.4

Тілесний кут, що охоплює весь простір навколо точкового джерела, дорівнює 4π ср. *Випромінювання вважають рівномірним, якщо в будь-які однакові тілесні кути випромінюється однакова потужність.*

Світловий потік

Характеристики світлових процесів, які визначають за дією світла на око, за зоровим відчуттям світла, називають світловими величинами. Зорове відчуття змінюється кількісно і якісно залежно від потужності променистої енергії та її спектрального складу. З одного боку, ця відмінність якісна, тобто

випромінювання різних довжин хвиль спричинює різні за кольором світлові відчуття.

З іншого боку,

потоки різних довжин хвиль спричинюють відчуття різної інтенсивності.

Око по-різному сприймає випромінювання залежно від його довжини хвилі, тобто добре розрізняє кольори.

Найчутливіше око до зелених променів.

Тому важливо знати не просто кількість світлової енергії, яку реєструють прилади, а величину, що характеризує дію світла на око. Такою величиною є світловий потік. *Світловий потік Φ характеризує потужність видимої частини випромінювання, яке поширюється всередині даного тілесного кута, що оцінюється за дією цього випромінювання на нормальне око.*

Сила світла

Сила світла I – основна світлова величина, яка характеризує свічення джерела видимого випромінювання в деякому напрямі. Вона дорівнює відношенню світлового потоку Φ до тілесного кута, в якому цей світловий потік поширюється:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (20.6)$$

Оскільки повний тілесний кут дорівнює 4π ср, то сила світла точкового джерела дорівнює

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (20.7)$$

Одиницею сили світла I є *кандела* (кд). Кандела – основна одиниця СІ. Кандела – сила світла, яке випускається з поверхні площею $1/600\,000\text{ м}^2$ повного випромінювача в перпендикулярному напрямі при температурі випромінювача, що дорівнює температурі тверднення платини при тиску $101\,325\text{ Па}$.

Як випливає з (20.6), світловий потік Φ дорівнює добутку сили світла джерела на тілесний кут Ω , в який надходить випромінювання:

$$\Phi = I\Omega \quad (20.8)$$

Одиницею світлового потоку є *люмен* (лм).

Люмен – світловий потік, що його випускає точкове джерело в тілесному куті 1 ср при силі світла 1 кд .

§ 185. Спектральна чутливість ока

Для характеристики світлового сприймання оком променистої енергії, тобто щоб установити зв'язок світлового потоку з енергетичним потоком випромінювання, вводиться поняття відносної спектральної світлової ефективності (відносної видимості) випромінювання. Відносною спектральною світловою ефективністю V_λ випромінювання з довжиною хвилі λ називають відношення світлового потоку Φ_λ , монохроматичного випромінювання з певною довжиною хвилі до потоку енергії випромінювань Φ_{max} з довжиною хвилі $\lambda_{\text{max}} = 0,555\text{ мкм}$:

$$V_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_{\text{max}}}$$

Міжнародна комісія з освітлення стандартизувала середню криву відносної видимості для світлотехнічних розрахунків. На рис. 20.5 подано стандартизовану криву відносної видимості для денного 2 і

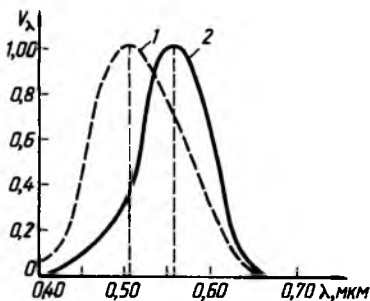


Рис. 20.5

присмеркового I освітлення: по осі абсцис відкладено довжини хвиль у мікрометрах, по осі ординат – значення відносної видимості V_λ .

Найбільшому значенню відносної видимості денного освітлення відповідає $\lambda = 0,555\text{ мкм}$. В разі присмеркового освітлення крива зміщується в бік коротких довжин хвиль, максимум припадає на довжину хвилі $\lambda = 510\text{ мкм}$.

Якщо людина довго перебуває в темряві, то око пристосовується до сприйняття малих світлових потоків. Таке збільшення чутливості ока називають *темновою адаптацією*.

Око сприймає й великі світлові потоки, що перевищують найменший потік, який сприймає око, в 10^{12} раз.

Експериментально встановлено, що монохроматичному потоку випромінювання 1 Вт з довжиною хвилі $\lambda = 0,555\text{ мкм}$ (тобто в умовах максимальної спектральної чутливості ока людини) відповідає світловий потік 683 лм . Величину $V = 683\text{ лм/Вт}$ називають *світловим еквівалентом потужності*. Знаючи V , можна перейти від енергетичних величин випромінювання до світлових.

§ 186. Освітленість. Закони освітленості

Освітленість

Відношення світлового потоку, що падає на поверхню, до площі S цієї поверхні називають *освітленістю*:

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (20.9)$$

Одиниця освітленості – *люкс* (лк).

Люкс – освітленість, яку створює світловий потік 1 лм при рівномірному розподілі його по площі 1 м^2 .

Закони освітленості

Як випливає з досліду, освітленість поверхні залежить як від сили світла джерела, так і від відстані між джерелом світла і освітлюваною поверхнею і від положення цієї поверхні відносно падаючих променів світла. Звичайно положення поверхні S у просторі задають положенням вектора нормалі \mathbf{n} до неї (рис. 20.6, а). Якщо положення поверхні в

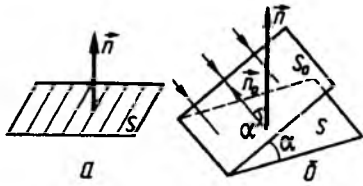


Рис. 20.6

просторі змінюється, то відповідно змінюється в просторі орієнтація вектора нормалі. Якщо поверхня сферична, то напрям вектора нормалі в будь-якій точці збігається з напрямом радіуса-вектора, проведеного в розглядувану точку.

Розглянемо випадок, коли в центрі сфери радіуса R встановлено точкове джерело світла, сила світла якого I . У цьому разі всі промені падають на внутрішню поверхню сфери перпендикулярно до неї, тобто кут падіння променів дорівнює нулю. Використавши формули (20.7) і (20.9) і врахувавши, що площа сфери $S = 4\pi R^2$, дістанемо *перший закон освітленості*:

освітленість у кожній точці поверхні, на яку перпендикулярно до неї падає світло, пропорційна силі світла джерела і обернено пропорційна квадрату відстані від джерела світла до освітлюваної поверхні:

$$E = \frac{I}{R^2}. \quad (20.10)$$

Припустимо, що поверхня S довільно орієнтована в просторі. Нехай вектор нормалі до неї \mathbf{n} і падаючі світлові промені утворюють кут α (рис. 20.6, б).

Розглянемо проекцію площадки площею S на площину, перпендикулярну до напрямку поширення світлових променів. Площу цієї проекції визначимо за формулою $S_0 = S \cos \alpha$, де α – кут між \mathbf{n} і \mathbf{n}_0 ; \mathbf{n}_0 – вектор нормалі до S_0 . Як впливає з рис. 20.6, б, кут між нормальми до площини дорівнює куту між площинами (кути із взаємно перпендикулярними сторонами). На площадку S падає світловий потік $\Phi = ES$, де E – освітленість площадки S , а на площадку S_0 – світловий потік $\Phi = E_0 S_0$ або $\Phi = E_0 S \cos \alpha$, де E_0 – освітленість площадки S_0 . Оскільки на площадку S і на її проекцію S_0 падає один і той самий потік Φ , маємо $ES = E_0 S \cos \alpha$. Звідси впливає, що

$$E = E_0 \cos \alpha. \quad (20.11)$$

Формула (20.11) виражає *другий закон освітленості*:

освітленість поверхні, створювана паралельними променями, прямо пропорційна косинусу кута падіння променів.

Значення E_0 можна визначити за формулою (20.10), оскільки площадка S_0 розміщена перпендикулярно до падаючих світлових променів. Підставивши (20.10) у (20.11), дістанемо формулу, яка об'єднує перший і другий закони освітленості:

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha. \quad (20.12)$$

Освітленість – величина скалярна, тому тоді, коли світло на поверхню падає від кількох джерел, освітленість у кожній точці поверхні дорівнює арифметичній сумі освітленостей, створюваних у цій точці кожним із джерел окремо.

Фотометри

Фотометр – це прилад для порівняння сили світла. Є фотометри, пристосовані для безпосереднього вимірювання освітленості. Такі фотометри називають *люксметрами*. Прикладом люксметра може бути фотоекспонетр, який застосовують у кіно- і фотозйомці (рис. 20.7). Створення достатньої освітленості робочого місця дає можливість зберігати зір і запобігти перевтомі очей.

Оптимальні норми освітленості

Освітленість	E , лк
При кінозйомці в павільйоні	10 000
На робочому місці для робіт:	
тонких	200
грубих	30
Для читання	75–100
На екрані кінотеатру	20–80
У коридорі і на сходах	15
На вулиці і площі	4



Рис. 20.7

Порушення світлового режиму призводить насамперед до короткозорості і передчасного зниження гостроти зору. Так само негативно впливає і дуже потужне світло. Для різних робіт встановлено оптимальні норми освітленості, виконання яких має суворо контролюватись. Деякі з них наведені в таблиці.

§ 187. Світність зір. Абсолютна зоряна величина

Видима зоряна величина

Спостерігаючи зоряне небо в околицях освітленого вогнями міста, ми бачимо тільки невелику кількість яскравих зір. Якщо спостерігати зоряне небо в місцевості, де немає яскравих вогнів, особливо в безмісячну ніч, то поряд з яскравими зорями можна побачити менш яскраві і

зовсім слабкі. Зорі розрізняють за видимою яскравістю, або, як кажуть астрономи, за блиском.

Термін “зоряна величина” характеризує не розмір, а лише блиск зорі, тобто світловий потік, що надходить на Землю від зорі. Дослідження показали, що світлові потоки, які надходять до нас від зір, різні. Так, наприклад, світловий потік від найяскравішої зорі неба Сиріуса в 750 раз більший від світлового потоку зорі б1 Лебеда, яку ледве можна побачити неозброєним оком. Світловий потік Сонця в $2 \cdot 10^{10}$ раз більший від світлового потоку Сиріуса. Така велика відмінність у світлових потоках зір створює незручності для використання цієї величини. Замість неї застосовують *видиму зоряну величину* m , яка пов’язана із світловим потоком Φ співвідношенням

$$m = -2,5 \lg \Phi + C, \quad (20.13)$$

де C – стала, яку вибирають так, щоб видимі зоряні величини відповідали шкалі давньогрецького астронома Гіппарха, який у II ст. до н. е. поділив зорі на шість величин залежно від їх блиску. Найяскравіші зорі називали *зорями 1-ї зоряної величини*, а найслабші, доступні для спостереження неозброєним оком, – *зорями 6-ї величини*. З формули (20.13) випливає, що збільшенню світлового потоку в 100 разів відповідає зменшення видимої зоряної величини точно на п’ять одиниць.

Зменшення видимої зоряної величини на одиницю означає збільшення світлового потоку в 2,512 раза. Тому світловий потік від зір 6-ї величини в 100 разів менший від світлового потоку від зір 1-ї величини.

Чим більший блиск зорі, тим менша її видима зоряна величина.

У зв’язку з точними вимірюваннями блиску зір були запроваджені дробові і навіть від’ємні зоряні величини. Найяскравіша зоря північної півкулі неба – Вега (α -Ліри), її зоряна величина 0,14. Видима зоряна величина найяскравішої зорі всього неба – Сиріуса – дорівнює – 1,58. Видима зоряна величина Сонця дорівнює – 26,7, а Місяця у повні – 12,5.

Світність

Однією з найважливіших фізичних характеристик зорі є *світність* L – *світлова енергія, яку випромінює зоря за одиницю часу*. Світловий потік зорі залежить від її відстані до спостерігача. Світність зір не залежить від положення спостерігача. Світність Сонця дорівнює приблизно $4 \cdot 10^{26}$ Дж/с. Це дуже значна величина. Вироблена людством енергія всіх видів менша від однієї тисячної частки енергії, яку випромінює Сонце за секунду.

Знайдемо співвідношення, яке зв’яже світність L зорі з її видимою зоряною величиною і відстанню до спостерігача.

Нехай спостерігач перебуває на відстані R від зорі. Оточимо зорю сферою радіуса R . Поверхня цієї сфери $4\pi R^2$. Поділивши світність на поверхню сфери, дістанемо світловий потік

$$\Phi = L / (4\pi R^2). \quad (20.14)$$

Підставивши у формулу (20.13) вираз (20.14), дістанемо

$$m = -2,5 \lg \frac{L}{4\pi R^2} + C. \quad (20.15)$$

Абсолютна зоряна величина

Уявимо собі, що всі зорі розмістились на однаковій відстані від нас $R = 10$ пк. Для цього найближчим зорям довелося б відсунутись, а більшості зір наблизитись до нас. Порівнявши тепер видимі зоряні величини зір, можна було б зробити висновок про те, яка зоря випромінює більше енергії.

Абсолютною зоряною величиною M називають ту видиму зоряну величину, яку мала б зоря на відстані 10 пк.

Якщо у формулу (20.15) підставити $R = 10$ пк, то замість m треба написати M :

$$M = -2,5 \lg \frac{L}{4\pi \cdot 10^2} + C. \quad (20.16)$$

Віднявши від (20.16) рівність (20.15), дістанемо

$$M - m = -5 \lg R + 5,$$

або

$$M = m - 5 \lg R + 5. \quad (20.17)$$

За формулою (20.17) можна визначити абсолютну зоряну величину, якщо відомі видима зоряна величина m і відстань R до зорі. Якщо Сонце відсунути на відстань 10 пк, то воно перетвориться в зірочку із зоряною величиною $M = +4,9$. Абсолютна зоряна величина Сиріуса $M = +1,4$. Абсолютні зоряні величини дуже яскравих зір від’ємні і досягають $M = -9$. Знання абсолютної зоряної величини зорі замінює знання її світності, так само як знання видимої зоряної величини замінює знання світлового потоку зорі.

Зменшення абсолютної зоряної величини на одиницю означає збільшення світності зорі в 2,512 раза.

Короткі висновки

- На основі сучасних уявлень світло має подвійну корпускулярно-хвильову природу.

З одного боку, воно має хвильові властивості, тобто є електромагнітною хвилею, з другого – це потік частинок – фотонів, які рухаються із швидкістю світла у вакуумі $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

- Швидкість поширення світла в середовищі залежить від електричних і магнітних його властивостей:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Величина $n = c/v = \sqrt{\epsilon\mu}$ є показником заломлення середовища.

- Параметри, які характеризують електромагнітну хвилю, пов'язані між собою співвідношенням

$$c = v\lambda.$$

- Електромагнітні хвилі поперечні.
- Джерела світла поділяють на природні і штучні. Основним природним джерелом світла у Всесвіті є зорі.
- Розділ оптики, в якому розглядають вимірювання електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, називають фотометрією. Основними поняттями фотометрії є світловий потік, сила світла, освітленість.

Світловий потік характеризує потужність видимої частини випромінювання, яке поширюється всередині даного тілесного кута і яке оцінюють за зоровим відчуттям.

Сила світла дорівнює відношенню світлового потоку до значення тілесного кута, в якому цей світловий потік поширюється:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

Освітленість дорівнює відношенню світлового потоку, який падає на поверхню, до площі цієї поверхні:

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Освітленість визначають за формулою

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha.$$

Силу світла виражають у канделах, світловий потік – у люменах, освітленість – у люксах.

- Зорі розрізняють за видимою яскравістю або блиском. Видима зоряна величина характеризує не розмір, а тільки блиск зорі, тобто характеризує світловий потік, що надходить на Землю від зорі. Чим більший блиск зорі, тим менша її видима зоряна величина. Світність – це енергія, яку випромінює зоря за одиницю часу. Абсолютна зоряна величина – це видима зоряна величина, яку мала б зоря на відстані 10 пк. Зменшення абсолютної величини на одиницю означає збільшення світності зорі в 2,512 рази.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Яка природа світла?
2. Яка залежність між електричними і магнітними властивостями середовища і показником заломлення?
3. Як експериментально визначали швидкість світла?
4. Чому дорівнює швидкість світла у вакуумі?
5. Як пов'язані між собою параметри, що характеризують електромагнітну хвилю?
6. Назвіть природні і штучні джерела світла.
7. Що вивчає фотометрія?
8. Яке джерело світла називають точковим? Наведіть приклади.
9. Дайте означення таких величин: світлового потоку, сили світла, освітленості. Якими одиницями їх вимірюють?
10. Сформулюйте закони освітленості.
11. Що таке фотометр? Які типи фотометрів ви знаєте?
12. Що характеризує видима зоряна величина?
13. Що таке світність зорі?
14. Що називають абсолютною зоряною величиною і що вона характеризує?

Приклад розв'язування задачі

Задача. Світильник з молочного скла має форму кулі. Його підвішено на висоті $h = 1$ м над центром круглого стола діаметром 2 м. Сила світла кулі 50 кд. Визначити світловий потік лампи, освітленість у центрі і на краю стола.

Дано: $I = 50$ кд; $d_1 = 0,2$ м; $d_2 = 2$ м; $h = 1$ м.

Знайти: Φ , E_1 , E_2 .

Розв'язання. Світловий потік Φ , який випромінює джерело світла силою I ,

$$\Phi = 4\pi I.$$

Освітленість у центрі стола (рис. 20.8)

$$E_1 = \frac{I}{h^2}.$$

Освітленість на краю стола

$$E_2 = \frac{I}{r^2} \cos i,$$

де $r = \sqrt{h^2 + (d_2/2)^2}$, $\cos i = h/r$. Тому

$$E_2 = \frac{Ih}{[h^2 + (d_2/2)^2]^{3/2}}.$$

Обчислення:

$$\Phi = 12,56 \cdot 50 \text{ кд} = 628 \text{ лм}; \quad E_1 = \frac{50 \text{ кд}}{1 \text{ м}^2} = 50 \text{ лк};$$

$$E_2 = \frac{50 \text{ кд} \cdot 1 \text{ м}}{[1 \text{ м}^2 + (4/4) \text{ м}^2]^{3/2}} = 17,7 \text{ лк}.$$

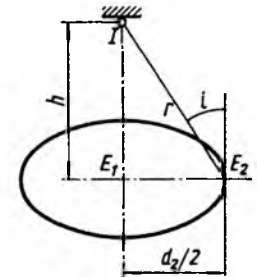


Рис. 20.8

Задачі для самостійного розв'язування

1. Лампу потужністю 1000 Вт підвішено на стовпі заввишки 8 м. Визначити освітленість на землі під лампою і на відстані 8 м від основи стовпа. Визначити світловий потік і силу світла, припустивши, що лампа є сферичним випромінювачем.
2. У дворі на висоті 6 м підвішено дві лампи, відстань між якими 8 м. Обчислити освітленість на землі під кожною з ламп і посередині між ними. Сила світла кожної лампи 500 кд.
3. Обчислити освітленість земної поверхні при висоті Сонця над горизонтом 30° . Відомо, що коли Сонце в zenіті, то освітленість земної поверхні дорівнює 100 000 лк.
4. У центрі сфери встановлено джерело світла із силою світла 60 кд. Освітленість сфери 1,5 клк. Визначити радіус сфери.
5. Який світловий потік падає на поверхню з площею 100 см^2 сонячного дня, коли освітленість досягає 100 000 лк?

ГЛАВА 21 ХВИЛЬОВІ ВЛАСТИВОСТІ СВІТЛА

§ 188. Основи хвильової теорії. Принцип Гюйгенса

Основи хвильової теорії

Розглянемо хвильову теорію поширення світла, запропоновану Гюйгенсом і розвинуту потім Ейлером, Ломоносовим, Юнгом, Френелем. За цією теорією, світло поширюється внаслідок хвильового руху особливого середовища – ефіру, який має механічні властивості – пружність і густину. Отже, хвильова теорія розглядала світло як хвилі в ефірі, подібно до звукових у повітрі або хвиль на поверхні води.

Принцип Гюйгенса

Для аналізу поширення світла Гюйгенс запропонував простий і наочний метод, який згодом назвали *принципом Гюйгенса*. Його можна сформулювати так:

кожна точка середовища, до якої доходить світлове збудження, є, в свою чергу, центром вторинних хвиль.

Поверхня, що огинає в деякий момент часу ці вторинні хвилі, позначає положення фронту хвилі, яка справді поширюється в цей момент часу (рис. 21.1).

Неперервне геометричне місце точок середовища, які коливаються в однаковій фазі, називають хвильовою поверхнею, а множину точок, до яких дійшло коливання в даний момент часу, – фронтом хвилі. Залежно від виду фронту хвилі розрізняють плоскі та сферичні хвилі.

Нехай у момент часу t фронт хвилі, яка поширюється в однорідному ізотропному середовищі, займає положення S_1 (рис. 21.1). Кожну точку цього фронту хвилі в інтервалі часу від t до $t + \Delta t$ можна розглядати як джерело вторинних хвиль, що є сферами радіуса $v\Delta t$. У момент часу $t + \Delta t$ поверхнею фронту хвилі S_2 стане обвідна цих вторинних хвиль.

На основі хвильової теорії Гюйгенса можна було пояснити багато дослідних фактів, проте її недоліком була необхідність існування ефіру – гіпотетичного середовища, в якому поширюється світло (механічні коливання).

Дальший розвиток оптики і, зокрема, вивчення явища поляризації світла привели вчених до висновку, що світлові хвилі, на відміну від звукових, – поперечні. Але поперечні хвилі пружні, тобто хвилі, що мають механічну природу, можуть поширюватися тільки в твердих тілах.

Спроба приписати ефіру властивості твердого тіла не могла бути успішною, бо тоді ефір мав би помітно діяти на тіла, які рухаються в ньому; астрономічні спостереження свідчили протилежне. Остаточне питання про хвильову природу світла було розв'язане в працях англійського фізика Максвелла.

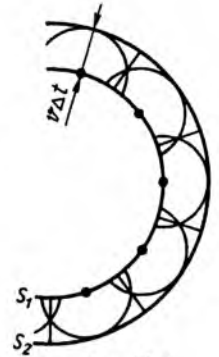


Рис. 21.1

§ 189. Закони відбивання і заломлення світла

Показник заломлення

Електромагнітні хвилі можуть поширюватись не тільки у вакуумі, а й у різних середовищах, при цьому електромагнітне випромінювання взаємодіє з речовиною. Взаємодія електромагнітної хвилі з речовиною зводиться до взаємодії з електронами речовини. В електромагнітній хвилі існують електричне E і магнітне B поля. З теорії електромагнітних хвиль випливає, що в електромагнітній хвилі $B = E/c$. Сили, які діють на електрони речовини з боку електричного і магнітного полів, відносяться як

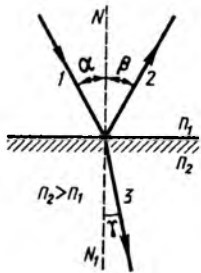


Рис. 21.2

Подивимось, як проходить світло через межу поділу двох середовищ – двох діелектриків (рис. 21.2). На межі поділу відбуваються явища відбивання і заломлення світла.

Закони відбивання

Кут між напрямом падаючого променя I і нормаллю NN_1 до межі поділу називають кутом падіння α , кут між напрямом відбитого променя 2 і нормаллю NN_1 – кутом відбивання β . Експериментально встановлено, що:

- 1) падаючий і відбитий промені і нормаль NN_1 до межі поділу лежать в одній площині;
- 2) кут падіння α дорівнює куту відбивання β .

Це твердження називають законом відбивання. Як дослідний факт він був відомий ще Евкліду.

Принцип Гюйгенса дає змогу пояснити закон відбивання від межі поділу двох середовищ.

Якщо хвилі досягають межі поділу двох середовищ, то напрям їх поширення змінюється, але вони залишаються в тому самому середовищі, тобто хвилі відбиваються.

Припустимо, що плоска хвиля, обмежена променями AO і BC (рис. 21.3), поширюючись в ізотропному середовищі, падає на межу поділу двох середовищ MM' . Кутом падіння буде кут α між нормаллю NN_1 і падаючим променем AO до поверхні MM' .

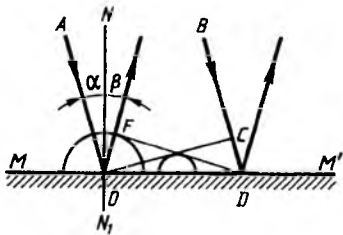


Рис. 21.3

Плоский фронт хвилі OC , в якому всі точки коливаються в одній фазі, досягає межі поділу MM' у точці O . У момент часу, коли крайній промінь BC надійде в точку D , навколо точки O , за принципом

$$\frac{eE}{e\nu B} = \frac{c}{v},$$

де c – швидкість світла; v – швидкість руху електрона. Для електронів в атомах і електронів провідності в металах $(c/v) \geq 10^2$, звідки випливає, що магнітні сили малі порівняно з електричними.

Тому вектор напруженості електричного поля називають світловим.

Гюйгенса, виникне сферична хвиля радіуса $OF = CD$, оскільки швидкість поширення хвиль в ізотропному середовищі в усіх напрямках стала. Щоб визначити напрям поширення хвилі після відбивання, скористаємось методом Гюйгенса і побудуємо обвідну DF вторинних сферичних хвиль, яка визначить фронт відбитої хвилі. Ця обвідна буде дотичною, проведеною з точки D до напівсфери з центром у точці O і до будь-якої іншої півсфери з центром у точці відбивання відповідного променя (на рис. 21.3 проміжні сферичні хвилі не показано). Отже, дотична DF буде фронтом плоскої відбитої хвилі. Промінь, відбитий у точці O , йтиме назад під кутом β і перпендикулярно до фронту хвилі DF .

Неважко показати, що прямокутні трикутники OFD і OCD рівні між собою, бо мають рівні катети $OF = CD$ і спільну гіпотенузу OD . З рівності цих трикутників випливає, що $\angle FDO = \angle COD$, яким відповідно дорівнюють кути α і β як кути із взаємно перпендикулярними сторонами. Отже, кут падіння α дорівнює куту відбивання β , тобто $\angle \alpha = \angle \beta$.

Закони заломлення

Кут γ між заломленим променем 3 і нормаллю до межі поділу називають кутом заломлення (рис. 21.2).

Експериментально, Снелліус для заломлення світла встановив, що:

- 1) падаючий I і заломлений 3 промені і нормаль NN_1 до межі поділу лежать в одній площині;
- 2) відношення синуса кута падіння α до синуса кута заломлення γ дорівнює відношенню швидкостей поширення світла в цих середовищах:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Тут v_1 і v_2 – швидкості поширення світла в середовищах, які характеризуються відповідно показниками заломлення n_1 і n_2 . Це співвідношення можна переписати у вигляді

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (21.1)$$

де $n_{21} = n_2 / n_1 = v_1 / v_2$ – відносний показник заломлення другого середовища (відносно першого).

Співвідношення (21.1) називають законом заломлення світла. Він показує,

Абсолютний показник заломлення для деяких діелектриків

Речовина	n
Алмаз	2,42
Вода	1,33
Гліцерин	1,47
Кварц	1,54
Лід	1,31
Плексиглас	1,50
Скипидар	1,47
Скло	1,57

Закони відбивання і заломлення світла є слушними для однорідних та ізотропних середовищ.

На основі принципу Гюйгенса пояснимо закон заломлення світла на межі поділу двох середовищ.

Якщо світлові хвилі переходять з одного середовища в інше, то в загальному випадку напрям їх поширення змінюється, тобто світло заломлюється.

Припустимо, що світлова хвиля, обмежена паралельними променями AO і BC (рис. 21.4), має швидкість світла в першому середовищі v_1 , а в другому – v_2 . Фронт плоскої падаючої хвилі OC досягає поділу двох середовищ у точці O . Починаючи з цього моменту, навколо точки O в другому середовищі поширюватиметься сферична хвиля із швидкістю v_2 .

Якщо швидкість світла в першому середовищі v_1 , то відстань CD в цьому середовищі світло проходить за проміжок часу $t = CD/v_1$.

За цей самий час t світло в другому середовищі пройде відстань $OF = v_2t$.

Користуючись методом Гюйгенса, побудуємо дотичну DF , яка виходить з точки D до сфери радіуса $OE = OF = v_2t$. Ця дотична є обвідною всіх елементарних сферичних хвиль у другому середовищі, тобто є фронтом заломленої хвилі, а кут γ є кутом заломлення, оскільки відрізок $OF \perp DF$.

З рисунка видно, що кут γ є кутом, що доповнює до 90° кути AOC і nOD . Тому $\angle COD$ дорівнює куту падіння α .

Розглянемо кути ODF і n_1OF . Ці кути рівні між собою як кути із взаємно перпендикулярними сторонами, а $\angle n_1OF$ –

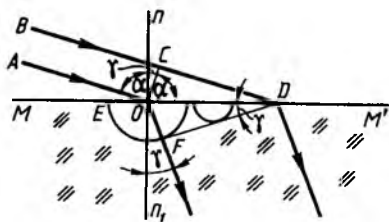


Рис. 21.4

кут заломлення γ . У прямокутних трикутників OCD і OFD сторона OD – спільна. Запишемо сторони CD і OF цих трикутників через сторону OD :

$$CD = OD \sin \alpha, \quad OF = OD \sin \gamma.$$

Поділивши першу рівність на другу, дістанемо

$$\frac{CD}{OF} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}. \quad (21.2)$$

Вище було показано, що $CD = v_1t$, а $OF = v_2t$, отже,

$$\frac{CD}{OF} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (21.3)$$

Прирівнявши праві частини рівностей (21.2) і (21.3), дістанемо

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}, \quad (21.4)$$

де n_{21} – величина, стала для двох розглядуваних середовищ, оскільки в них v_1 і v_2 також стали. З рівняння (21.4) маємо

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}. \quad (21.5)$$

Це відношення не залежить від кутів α і γ і визначається лише оптичними властивостями середовища. Слід зазначити, що

частина коливань електромагнітної хвилі не змінюється ні при відбиванні, ні при заломленні світла.

§ 190. Повне відбивання

Розглянемо випадок, коли світло поширюється з густішого середовища в менш густе. В оптично густішому середовищі промінь, який поширюється, утворює з нормаллю, проведеною до межі поділу, менший кут, ніж промінь, який поширюється в менш густому середовищі. Якщо збільшуватиметься кут падіння, то збільшуватиметься і кут заломлення. У випадку, зображеному на рис. 21.5, а, $n_2 < n_1$, тому кут заломлення завжди більший від кута падіння. При деякому значенні кута падіння він досягає значення $\pi/2$, тобто такий заломлений промінь поширюється вздовж межі поділу двох середовищ. При дальшому збільшенні кута падіння промінь у друге (тобто менш густе) середовище не переходить і повністю

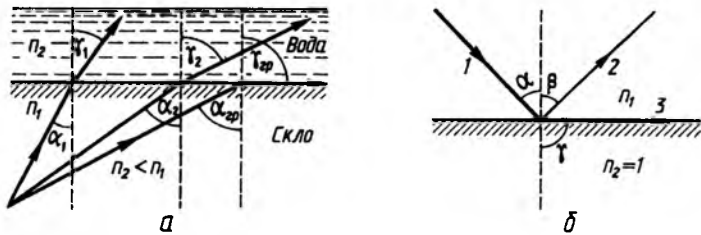


Рис. 21.5

відбивається в перше середовище. Це явище називають *повним відбиванням*. Кут падіння $\alpha_{\text{сп}}$, при якому все світло почне повністю відбиватися в перше середовище, називають *граничним кутом повного відбивання*.

Застосувавши закон заломлення, розглянемо проходження світла з речовини з показником заломлення n_1 в повітря, тобто в речовину з $n_2 = 1$ (рис. 21.5, б). За формулою (21.1), якщо $n_2 = 1$, то при явищі повного відбивання маємо $\sin \alpha_{\text{сп}} / \sin \frac{\pi}{2} = 1/n_1$, звідки $\sin \alpha_{\text{сп}} = 1/n$. У загальному випадку

$$\sin \alpha_{\text{сп}} = n_{21}. \quad (21.6)$$

Граничний кут повного внутрішнього відбивання можна визначити, якщо відомі показники заломлення двох середовищ. Явище повного внутрішнього відбивання можна спостерігати в природі: яскравий блиск крапель роси, сніжинок, бурульок. Це явище використовують в *оборотних* (рис. 21.6, а) і *поворотних призмах* (рис. 21.6, б). Принцип дії рівнобедрених прямокутних призм зрозумілий з рисунків.

Явище повного внутрішнього відбивання має велике технічне застосування у пристроях, які називають *світловодами*. Світловод складається з безлічі тонких скляних ниток, діаметр яких порядку 20 мкм, а довжина близько 1 м кожна. Ці нитки паралельні між собою і розміщені впритул. Кожна нитка оточена тонкою оболонкою із скла, показник заломлення якого менший, ніж самої нитки. Світловод має два торці, взаємне розміщення кінців ниток на обох торцях світловоду точно однакове.

Якщо біля одного торця світловоду помістити який-небудь предмет і освітити його, то на другому кінці світловоду виникне зображення цього

предмета. Зображення виникає внаслідок того, що в торець кожної з ниток потрапляє світло від якої-небудь малої області предмета. Зазначивши безлічі повних відбивань, світло виходить з протилежного торця нитки передаючи відбивання даній

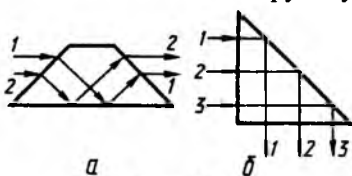


Рис. 21.6

малій області предмета. Оскільки розміщення ниток одної відносно одної точно однакове, то на другому кінці виникає відповідне зображення предмета. Чіткість зображення залежить від діаметра ниток. Чим менший діаметр кожної нитки, тим чіткіше зображення предмета. Втрати світлової енергії на шляху проходження світлового променя звичайно невеликі.

§ 191. Інтерференція світла.

Когерентність світлових променів

Інтерференція світла

Інтерференцією називають явище, яке виникає в процесі накладання двох (або кількох) світлових хвиль однакового періоду в однорідному ізотропному середовищі, внаслідок чого енергія хвиль у просторі перерозподіляється.

Необхідною умовою інтерференції хвиль є їх когерентність, тобто рівність їх частот і стала в часі різниця фаз.*

Когерентні світлові хвилі можна добути тільки від одного джерела.

Для цього треба якимсь чином поділити один промінь на два, пустити їх по різних оптичних шляхах, а потім знову з'єднати їх. Тоді різниця фаз визначиться різницею ходу променів. При сталій різниці ходу різниця фаз також стала.

Принцип суперпозиції

Для світлових хвиль, як і для будь-яких інших, є слушним принцип суперпозиції. Оскільки світло має електромагнітну природу, то застосування цього принципу означає, що результуюча напруженість електричного (магнітного) поля двох світлових хвиль, які проходять через одну точку, дорівнює векторній сумі електричних (магнітних) полів кожної з хвиль окремо.

При додаванні плоских когерентних хвиль амплітуда результуючого коливання

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (21.7)$$

де $(\varphi_2 - \varphi_1)$ – різниця фаз додаваних хвиль. Аналізуючи рівняння (21.7), зробимо висновки:

* Цю умову задовольняють монохроматичні хвилі, тобто хвилі однієї точно певної частоти (довжини хвилі) і сталої амплітуди.

1) якщо $\varphi_2 - \varphi_1 = 0, 2\pi, 4\pi, \dots, 2k\pi$, де $k = 1, 2, 3$, то $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$ і $A = A_1 + A_2$;

2) якщо $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots, (2k+1)\pi$, то $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$ і $A = |A_1 - A_2|$.

У першому випадку результуюче коливання підсилюється, у другому – послаблюється. Якщо при цьому $A_1 = A_2$, то $A_{\max} = 2A_1$, а $A_{\min} = 0$. У цьому разі світло повністю гаситься світлом.

Звичайно ці умови формулюють не через різницю фаз $\varphi_2 - \varphi_1$, а через різницю ходу хвиль δ . Відомо, що фазі $\varphi = \pi$ відповідає пройдений хвильовий шлях, який дорівнює половині довжини хвилі $\lambda/2$. Тоді умову максимумів можна сформулювати так:

результуюче коливання максимально підсилюється тоді, коли різниця ходу додавання хвиль дорівнює парному числу півхвиль або цілому числу довжин хвиль:

$$\delta = 2k(\lambda/2) = k\lambda. \quad (21.8)$$

Аналогічно формулюють умову мінімумів:

результуюче коливання ослаблюється, якщо різниця ходу додаваних хвиль дорівнює непарному числу півхвиль

$$\delta = (2k+1)\lambda/2.$$

Значення $k = 1, 2, 3, \dots$ називають порядком інтерференційного максимуму або мінімуму.

На рис. 21.7 показано, як інтерферують хвилі, що мають однакові амплітуди. Якщо різниця ходу дорівнює непарному числу півхвиль (рис. 21.7, а), то амплітуди A_1 і A_2 мають різні знаки, результуюча амплітуда $A = 0$ і хвилі гасяться. Якщо різниця ходу дорівнює парному числу півхвиль (рис. 21.7, б), то амплітуди A_1 і A_2 мають однакові знаки, $A = A_1 + A_2 = 2A_1$ і світло підсилюється.

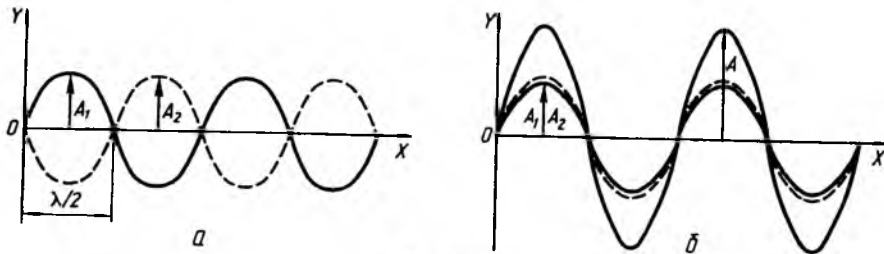


Рис. 21.7

Відомо, що випромінювання світлого тіла складається з хвиль, які випромінюють окремі атоми. Тривалість випромінювання окремого атома становить 10^{-8} с. За цей час у вакуумі утворюється цуг хвиль (послідовність горбів – западин) завдовжки близько 3 м, тобто

$$\delta = ct = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 10^{-8} \text{ с} = 3 \text{ м}.$$

Оскільки тіло одночасно випромінює безліч атомів, то збуджувані ними цуги хвиль, накладаючись одна на одну, зазнають випадкових стрибкоподібних змін, тобто вони некогерентні і стійкої картини інтерференції не буде. Щоб утворилася стійка картина інтерференції, хвилі мають бути узгоджені в часі та за довжиною.

Метод утворення когерентних світлових хвиль

Для утворення когерентних світлових пучків застосовують різні штучні прийоми. Фізична суть усіх приладів (дзеркала Френеля, біпризми Френеля, щілини Юнга і т. д.) для спостереження інтерференції світла однакова: світло від одного джерела йде до екрана двома різними шляхами.

Схему спостереження інтерференції світла за допомогою біпризми Френеля зображено на рис. 21.8. У цій схемі для роздвоєння хвилі, яка йде від джерела S , використано заломлення світла. Хвиля, яка йде від джерела S , роздвоюється через заломлення в двох половинах біпризми і доходить до екрана двома різними шляхами. На екрані в ділянці ABC спостерігається інтерференція двох систем когерентних хвиль, які ніби виходять з двох джерел S_1 і S_2 , що є уявними зображеннями джерела S .

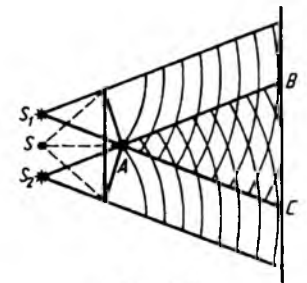


Рис. 21.8

§ 192. Інтерференція в тонких плівках

Найтипівішим і найбільш поширеним прикладом інтерференції світла є інтерференція в тонких плівках (мильна плівка, тонка скляна пластинка і т. д.).

На рис. 21.9 зображено тонку плівку завтовшки d , на неї під кутом α до нормалі падає паралельний пучок променів. Розглянемо результат інтерференції в променях, відбитих від плівки. Промінь SA , потрапляючи в точку A , частково відбивається (AE), частково заломлюється (AB).

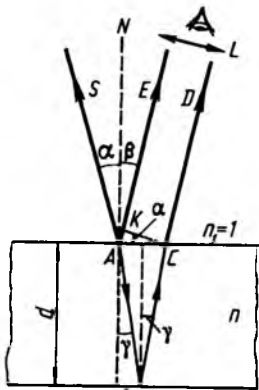


Рис. 21.9

Заломлений промінь AB зазнає відбивання від нижньої поверхні плівки в точці B і, заломившись у точці C , виходить з плівки (CD). Промені AE і CD когерентні, бо утворені з одного променя SA . Знайдемо оптичну різницю ходу δ променів AE і CD .

Оптичний шлях дорівнює геометричному шляху, помноженому на показник заломлення середовища, в якому поширюється світло.

З точки C проведемо нормаль CK до променів AE і CD . Оптичні шляхи променів AE і CD від нормалі CK до місця їх накладання (у фокусі лінзи) однакові. Оскільки промінь AE проходить у першому середовищі, показник заломлення якого $n_1 = 1$ (повітря), оптичний шлях AK , а промінь CD у другому середовищі з показником заломлення n (плівка) – оптичний шлях $(AB + BC)n$, то $\delta = (AB + BC)n - AK$. З рис. 21.9 випливає, що $AB = BC = d / \cos \gamma$, а $AK = AC \sin \alpha$, але $AC = 2d \operatorname{tg} \gamma$, тоді $AK = 2d \operatorname{tg} \gamma \sin \alpha$. Виконавши ці тригонометричні перетворення, дістанемо, що різниця ходу двох променів

$$\delta = \frac{2dn}{\cos \gamma} - 2d \operatorname{tg} \gamma \sin \alpha = \frac{2dn}{\cos \gamma} - \frac{2d \sin \gamma \sin \alpha}{\cos \gamma}.$$

Але $\sin \alpha = n \sin \gamma$; отже,

$$\delta = \frac{2dn(1 - \sin^2 \gamma)}{\cos \gamma} = 2dn \cos \gamma = 2d\sqrt{n^2 - n^2 \sin^2 \gamma} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}.$$

Щоб визначити остаточну різницю ходу, треба врахувати, що світлові хвилі, відбиваючись від оптично густішого середовища (від середовища з великим показником заломлення), змінюють фазу на π , тобто дістають додаткову різницю ходу, яка дорівнює $\pi/2$.

Тоді останній вираз можна записати так:

$$\delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}. \quad (21.9)$$

Різниця ходу залежить від товщини d плівки, показника заломлення n матеріалу, кута падіння α променів і довжини хвилі λ падаючого світла. Отже, результат інтерференції в тонких плівках визначається такими умовами, вираженими через оптичну різницю ходу.

Умова максимуму:

$$2k \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}. \quad (21.10)$$

Умова мінімуму:

$$(2k + 1) \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}. \quad (21.11)$$

Аналізуючи вирази (21.10) і (21.11), доходимо висновків:

1) якщо на тонку плівку падає монохроматичне випромінювання (наприклад, $\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7}$ м – червоний колір), то вона у відбитому світлі буде або червоною (21.10), або темною (21.11).

2) якщо на тонку плівку падає біле світло (складне), то вона матиме забарвлення, що відповідає λ , для якого виконується умова (21.10).

Однорідне забарвлення при куті падіння α спостерігається тоді, коли товщина плівки скрізь однакова, у противному разі плівка не матиме постійного забарвлення і тільки частини плівки, які мають однакову товщину, будуть забарвлені в один колір.

Інтерференційна картина спостерігається і в прохідному світлі, але оскільки в прохідному світлі не втрачається півхвиля, то вся картина інтерференції зміниться на обернену.

§ 193. Смоги однакової товщини. Кільця Ньютонa

Інтерференційні смуги в повітряному клині можна спостерігати, якщо одну плоскопаралельну скляну пластинку покласти на другу, а під один з кінців верхньої пластинки покласти невеликий предмет так, щоб між ними утворився повітряний клин (рис. 21.10). У цьому разі різниця ходу променів визначається формулами (21.10) і (21.11). Припустимо, що промені 1–4 падають на клин нормально ($\sin \alpha = 0$) і показник заломлення повітря $n = 1$, тоді

$$\delta = 2d + \lambda/2. \quad (21.12)$$

На грані, де скляні пластинки стикаються, $d \approx 0$ і $\delta = \lambda/2$, тому спостерігатимемо темну смугу (мінімум).

Перша світла смуга ($k = 1$) виникає при $\delta = \lambda$, бо $\delta = 2k(\lambda/2) =$

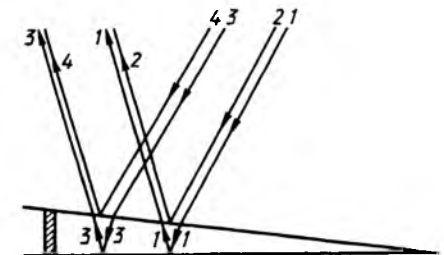


Рис. 21.10

$= 2 \cdot (\lambda/2) = \lambda$, тому $\delta = 2d + \lambda/2 = \lambda$. Звідси дістанемо, що в цьому місці товщина повітряного клина $d = \lambda/4$. Саме такий повітряний проміжок проходить паралельно грані стикування, і світла смуга має вигляд прямої лінії.

Друга світла смуга буде там, де товщина повітряного клина досягає значення $d = 3/4\lambda$, оскільки при цьому

$$\delta = 2 \cdot 2(\lambda/2) = 2d + \frac{\lambda}{2}.$$

Ці смуги, кожній з яких відповідає своя цілком певна товщина клина або паралельної пластинки, називають смугами однакої товщини. Смуги однакої товщини можуть бути прямими лініями, концентричними колами і мати будь-яку іншу форму залежно від розміщення точок, які відповідають $d = \text{const}$. Кут клина має бути дуже малим, інакше смуги однакої товщини накладуться одна на одну і їх не можна буде розрізнити.

Смуги однакої товщини можна добути, якщо плоскоопуклу лінзу з великим радіусом кривизни ($R = 10 \dots 100$ м) покласти на плоскопаралельну пластинку (рис. 21.11, а). У цьому разі смуги однакої товщини мають вигляд кілець, які називають кільцями Ньютона (рис. 21.11, б).

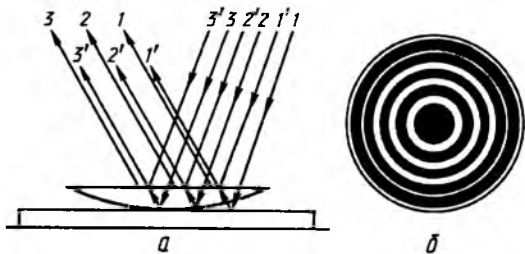


Рис. 21.11

Якщо на лінзу падає монохроматичне світло, то хвилі, відбиті від верхньої і нижньої меж цього повітряного прошарку, інтерферують між собою і різниця їх ходу залежить від товщини цього

повітряного клина. У відбитому світлі при цьому спостерігається така картина: у центрі – чорна пляма, поперемінно оточена концентричними світлими і темними інтерференційними кільцями спадної ширини (рис. 21.11, б). У прохідному світлі буде навпаки: усі світлі кільця будуть темними, а в центрі – світла пляма.

§ 194. Використання інтерференції в науці і техніці

Інтерференцію широко використовують у різних галузях науки і техніки. Тепер еталон довжини встановлено як певну кількість (вibrаних) довжин світлових хвиль. Використовуючи інтерференцію, можна визначити довжини хвиль, показники заломлення, мікроскопічні розміри тіл, мікронерівності на поверхні деталей.

Інтерференція в рентгенівській області електромагнітних випромінювань є основою рентгеноструктурного аналізу кристалічних ґрат твердих розчинів, сплавів і чистих речовин. Для цього використовують різні за конструкцією прилади, які називають *інтерферометрами*. У кожному інтерферометрі вимірюваний параметр є змінною величиною, а всі інші – сталі.

Інтерферометр Майкельсона

Перший інтерферометр запропонував А. Майкельсон. Принцип дії інтерферометра Майкельсона (рис. 21.12) досі широко застосовують у різних типах цих приладів. Прилад складається з двох дзеркал M_1 і M_2 і напівпрозорої посрібленої пластинки P_1 . Світло від джерела S падає на пластинку P_1 під кутом 45° і поділяється на два промені, тому воно належить до групи двопроменевих. Шляхи променів, як видно з рисунка, різні, внаслідок чого вони набувають певної різниці ходу.

Промінь 1 , відбиваючись від дзеркала M_2 , частково проходить крізь пластинку P_1 (промінь $1'$). Промінь 2 , відбившись від дзеркала M_1 , повертається до пластинки P_1 , двічі проходячи крізь скляну пластинку P_2 , паралельну P_1 . Пластинка P_2 відрізняється від пластинки P_1 тим, що вона не покрита шаром срібла. Промінь 2 частково відбивається від пластинки P_1 (промінь $2'$). Промені $1'$ і $2'$ когерентні. Результат їх інтерференції залежить від оптичної різниці ходу променя 1 від точки A до дзеркала M_2 і променя 2 від точки A до дзеркала M_1 . Завдяки пластинці P_2 їх оптичні шляхи однакові, тому пластинку P_2 називають *компенсатором*. Отже, оптична різниця ходу променів $1'$ і $2'$ дорівнює $\delta = 2n_1(l_1 - l_2)$, де l_1 і l_2 – відстані від точки A до відповідних дзеркал, n_1 – показник заломлення повітря. Якщо $l_1 = l_2$, то буде максимум інтерференції. Зміщення одного з дзеркал на відстань $\lambda/4$ дасть різницю ходу променів $\lambda/2$, що веде до виникнення мінімуму. Отже, за зміною інтерференційної картини можна робити висновок про малі переміщення одного із дзеркал і використати інтерферометр для точних вимірювань довжини. Ставлячи замість одного з дзеркал яку-небудь деталь, можна за формою смуг або кілець контролювати якість її обробки.

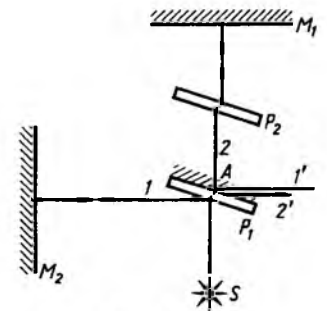


Рис. 21.12

Особливе місце в застосуванні інтерференції займає так звана просвітлена оптика. Якщо світло проходить через лінзи або призми, то від кожної з поверхонь світловий потік частково відбивається. У складних оптичних системах, де багато лінз або призм, прохідний світловий потік дуже зменшується; крім того, з'являються бліки. Так, було встановлено, що в перископах підводних човнів відбивається до 50 % світла, яке падає на них. Для усунення цих дефектів оптичних систем і застосовують метод просвітленої оптики. Суть методу полягає в тому, що оптичні поверхні покривають тонкими плівками, які створюють інтерференційні явища.

Звичайно товщина просвітлювальної плівки $\lambda/4$ падаючого світла. Тоді відбите світло має різницю ходу, яка дорівнює $\lambda/2$, що відповідає умові мінімуму при інтерференції. Так досягають чіткого зображення, а бліки зникають. Просвітлювальні покриття наносять на поверхні лінз і призм хімічною обробкою (травлення в кислоті), нанесенням плівок фторидів при випаровуванні у вакуумі або механічно.

§ 195. Дифракція світла

Світло – це хвильовий процес, і для нього за певних умов має спостерігатись явище *дифракції* (відхилення від початкового напрямку). Так, наприклад, світло, яке йде від невеликого яскравого джерела крізь отвір (21.13, *a*), за правилами геометричної оптики має дати на екрані різко обмежене світле зображення отвору на темному фоні. Але якщо відстань від отвору до екрана значно перевищує розміри отвору (в кілька тисяч разів), то внаслідок дифракції світла на екрані утворюється складніша картина з сукупностей світлих і темних смуг або ліній, форма яких залежить від форми отвору. На рис. 21.13, *б, в* зображено дифракційні картини для випадків, коли діаметр отвору порівняний з відстанню до екрана і коли діаметр отвору в тисячі разів менший за відстань до екрана.

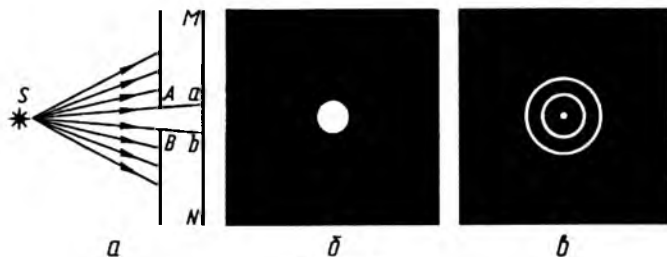


Рис. 21.13

Так само при освітленні непрозорих предметів, коли відстань між таким предметом і екраном значно перевищує розміри предмета, спостерігається явище дифракції світла – на екрані замість тіні утворюється складна картина. Краї тіні облямовуються рядом світлих і темних смуг, а в середині тіні можна спостерігати ділянки, куди заходить світло.

Розглянуті вище явища можна пояснити за допомогою методу, запропонованого О. Френелем, із застосуванням принципу Гюйгенса – Френеля.

Принцип Гюйгенса – Френеля

Згідно з принципом Гюйгенса, кожна точку фронту хвилі можна розглядати як самостійне джерело коливальних Френель доповнив цей принцип, ввівши уявлення про те, що хвильове збурення в будь-якій точці простору можна розглядати як результат інтерференції вторинних хвиль від фіктивних джерел, на які розбивається хвильовий фронт. Френель уперше висловив припущення, що

ці фіктивні джерела когерентні і тому можуть інтерферувати в будь-якій точці простору, внаслідок чого елементарні хвилі можуть гасити або підсилювати одна одну.

Щоб визначити результат дифракції в деякій точці простору, Френель запропонував розбивати хвильову поверхню на окремі ділянки (*зони Френеля*), розміщені так, щоб хвилі, які посиляють дві сусідні зони в дану точку простору, приходили у протифазі. Математичні операції показують, що площі зон рівновеликі, а отже, містять однакову кількість когерентних джерел світла. Отже,

коливання, які збуджуються в даній точці простору двома сусідніми зонами, протилежні за фазою і при накладанні мають взаємно ослаблювати одна одну.

Слід зазначити, що різниці фаз π відповідає різниця ходу $\delta = \lambda/2$.

§ 196. Дифракція на щілині в паралельних променях

Нехай на вузьку щілину, розміщену в плоскій непрозорій перешкодці *MN*, нормально падає плоска монохроматична світлова хвиля (рис. 21.14), $AB = a$ – ширина щілини. За щілиною розмістимо збиральну лінзу *L*, у фокальній площині якої встановлено екран *E* для спостереження дифракційної картини.

За принципом Гюйгенса – Френеля освітлену щілину можна розглядати як множину точкових когерентних джерел світла, так що від кожної точки щілини поширюються світлові когерентні хвилі в усіх напрямках.

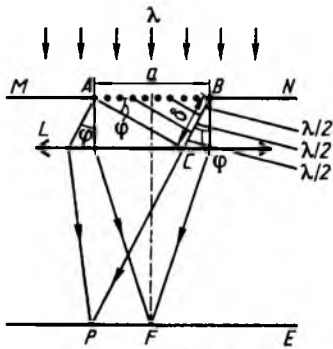


Рис. 21.14

Візьмемо спочатку напрям, який паралельний головній оптичній осі лінзи і збігається з початковим напрямом променів. Лінза збере промені цього напрямку в своєму головному фокусі F . Усі ці промені до точки F проходять однакові оптичні шляхи, тому сюди вони прийдуть в однаковій фазі і, інтерферуючи, підсилять одна одну. Отже, в головному фокусі лінзи завжди буде максимум світла, який має вигляд яскраво освітленої смуги, що йде паралельно щілині.

Розглянемо тепер промені, які йдуть під кутом φ до початкового напрямку поширення. Ці промені лінза збере в своєму побічному фокусі P . Промені когерентні, тому вони інтерферують.

Щоб дізнатись, який результат інтерференції вторинних хвиль, виконаємо такі побудови. Проведемо перпендикуляр AC до напрямку поширення вторинних хвиль (рис. 21.14). Він є новим фронтом хвилі, і від цього фронту до розглядуваної точки P вторинні хвилі не набудуть різниці ходу, бо оптичні шляхи вторинних хвиль однакові (лінза не вносить додаткової різниці фаз між вторинними хвилями). Насправді вторинні хвилі, поширюючись від щілини AB під розглядуваним кутом φ , набудуть певної різниці ходу. Між променями, які йдуть від крайніх точкових джерел A і B , утворюється різниця ходу $\delta = BC$. З рис. 21.14 випливає, що

$$BC = a \sin \varphi. \quad (21.13)$$

Скористаємось методом зон Френеля. Щоб визначити кількість зон Френеля, зробимо так: на $BC = \delta$ відкладемо відрізки, які дорівнюють половині довжини хвилі, і через ці точки проведемо площини, паралельні AC . Ці площини поділять щілину на зони Френеля, які в цьому разі є смужками, паралельними краям щілини. З такої побудови зрозуміло, що різниця ходу променів, які йдуть від двох сусідніх зон Френеля, дорівнює $\lambda/2$.

Кількість зон, які вкладаються в щілині, залежить від довжини хвилі та кута φ . У напрямках, яким відповідає парна кількість зон Френеля, що вкладаються в щілині, буде мінімум світла. Вторинні хвилі, які йдуть від двох сусідніх зон, погасять одна одну, оскільки вони відрізняються за фазою на π . Отже, умова мінімумів інтенсивності світла має вигляд

$$BC = a \sin \varphi = 2k(\lambda/4),$$

або

$$a \sin \varphi = k\lambda, \quad (21.14)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$

У напрямках, яким відповідає непарна кількість зон Френеля, що вкладаються в щілині, будуть максимуми світла, оскільки дія однієї зони не скомпенсується. Отже, умова максимумів має вигляд

$$BC = a \sin \varphi = (2k + 1)\lambda/2, \quad (21.15)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$

При незмінній ширині щілини максимуми світла різної довжини хвилі припадають на різні кути. Якщо щілину освітлювати білим світлом, то нульовий (центральный) максимум – білий. З обох боків від нульового максимуму розміщені кольорові максимуми першого порядку. Справді, за формулою (21.15), червоне світло ($\lambda = 0,76$ мкм) відхилиться на більший кут, ніж фіолетове ($\lambda = 0,4$ мкм). Між ними розмістяться інші кольори спектра.

§ 197. Дифракційні ґрати

Дифракційні ґрати

Розглянемо тепер випадок, коли є безліч однакових вузьких щілин, розміщених на однакових дуже малих відстанях (рис. 21.15, а). Таку систему називають *дифракційними ґратами*. Назвемо щілину і розміщену поряд з нею непрозору частину *елементом ґрат*. Ширину d одного елемента ґрат називають *сталюю ґрат*. Наявність елементів ґрат, які в певному порядку багато разів повторюються, вносить у явище дифракції нові якості. Дифракційні картини, утворені окремими щілинами, накладаються одна на одну на екрані. Якщо кожна з дифракційних картин, які накладаються, має в певному місці екрана мінімум, то й сумарна картина, очевидно, також має мінімум. Якщо кожна з дифракційних картин, які накладаються, має в певному місці екрана деяку освітленість, то може бути, що в сумарній картині буде велика освітленість або й зовсім її не буде.

Нехай на ґрати MN падає плоскопаралельний пучок когерентних хвиль (рис. 21.15, б). Візьмемо деякий напрям вторинних хвиль під кутом φ відносно нормалі до ґрат. Промені, які йдуть від крайніх точок A і B двох сусідніх щілин, мають різницю ходу $\delta = BC$. Таку саму різницю ходу мають і вторинні хвилі, які йдуть від відповідно розміщених пар точок сусідніх щілин. Якщо ця різниця ходу кратна цілому числу довжин хвиль, то при інтерференції виникнуть головні максимуми, для яких виконується умова $BC = k\lambda$, або

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (21.16)$$

де $k = 0, 1, 2, \dots$ – порядок головних максимумів. Вони розмістяться симетрично відносно центрального максимуму ($k = 0, \varphi = 0$). Між головними

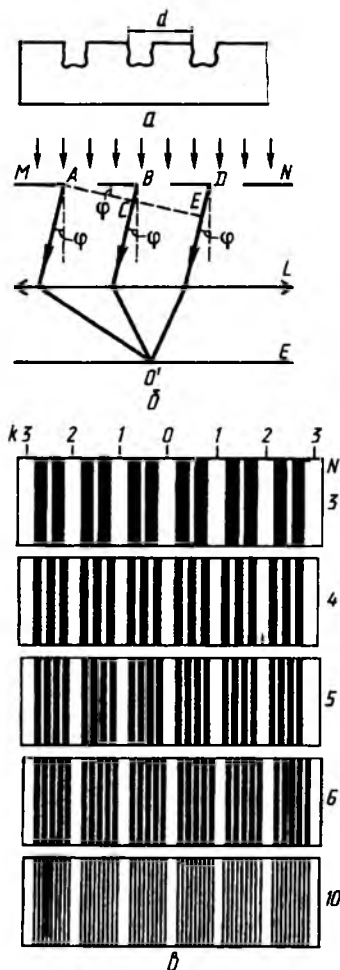


Рис. 21.15

максимумами утворюються мінімуми, кількість яких залежить від числа N усіх щілин ґрат. Чим більше N , тим різкіші головні максимуми. На рис. 21.15, в подано дифракційні спектри, утворені від ґрат з різною кількістю щілин, але з однаковим значеннями d .

Розглянуті вище міркування стосуються випадку, коли на ґрати падає монохроматичне світло. Якщо дифракційні ґрати освітлювати білим світлом, то воно розкладається в спектр. Тільки центральні смуги, або нульові максимуми ($k = 0$), залишаються білими, інші максимуми мають райдужне забарвлення і розміщуються симетрично відносно центрального. Як впливає з (21.16), промені різних довжин хвиль утворюють максимуми в різних напрямках. Наприклад, при $k = 1$ у двох перших максимумах, розміщених симетрично з обох боків від центрального, біле світло розкладається в спектр, повернутий до центрального (білого) максимуму фіолетовим кінцем. Це свідчить про те, що дифракційні ґрати розкладають біле світло в спектр за довжинами хвиль, тобто промені з більшою довжиною хвилі відхиляються на більший кут. Довжина хвилі фіолетових променів – 0,38 мкм, червоних – 0,76 мкм.

Спектр розпочинається фіолетовим кольором і закінчується червоним.

Аналогічна картина буде при $k = 2, 3, \dots$

Дифракційні ґрати – спектральний прилад

Дифракційні ґрати широко застосовують у спектральному аналізі тоді, коли треба визначити довжину світлової хвилі. З формули (21.16) видно, що для вимірювання довжини λ світлової хвилі треба виміряти лише дифракційний кут φ , бо значення d і k відомі, причому, чим

менша стала ґрат d , тим яскравіше виражені головні максимуми і можна точніше виміряти довжину хвилі λ .

Оскільки дифракційні ґрати – це спектральний прилад, то вони характеризуються роздільною силою, тобто здатністю розрізняти близькі спектральні лінії з довжинами хвиль λ_1 і λ_2 . Розрізнити дві спектральні лінії можна тоді, коли вони не зливаються в один максимум, ширший, ніж ширина кожної з ліній λ_1 і λ_2 . За міру роздільної здатності ґрат беруть

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = kN. \quad (21.17)$$

Ця формула показує, що роздільна здатність дифракційних ґрат визначається кількістю штрихів на ній і порядком спектра. У сучасних дифракційних ґратах число штрихів становить близько 2000 на 1 мм, а загальне число штрихів досягає значення $1 \cdot 10^6$.

Застосування дифракційних ґрат

Явище дифракції широко використовують у науці і техніці. Нині наша промисловість випускає спектрографи з дифракційними ґратами для спектрального аналізу. Докладне вивчення інтерференції і дифракції покладено в основу нової галузі фізики – голографії.

§ 198. Поняття про голографію

Поняття про голографію

Термін “голографія” походить від двох грецьких слів “графо” – пишу і “олос” – повний, що означає “повний запис”. У цьому разі йдеться про особливий метод реєстрації на фотопластинці хвильового фронту випромінювання, який іде від предмета, і потім відновлення цього фронту для утворення уявного або дійсного зображення предмета. Для цього фотографують інтерференційну картину двох частин хвилі, які когерентні між собою. Одна частина хвилі надходить на фотопластинку безпосередньо і називається *опорною хвилею*, а друга – освітлює досліджуваний предмет і після відбивання від нього надходить на ту саму пластинку. Цю частину хвилі називають *предметною*.

Принцип голографії запропонував у 1947 р. англійський фізик Д. Габор. Проте на той час ще не були винайдені лазери, а утворити за допомогою теплових джерел нерухоми і контрастну картину інтерференції дуже важко. Тільки лазерне випромінювання, яке має велику просторову і ча-

сову когерентність у поєднанні з великою інтенсивністю, дало голографії можливість швидко розвинути.

Розглянемо принцип голографії на такому прикладі. Якщо фотографічну пластинку Φ освітлити двома когерентними пучками світла (рис. 21.16, а), напрямивши опорний 1 перпендикулярно до поверхні пластинки, а предметний 2 – під кутом θ , то світлові коливання, інтерферуючи, дадуть на пластинці систему інтерференційних смуг.

Після проявлення пластинку використовують як дифракційні ґрати. Освітимо ці ґрати перпендикулярним до їх поверхні пучком когерентного світла (промінь 1 на рис. 21.16, б). Частина світла пройде через ґрати, не змінивши напрямку, і, крім того, виникнуть два паралельні пучки світла, які поширюються під кутами θ і $-\theta$ до поверхні пластинки. Ці кути точно такі самі, як і кут, під яким освітлювали пластинку раніше предметним пучком, а інтенсивність пучка 1, який іде під кутом $-\theta$, така сама, як і предметного пучка, що падає на пластинку. Пластинка “запам’ятала”, під яким кутом і з якою інтенсивністю на неї падав предметний пучок. Відновлення предметного світлового пучка опорним дає можливість записати, а потім відновити світло, відбите будь-яким предметом.

На рис. 21.17, а подано схему однієї з найпростіших установок для утворення голограми точки. Одна частина опорної хвилі 1, яка йде від лазера, потрапляє на точковий об’єкт А і розсіюється від нього у вигляді предметної хвилі 2, другу дзеркало скеровує на фотопластинку, де хвилі 1 і 2 інтерферують. Інтерференційна картина, зафіксована на фотоплівці, і є голограмою точки А.

Щоб дістати зображення точки А за її голограмою, треба на голограму напрямити те саме *опорне випромінювання*, за допомогою якого її було знято; зображення точки утвориться внаслідок дифракції опорної хвилі. При цьому плоска опорна хвиля, яка пройшла через голограму, утворену однією точкою, внаслідок дифракції поділяється на три хвилі (рис. 21.17, б): одну – плоску, яка поширюється в початковому напрямі, і дві сферичні – розбіжну, яка дає уявне зображення точки А, і збіжну, яка дає дійсне зображення.

Будь-який предмет можна уявити як сукупність точок, тому кожна точка предмета утворює на фотопластинці свою голограму. Таким способом

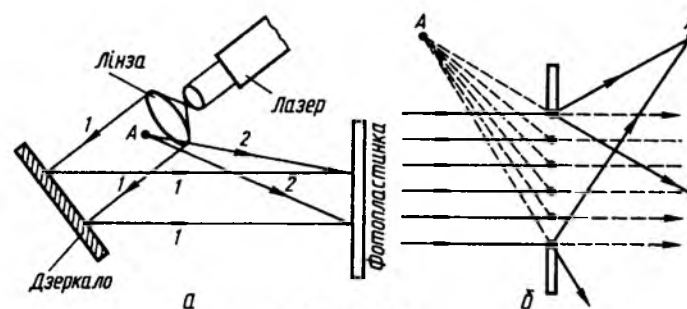


Рис. 21.17

на голограмі предмета будуть записані голограми всіх його точок. Різниця фаз між опорною хвилею і хвилею, яка йде від даної точки предмета, різна для різних точок, тому від голограми можна дістати майже не спотворене об’ємне зображення предмета. Оскільки розсіяні предметом хвилі потрапляють разом з опорною хвилею в усі точки голограми, то всі її ділянки містять інформацію про предмет. Якщо фотопластинку з голограмою розбити, то будь-який її осколок, освітлений опорним пучком, відновить зображення предмета.

Використання голографії

Тепер голографію застосовують для записування і зберігання великого інформаційного матеріалу, в кіно, телебаченні і т. д. Нині важко оцінити всі можливості застосування голографії, але безперечно, що вона є одним з найперспективніших методів сучасної фізики.

§ 199. Поляризація поперечних хвиль

Вище було розглянуто явище інтерференції і дифракції світла, які підтверджують його хвильову природу. З хвильової точки зору пояснюють і явище поляризації, яке можна спостерігати тільки в поперечних хвилях. Суть цього явища найпростіше розглянути на поперечних механічних хвилях.

У поздовжній хвилі (наприклад, звуковій) напрям коливань повністю визначається напрямом поширення хвилі. У поперечній хвилі коливання здійснюються перпендикулярно до напрямку поширення. Заданий напрям поширення хвилі ще не визначає напрямку коливань, оскільки напрямів, перпендикулярних до даного, безліч (рис. 21.18).

Виконаємо такий дослід. Нехай по шнуру в напрямі SO поширюється поперечна хвиля, на шляху якої встановлено перешкоду з щілиною (рис. 21.19, а).

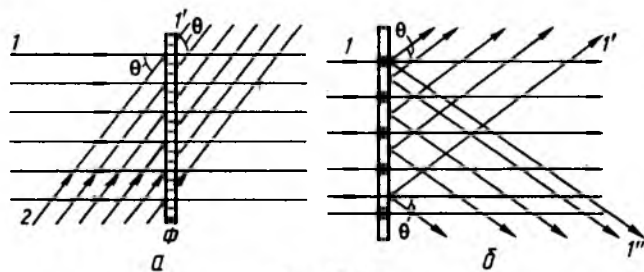


Рис. 21.16

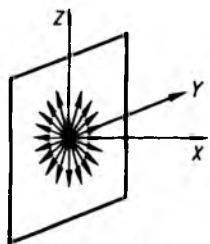


Рис. 21.18

Очевидно, що хвиля через щілину пройде тільки тоді, коли напрям щілини AB збіжиться з напрямом коливань, тобто коли щілина розміщена вертикально. Якщо щілину повернути на 90° , тобто розмістити її горизонтально, то коливання через щілину не пройдуть (рис. 21.19, б). Це свідчить про те, що в шнурі відбувалися поперечні коливання в заданому напрямі. Поздовжні коливання проходять через щілину при будь-якому куті повороту.

Якщо в поперечній хвилі коливання відбуваються тільки в одному якому-небудь певному напрямі, то хвилю називають плоскополяризованою або поляризованою.

Поляризація світлових хвиль

Розглянутий дослід свідчить про те, що щілину можна використовувати для аналізу поперечних механічних коливань. Щоб установити, чи є світлова хвиля поперечною, треба мати такий пристрій, який міг би виконувати роль названої вище щілини, тобто поляризувати неполяризовану світлову хвилю і аналізувати стан поляризованої хвилі (визначати напрям її коливань). Як щілину застосовують деякі кристали, наприклад, турмалін. Вирізані з нього певним чином плоскопаралельні пластинки, як впливає з досліду, здатні пропускати світлові коливання тільки одного напрямку. Отже, турмалінові пластинки можна використати для з'ясування характеру (поперечності) світлових хвиль.

З'ясуємо, чому турмалін і деякі інші кристали можуть поляризувати світло. Як відомо,

кристали – тіла анізотропні, їх оптичні властивості різні в різних напрямках.

У турмаліну анізотропія проявляється в тому, що він добре поглинає випромінювання з коливаннями одного певного напрямку, а випромінювання з коливаннями в перпендикулярному до нього напрямі майже не поглинає. Цю властивість кристалів називають *дихроїзмом*. Отже, проаналізувати стан світлових коливань у світловій хвилі і переконатися в їх

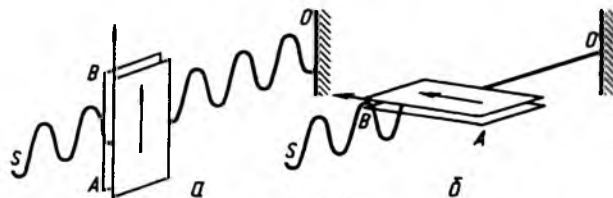


Рис. 21.19

поперечності можна за допомогою двох турмалінових пластинок. На рис. 21.20 зображено два положення турмалінових пластинок. У випадку *a* пластинки розміщені так, що напрями світлових коливань, які вони пропускають, паралельні один одному, при цьому друга турмалінова пластинка пропускає без зміни світлову хвилю, яка пройшла через першу. При повороті другої турмалінової пластинки на 90° (випадок *б*) вона повністю гасить коливання, яке пройшло через першу турмалінову пластинку. Перша пластинка, яка перетворює природне світло у плоскополяризоване, називається *поляризатором*, друга, яка визначає напрям коливань (яка гасить поляризовану хвилю), – *аналізатором*. З досліду видно, що поляризатор і аналізатор – взаємозамінювані прилади.

Явище поляризації доводить поперечний характер світлових хвиль.

Поперечність світлових хвиль підтверджується і електромагнітною теорією світла.

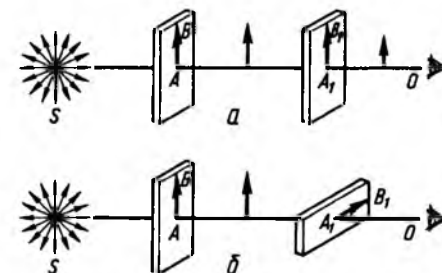


Рис. 21.20

§ 200. Поляризація світла

Природне і поляризоване світло

Як було зазначено вище, світло – це електромагнітні коливання, які поширюються у вигляді поперечних електромагнітних хвиль $(3,8 \dots 7,6) \cdot 10^{-7}$ м. Електромагнітна хвиля характеризується векторами

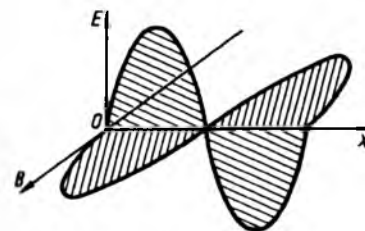


Рис. 21.21

напруженості електричного поля E та індукції магнітного поля B . Вектори E і B розміщені у взаємно перпендикулярних площинах і коливаються в однакових фазах (на рис. 21.21 x – напрям поширення хвилі). Ці вектори коливаються в ізотропному середовищі перпендикулярно до напрямку поширення коливань – до променя.

У багатьох випадках (під час фізіологічних і фотохімічних дій, люмінесценцій, фотоелектру і т. д.) дія світлових хвиль на речовину в основному визначається вектором напруженості електричного поля E , оскільки більшість явищ, які відбуваються у речовині під дією світла, пов'язані з дією на електрони.

У § 189 було розглянуто питання про дію сили на електрон з боку електричного і магнітного полів і показано, що магнітні сили порівняно з електричними дуже малі. Тому, говорячи далі про коливання у світловому промені, ми завжди розумітимемо під ним коливання вектора E .

Електромагнітні хвилі, які випромінює світне тіло, складаються з окремих хвиль, що випромінюються його атомами (елементарними вібраторами). Внаслідок того що атоми безперервно змінюють свою просторову орієнтацію, напрям коливань вектора E результуючої світлової хвилі безперервно змінюється.

Якщо у світловій хвилі вектор E коливається в різних напрямках у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі, то світло називають природним (рис. 21.22, *a*).

Світлові коливання, як і будь-які коливання, що відбуваються в одній площині, можна розкласти за правилом паралелограма на два коливання, які відбуваються у двох взаємно перпендикулярних площинах. Отже, природний промінь світла ми можемо уявити як промінь, в якому коливання відбуваються у двох взаємно перпендикулярних напрямках, наприклад у площині рисунка, яку вважаємо такою, що збігається з площиною падіння (коливання позначають крапками). На рис. 21.22, *b* промінь природного світла умовно зображено як пряму, на якій розміщена однакова кількість рисочок і крапок.

Якщо вектор E коливається тільки в одному напрямі, перпендикулярному до променя, то світло називають плоскополяризованим. Пряма з рисочками (рис. 21.22, *в*) або крапками (рис. 21.22, *г*) зображує промінь плоскополяризованого світла. Частково поляризований промінь світла зображено на рис. 21.22, *д*, *e*.

Площину A , яка проходить через напрям коливань вектора E і промінь (рис. 21.23), називають *площиною коливань*.

Площину M , яка проходить через промінь і перпендикулярна до напрямку коливань вектора E , тобто площину, в якій коливається вектор B , називають *площиною поляризації*. Площини коливань і поляризації завжди взаємно перпендикулярні.

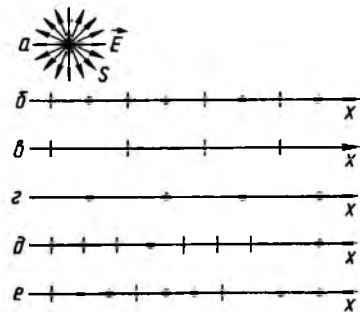


Рис. 21.22

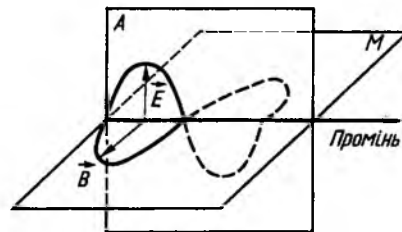


Рис. 21.23

Поляризація світла при його відбиванні і заломленні

Поляризоване світло можна добути при його відбиванні і заломленні від межі поділу двох діелектриків. Якщо кут падіння світла за межу поділу двох діелектриків не дорівнює нулю, то відбитий і заломлений промені будуть частково поляризованими (рис. 21.24, *a*). У відбитому промені переважають коливання, перпендикулярні до площини падіння, у заломленому промені – коливання, паралельні площині падіння. Якщо кут падіння задовольняє умову

$$\operatorname{tg} i_B = n, \quad (21.18)$$

де n – відносний показник заломлення двох середовищ, то відбитий промінь буде поляризований повністю (рис. 21.24, *б*), а заломлений – тільки частково. Співвідношення (21.18) називають *законом Брюстера*, кут i_B – *кутом Брюстера* або кутом повної поляризації. Із закону Брюстера і закону заломлення $\sin i_B / \sin \beta = n$ випливає, що при падінні променя на діелектрик під кутом повної поляризації промінь відбитий і промінь заломлений взаємно перпендикулярні.

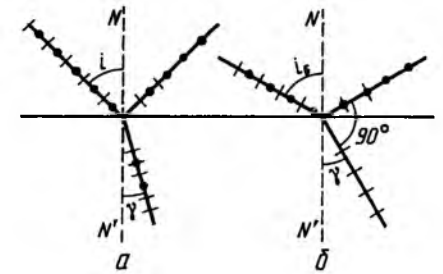


Рис. 21.24

§ 201. Подвійне променезаломлення. Поляроїди

Подвійне променезаломлення

Як було зазначено раніше, у природі є анізотропні речовини, оптичні властивості яких у різних напрямках різні. До таких матеріалів можна віднести, наприклад, кристали ісландського шпату і кварцу. У природному промені вектор E коливається в усіх напрямках, а оскільки властивості кристала в різних напрямках різні, то вектор напруженості електричного поля в різних площинах коливається неоднаково, виникають ніби промені з різним значенням E – на межі поділу двох середовищ вони заломлюються по-різному. Це означає, що коливання, які відбуваються в двох взаємно перпендикулярних площинах, що характеризуються двома компонентами вектора напруженості електричного поля (E_x і E_y), фактично мають різні показники заломлення. При цьому спостерігається роздвоєння променя, або подвійне променезаломлення: природне світло, увійшовши в кристал ісландського шпату, роздвоюється на два промені, які поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах. Для одного з променів викону-

ються закони заломлення, і тому цей промінь називають *звичайним*, для другого – не виконуються, і промінь називають *незвичайним*.

Напрями, вздовж яких подвійного променезаломлення немає і обидва промені (звичайний і незвичайний) поширюються з однаковою швидкістю, називають *оптичними осями кристала*. Якщо такий напрям один, то кристали називають *одновісними*. Площину, яка проходить через падаючий промінь і оптичну вісь кристала, називають *головним перерізом кристала*.

Промені звичайні і незвичайні є одночасно променями поляризованими; звичайний промінь поляризований у площині головного перерізу, а незвичайний – у площині, перпендикулярній до площини головного перерізу.

Призма Ніколя

Двозаломні кристали безпосередньо не використовують як поляризатори, оскільки пучки звичайних і незвичайних променів виходять з кристала під дуже малим кутом один до одного або навіть перекриваються. Щоб “розвести” ці промені, користуються різними поляризованими призмами. Найбільш поширена *призма Ніколя*, або *ніколь*. Вона складається з кристала ісландського шпату, який має форму паралелепіпеда (рис. 21.25). Кристал розрізують похило по площині *BEDP* на дві частини, а потім склеюють канадським бальзамом. Показник заломлення канадського бальзаму 1,549. Показник заломлення ісландського шпату для звичайних променів 1,658. Для незвичайних променів показники заломлення ісландського шпату різні для різних напрямів: для променів, які йдуть паралельно довгим ребрам призми, він дорівнює 1,515.

Нехай природний промінь падає на нижню грань призми (рис. 21.26) у площині головного перерізу (площині рисунка) під таким кутом, що заломлені промені, роздвоївшись, ідуть майже паралельно ребрам. Незвичайний промінь, дійшовши до шару канадського бальзаму, входить у нього як у середовище, що більш заломлює, і продовжує шлях, не відхиляючись, оскільки шар канадського бальзаму дуже тонкий. Звичайний промінь зустрічає

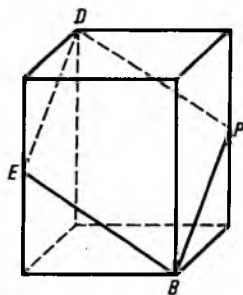


Рис. 21.25



Рис. 21.26

шар бальзаму як середовище, яке менш заломлює, і, оскільки кут його падіння більший від граничного кута, зазнає повного відбивання і поглинається зачорненою гранню призми. З призми виходить один тільки незвичайний промінь. Напрямок коливань вектора *E* показано на рис. 21.26.

Поляроїди

Використавши дихроїзм таких двозаломних кристалів, як, наприклад, герпатит, виготовляють поляризаційні світлофільтри (поляроїди). Це – целулоїдна плівка, вкрита тонким шаром відповідно орієнтованих кристалів герпатиту. Ці плівки поводять себе як пластинки, вирізані з кристала турмаліну: в них відбувається подвійне променезаломлення і, як і в пластинці турмаліну, один з поляризованих променів поглинається в самому герпатиті, а другий виходить назовні.

Такі пристрої, як поляроїди і призми, можуть працювати як поляризатори і аналізатори. Дослід показує, що деякі кристали і розчини органічних сполук, якщо через них проходить поляризований промінь, повертають площину його поляризації, причому кут повороту площини коливань вектора *E* пропорційний шляху, пройденому світлом у цій речовині. Речовини, які обертають площину поляризації, називають *оптично активними*. До них належать кварц, розчин цукру у воді тощо.

Явище поляризації широко використовують у народному господарстві. Його застосовують для визначення концентрації розчинів оптично активних речовин, для визначення місць пружних напруг, які виникають внаслідок механічних навантажень, під час вивчення процесів, які швидко відбуваються, таких, наприклад, як звукозапис і відтворення звуку.

§ 202. Дисперсія світла

Дисперсія світла

Якщо пропустити пучок білого світла через скляну призму, то на екрані виникне смужка, забарвлення якої безперервно змінюється; її називають *призматичним* або *дисперсним спектром* (рис. 21.27). Розклад білого світла в спектр у процесі проходження через призму – прояв дисперсії.

Дисперсією називають залежність від довжини хвилі швидкості світла в речовині, тобто показника заломлення речовини.

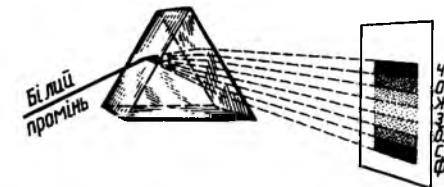


Рис. 21.27

Чому біле світло, проходячи через призму, розкладається у спектр? З точки зору хвильової теорії всякий коливальний процес можна характеризувати частотою коливань, амплітудою і фазою. Амплітуда коливань (точніше, її квадрат) визначає енергію коливань. Фаза відіграє основну роль у явищах інтерференції. Колір усіх променів пов'язаний з довжиною хвилі.

Дисперсія світла характерна для всіх середовищ, крім вакууму.

У вакуумі швидкість поширення електромагнітних хвиль будь-якої довжини однакова ($3 \cdot 10^8$ м/с), а в речовині залежить від довжини хвилі. Тому відрізняються і показники заломлення $n = c/v$ для різних хвиль, які входять до складу білого світла. Проходячи через призму, складові частини білого променя зазнають різного заломлення і виходять розбіжним кольоровим пучком.

Явище дисперсії світла можна спостерігати не тільки в процесі проходження світла через призму, а й у багатьох інших випадках. Так, наприклад, заломлення сонячного світла у водяних краплях, які утворюються в атмосфері, супроводиться розкладом

Значення коефіцієнтів заломлення n різних речовин залежно від довжини хвилі λ

λ , мкм	n		
	флюорит	кварц	кам'яна сіль
0,2	1,5	1,65	1,75
1,6	1,43	1,53	1,53
3,2	1,41	1,47	1,51

Дисперсію називають нормальною, якщо показник заломлення зростає із зменшенням довжини хвилі.

При порівнянні спектрів, утворених за допомогою призм з однаковими заломленими кутами, але

виготовлених з різних речовин, встановлено, що кольорові промені не тільки відхилені на різні кути, що зумовлено різними значеннями n для тієї самої λ , а й їх спектри розтягнуті на більшу чи меншу довжину через відмінності в значенні дисперсії для різних речовин.

Розклад кольорів

Перші експериментальні дослідження дисперсії світла належать Ньютону, який показав, що біле світло складається з семи кольорів: червоного, оранжевого, жовтого, зеленого, блакитного, синього, фіолетового. Збираючи лінзою в одне місце кольорові промені, які вийшли з призми, Ньютон дістав на екрані замість забарвленої білу смужку. Отже, при сполученні кольорових променів спектра утворюється біле світло. Біле світло можна дістати при змішуванні двох (або більше) кольорів. Такі кольори називають *доповняльними*.

Прикладом доповняльних кольорів є жовті і сині промені. Змішуючи в різній пропорції випромінювання трьох основних кольорів, якими є червоний, зелений і фіолетовий, можна дістати будь-яке забарвлення променів.

Кольори тіл

Забарвлення тіл різноманітне. Колір тіла зумовлений його забарвленням, властивостями поверхні, оптичними властивостями джерел світла і середовища, через яке поширюється світло.

Колір прозорого тіла визначається складом того світла, яке проходить через нього.

Якщо пропустити біле світло через пофарбовані стекла, наприклад через червоне, зелене тощо, то ці стекла пропустять переважно ті кольори, в які вони пофарбовані: червоне – червоний; зелене – зелений тощо. На цьому ґрунтується застосування різних світлових фільтрів.

Колір непрозорого тіла визначається сумішшю кольорів, які воно відбиває.

Деякі тіла здаються нам тільки жовтими, інші – синіми і т. д. Це означає, що тіло переважно відбиває жовті, сині промені. Тіло, яке відбиває у великій кількості всі кольорові промені, здаватиметься білим; тіло, яке поглинає майже всі промені, що падають на нього, – чорним.

У природі не існує ні абсолютно білих, ні абсолютно чорних тіл.

Здатність тіл поглинати певні кольорові промені називають *вибірним поглинанням*. Від нього й залежить забарвлення тіл.

Якщо світло, яке падає на забарвлену поверхню, за своїм складом відрізняється від денного, то ефекти освітлення можуть бути зовсім іншими. Навіть перехід від денного світла до штучного значно змінює співвідношення кольорів і відтінків предметів, і особливо художніх творів. Жовті і зелені кольори при вечірньому освітленні здаються більш тьмяними, а синій колір – майже чорним.

§ 203. Призматичний і дифракційний спектри

Призматичний спектр

Спектри, які утворюються в дифракційних ґратах і в призмі, дуже різні.

Дифракційні ґрати розкладають падаюче світло безпосередньо залежно від довжин хвиль, тому за кутами, утвореними напрямками відповідних дифракційних максимумів, можна обчислити довжину хвилі. Призма розкладає падаючий пучок світла залежно від значення коефіцієнта заломлення.

Тому, щоб визначити довжину хвилі світла, треба знати залежність $n = f(\lambda)$ речовини, з якої виготовлено призму.

Дифракційний спектр

Порядок розміщення складових кольорів у спектрі призми і в спектрі дифракційних ґрат різний. У дифракційних ґратах синус кута відхилення пропорційний довжині хвилі. Внаслідок цього червоні промені, які мають значну довжину хвилі, відхиляються дифракційними ґратами більше, ніж фіолетові промені. У призмі коефіцієнт заломлення у прозорих речовинах зменшується із збільшенням довжини хвилі. Коефіцієнт заломлення червоних променів менший, ніж фіолетових, тому призма відхиляє їх слабше, ніж фіолетові.

§ 204. Спектри випромінювання.

Спектри поглинання

Спектр випромінювання

Якщо світло від розжареного твердого тіла пропустити через призму, то на екрані за призмою дістанемо неперервний суцільний спектр випромінювання.

Якщо джерелом світла є газ або пара, то картина спектра істотно змінюється. Спостерігається сукупність яскравих ліній, відокремлених темними проміжками. Такі спектри називають *лінійчастими*. Прикладами лінійчастих спектрів можуть бути спектри натрію, водню і гелію (рис. 21.28, *a–e*).

Вигляд спектрів світних газів залежить від хімічної природи газу.

Кожний газ або пара дає свій, характерний тільки для них, спектр. Тому спектр світного газу дає можливість робити висновок про його хімічний склад. Якщо джерелом випромінювання є молекули речовини, то спектр називають *смуғастим*.

Спектр поглинання

Усі три види спектрів – суцільний, лінійчастий і смуғастий – це спектри випромінювання. Крім них існують спектри поглинання, які утворюють у такий спосіб. Біле світло від джерела пропускають через пару досліджуваної речовини і направляють на спектроскоп або інший прилад, призначений для дослідження спектра. У цьому разі на фоні суцільного спектра видно темні лінії, розміщені в певному порядку, їх кількість і характер розміщення дають можливість робити висновок про склад досліджуваної речовини. Наприклад, якщо на шляху променів буде пара натрію, то на суцільному спектрі виникає темна смуга в тому місці спектра,

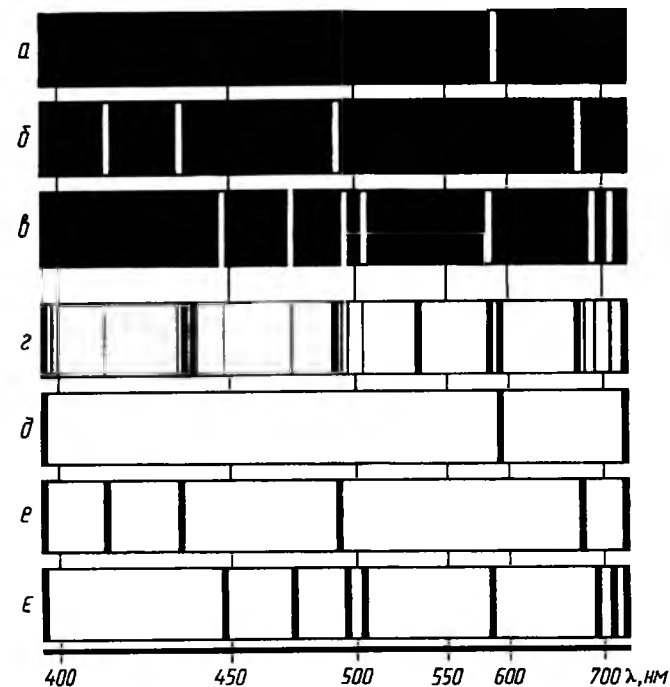


Рис. 21.28

де мала була розміститися жовта лінія спектра випромінювання пари натрію. Розгляньте явище пояснив Г. Кірхгоф, який показав, що атоми певного елемента поглинають ті самі світлові хвилі, які вони самі випромінюють.

Це твердження називають *законом Кірхгофа*. На рис. 21.28, *г* зображено спектр поглинання Сонця; на рис. 21.28, *д – e* – спектри поглинання натрію, водню і гелію.

Щоб пояснити походження спектрів, треба знати будову атома. Ці питання розглянуто далі.

§ 205. Ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання

Ультрафіолетове випромінювання

У 1801 р. німецький фізик Й. В. Ріттер та англійський фізик У. Волластон відкрили невидимі промені, які назвали *ультрафіолетовими*. Ці промені займають спектральну область між фіолетовим кінцем видимого світла і рентгенівськими променями, в діапазоні довжин хвиль від 400 до 10 нм.

Джерелами ультрафіолетового випромінювання є тіла, розжарені до температури порядку 3000 К. Прикладом можуть бути ртутно-кварцові, ксенонові, газорозрядні та інші лампи. Природними джерелами ультрафіолетового випромінювання є Сонце, зорі, туманності та інші космічні об'єкти.

Ультрафіолетові промені мають дуже сильну біологічну дію, тому їх значення в природі величезне. Випромінювання в інтервалі 0,38–0,32 мкм сприяє зміцненню і загартуванню людини, утворенню вітаміну *D* в її організмі. Випромінювання в інтервалі 0,32–0,28 мкм спричинює загар, а в інтервалі 0,28–0,25 мкм йому властива бактерицидна дія. Великі дози можуть пошкодити очі та обпекти шкіру.

Ультрафіолетове випромінювання дуже добре поглинається землею атмосферою, тому його досліджують у високогірних районах. Для реєстрації цього випромінювання використовують звичайні фотоматеріали і різні речовини, що люмінесціюють і перетворюють ультрафіолетове випромінювання у видиме.

Інфрачервоне випромінювання

Інфрачервоне випромінювання відкрив англійський учений В. Гершель у 1800 р. Воно займає спектральну область між червоним кінцем видимого світла і короткохвильовим радіовипромінюванням у діапазоні довжин хвиль від 0,74 мкм до 1–2 мм. Це випромінювання має велику енергію і тому дуже нагріває тіла, на які воно падає; його часто називають *тепловим*.

Джерелами інфрачервоного випромінювання є лампи розжарювання з вольфрамовою ниткою, електрична вугільна дуга і різні газорозрядні лампи. Потужним природним джерелом є Сонце, близько 50 % випромінювання його лежить в інфрачервоній області.

Інфрачервоні промені проникають у поверхневі тканини людини й тварин і позитивно впливають на перебіг усіх біологічних процесів. Це випромінювання широко використовують у сільському господарстві при влаштуванні парників. Промені, відбиваючись від парника, додатково нагрівають ґрунт (*парниковий ефект*).

Інфрачервоне випромінювання застосовують для сушіння матеріалів, овочів, фруктів. Створено прилади, в яких інфрачервоне зображення об'єкта перетворюється у видиме. Інфрачервоні локатори і далекоміри знаходять об'єкти в темряві, якщо їх температура вища за температуру навколишнього середовища. Інфрачервоні лазери використовують для наземного і космічного зв'язку.

§ 206. Прилади для добування і дослідження спектра

Спектральні прилади – прилади для розкладання світла оптичного діапазону на спектри за довжинами хвиль. Розрізняють три головні типи спектральних приладів: спектроскопи, спектрографи, спектрометри. Видиму частину спектра досліджують за допомогою приладів, які називають *спектроскопами*. Найпростіший спектроскоп зображено на рис. 21.29.

Двотрубний спектроскоп має у своєму складі коліматор 1, столик 3 з призмою і зоровою трубою 2, яка переміщується відносно призми мікрометричним гвинтом. Коліматор 1 складається з труби, яка має щілину 4, встановлену в головному фокусі лінзи 5 (рис. 21.29, б). Тому промені, які падають від джерела на лінзу 5 і проходять через щілину, виходять з неї паралельним пучком. Промені з лінзи 5 падають на передню грань призми 3, розкладаються в призмі і виходять з неї системою променів різних кольорів і напрямів залежно від довжини хвилі, причому всі промені одного кольору паралельні один одному. Потім промені надходять у зорову трубу через об'єктив 6.

Оскільки промені одного кольору, які виходять з призми, паралельні, але не збігаються за напрямом з променями інших кольорів, то у фокальній площині об'єктива 6 виникає ряд паралельних, по-різному забарвлених зображень щілини 4. Ці зображення розглядають через окуляр 7.

У двотрубних спектроскопах для визначення відносного розміщення спектральних ліній окуляр зорової труби має нитку. Повертаючи трубу навколо призми, суміщають нитку окуляра з різними частинами спектра. Зміщення труби 2 відлічують за допомогою лімба і горизонтальної міліметрової лінійки, яка прилягає до лімба.

Прилад, в якому спектр реєструється на фотопластинці, називають *спектрографом*.

Досконаліші спектроскопи мають третю трубу, за допомогою якої у фокальній площині об'єктива зорової труби проектується шкала довжин хвиль. Такий прилад називають *спектрометром*.

Якщо у фокальну площину помістити щілинну діафрагму, то з усього спектра можна виділити вузький пучок монохроматичних променів. Цей прилад називають *монохроматором*.

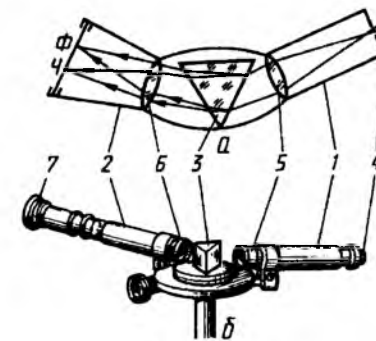


Рис. 21.29

§ 207. Спектри Сонця і зір

Залежно від температури атмосфери Сонця і зір їх розрізняють за кольором: найгарячіші зорі мають температуру порядку 100 000 К, голубі – порядку 30 000 К, жовті – порядку 6000 К, найхолодніші, червоні, – порядку 3000 К. Спектри зір відрізняються інтенсивністю і кількістю ліній різних хімічних елементів і сполук. У спектрах дуже гарячих зір виділяються яскраві лінії випромінювання гелію й азоту, а в спектрах найхолодніших – сильні смуги поглинання різних молекулярних сполук.

В атмосферах усіх зір переважають водень і гелій.

Джерелом енергії, яку дістають зорі і Сонце, є ядерні реакції перетворення водню в гелій у їх надрах при температурі порядку 10 000 000 К.

Розглядаючи за допомогою спектроскопа спектр Сонця, можна помітити, що його суцільний спектр перерізаний численними темними лініями, розміщеними в різних частинах спектра (див. рис. 21.28, з). Перший описав ці темні лінії німецький учений Й. Фраунгофер, тому ці лінії називають *фраунгоферовими*. Пояснив фраунгоферові лінії у спектрі Сонця Г. Кірхгоф. Якщо атоми поглинають саме ті хвилі, які вони можуть випускати, то кожна речовина, що є в сонячній або земній атмосфері, сама поглинає характерні для неї промені. Тому й утворюються темні лінії на фоні суцільного сонячного спектра. Встановивши положення темних ліній у спектрі, можна визначити, через які речовини проходили сонячні промені в атмосфері Сонця.

Так було встановлено, що в сонячній атмосфері є водень, натрій, кальцій, залізо та інші речовини, які є й на Землі. Цікаво зазначити, що в спектрі Сонця, крім відомих елементів, було знайдено елемент, якого на Землі ще не знали. Його назвали гелієм (від грец. “геліос” – Сонце). Тільки через 26 років гелій було знайдено і на Землі.

§ 208. Поняття про спектральний аналіз

Поняття про спектральний аналіз

Дослідження спектрів випромінювання і спектрів поглинання дає можливість установити якісний склад речовини. Кількісний вміст певного елемента в сполуці визначають, вимірюючи яскравість його спектральних ліній. *Метод дослідження, який дає можливість за спектром випромінювання і поглинання робити висновки про хімічний склад речовини, називають спектральним аналізом.*

У § 204 йшлося про те, що світні гази і пара дають лінійчасті спектри, при цьому кожний газ або пара має характерний спектр. Якщо в досліджуваній речовині є в певному місці спектра жовта лінія, то можна твер-

дити, що до складу речовини входить натрій. Знаючи довжини хвиль, які випромінюють різні гази і пара, за спектром можна встановити наявність тих чи інших елементів у досліджуваній речовині. Якщо в спектрі є одна або кілька ліній, які не відповідають лініям жодного з відомих нам елементів, то можна стверджувати, що виявлено новий елемент.

Метод спектрального аналізу дуже чутливий. За його допомогою можна виявити наявність елемента, який нас цікавить, навіть тоді, коли кількість його не перевищує 10^{-10} г. Ці кількості такі малі, що їх не можна виявити хімічними методами.

Застосування спектрального аналізу

Спектральний аналіз відіграв велику роль у науці. Зовсім незамінний він в астрономії, де є єдиним джерелом усіх наших відомостей про хімічний склад небесних тіл. За його допомогою було вивчено склад Сонця, зір і туманностей, відкрито 25 елементів таблиці Менделєєва. Тепер спектральний аналіз широко застосовують у геології, металургії, хімії та інших галузях науки і техніки.

§ 209. Рентгенівське випромінювання. Його природа і властивості

Рентгенівське випромінювання

У 1895 р. В. Рентген, спостерігаючи процеси в газорозрядних трубках, відкрив загадкове випромінювання, яке тепер називають рентгенівським. Його було виявлено завдяки здатності цього випромінювання спричинювати світіння флуоресціюючих речовин. Це випромінювання спричинювало зеленувате світіння скла газорозрядної трубки в тому місці, де на нього падав потік швидких електронів з катода. Рентгенівське випромінювання здатне проникати крізь тіла, непрозорі для звичайного світла, наприклад чорний папір, картон, тонкі шари металу. Від нього чорніє фотографічна пластинка, а електроскоп втрачає заряд внаслідок іонізації повітря.

Дифракція рентгенівського випромінювання

Виникло припущення, що рентгенівське випромінювання – це електромагнітні хвилі, які випромінюються при різкому гальмуванні електронів. Підтвердженням цього припущення могло б бути явище диф-

ракції, властиве всім видам хвиль. Проте спроба дістати дифракційну картину на вузьких щілинах за допомогою рентгенівського випромінювання зазнала невдачі. Тільки через 15 років М. Лауе для спостереження дифракції рентгенівського випромінювання запропонував використати кристали. Кристали – це впорядкована структура, яка характеризується міжплщинними відстанями (відстанями між вузлами кристалічних ґрат) порядку кількох нанометрів і є природними просторовими дифракційними ґратами. Досліди, виконані М. Лауе та іншими фізиками, показали, що рентгенівське випромінювання – це електромагнітні хвилі, довжини яких порядку розміру атома, тобто від $8 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-12}$ м. Зрозуміло, що виявити дифракцію рентгенівського випромінювання на плоских вузьких щілинах не можна, бо дістати щілину такого розміру практично неможливо.

Рентгенівська трубка

Рентгенівське випромінювання добувають у спеціальних приладах, які називають *рентгенівськими трубками* (рис. 21.30). Рентгенівська трубка – це скляний балон, тиск у якому порядку 0,1 мПа. Джерелом електронів є катод, виготовлений з вольфраму у вигляді спіралі. Потік електронів, який випромінює розжарений катод під час термоелектронної емісії, прискорюється в потужному електричному полі, створеному джерелом високої напруги. Прискорений потік електронів падає на масивний анод, скошений під кутом порядку 45° . Така геометрія анода дає можливість керувати напрямом поширення променів. Електрони в полі набувають кінетичної енергії $E_k = mv^2 / 2 = eU$.

Потрапивши на анод, електрони гальмуються, рухаючись у речовині анода.

Внаслідок гальмування швидких електронів виникає гальмівне рентгенівське випромінювання.

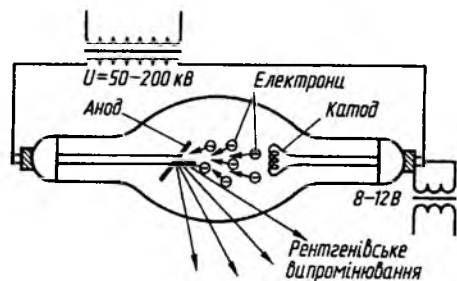


Рис. 21.30

Гальмівне рентгенівське випромінювання має суцільний неперервний спектр, оскільки електрони, які бомбардують анод, мають різні швидкості. Під час гальмування виникають промені різних довжин хвиль.

Максимальна енергія рентгенівського випромінювання не може перевищувати енергії електрона, якої той набув у прискорюючому полі.

Закон Мозлі

При досить великій швидкості електронів, крім суцільного, виникає *характеристичне рентгенівське випромінювання, яке має лінійчастий спектр*. Це випромінювання назвали так тому, що частоти ліній його спектра характеризують речовину анода. Характеристичне випромінювання виникає, коли енергія електронів, які бомбардують, стає достатньою для виривання електрона з однієї з близьких до ядра оболонок атома. На місце, яке звільнилось, переходить електрон з більш віддаленої від ядра оболонки. Цей перехід супроводиться випромінюванням кванта рентгенівського випромінювання, частота якого визначається зарядом ядра Ze і номерами оболонок, між якими здійснюється перехід. Дослідження рентгенівських спектрів показують, які стаціонарні стани займають електрони в атомі різних речовин.

Характеристичні рентгенівські спектри різних елементів мають однотипну структуру. Г. Мозлі встановив:

частоти характеристичних спектрів зростають із збільшенням порядкового номера елемента, тобто квадратний корінь з частоти характеристичного рентгенівського випромінювання є лінійною функцією від порядкового номера елемента.

Дані результатів дослідження Мозлі підтвердили, що елементи в таблиці Менделєєва розміщені в порядку зростання порядкового номера, тобто заряду ядра, який може збільшуватися тільки на одиницю.

Застосування рентгенівського випромінювання

У науці і техніці широко застосовують такі властивості рентгенівського випромінювання, як його велика здатність, дія на фотопластинки, здатність іонізувати речовину, крізь яку вони проходять.

Так, *рентгенівська дефектоскопія* – спосіб визначення наявності, місцезнаходження і розмірів внутрішніх дефектів у матеріалах і виробах – ґрунтується на відмінності ослаблення рентгенівського випромінювання під час його проходження крізь ділянки виробів різної густини і протяжності. У рентгенівській дефектоскопії найбільше поширений фотографічний метод з утворенням зображення на рентгенівській плівці.

За допомогою рентгеноструктурного аналізу досліджують атомну структуру речовини, вивчаючи картини дифракції і розсіювання рентгенівського випромінювання речовиною.

Властивість рентгенівського випромінювання по-різному поглинатись різними елементами, здатність спричинювати світіння екранів, які люмінесціюють, лягли в основу його широкого застосування в медицині для

просвічування різних органів хворих з метою діагностики, лікування злоякісних пухлин, виявлення різних вклучень, наприклад осколків у тілі людини. Фізіологічну дію рентгенівського випромінювання вперше дослідив російський академік О. М. Бехтерев.

Короткі висновки

- Х. Гюйгенс запропонував хвильову теорію світла, за якою світло – це потік хвиль, подібно до звукових хвиль у повітрі або хвиль на поверхні води. На основі хвильової теорії були пояснені такі явища, як відбивання і заломлення світла, інтерференція і дифракція хвиль, які з корпускулярної точки зору пояснити не можна.
- Закони відбивання світла:
 - 1) падаючий і відбитий промені та нормаль до межі поділу лежать в одній площині;
 - 2) кут падіння дорівнює куту відбивання.
- Закони заломлення світла:
 - 1) падаючий і заломлений промені та нормаль до межі поділу лежать в одній площині;
 - 1) відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення дорівнює відношенню швидкостей поширення світла в цих середовищах:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2}, \text{ або } \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}.$$

- Якщо світло проходить з оптично більш густого середовища в менш густе, то буде повне відбивання: $\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1}$.
- Стійка картина інтерференції світла має місце при накладанні когерентних хвиль однієї на одну. Хвилі підсилюють ($\delta = k\lambda$) або ослаблюють $[\delta = (2k + 1)\lambda / 2]$ одна одну залежно від різниці ходу між ними.

Найбільш поширеним прикладом інтерференції світла є інтерференція в тонких плівках. Когерентні хвилі утворюються в процесі відбивання світлових хвиль від двох поверхонь плівки. Оскільки різниця ходу променів, які інтерферують, залежить від товщини плівки, показника заломлення матеріалу, кута падіння променів і довжини хвилі падаючого світла, то при освітленні плівки білим світлом утворюється кольорова картина інтерференції.

- Світло – це електромагнітні хвилі, і для нього за певних умов властиве явище дифракції. Це явище пояснюють за допомогою принципу Гюйгенса – Френеля. За цим принципом, фіктивні джерела когерентні і хвилі, які вони випускають, можуть інтерферувати в будь-якій точці простору. Щоб визначити результати дифракції в деякій точці простору, Френель запропонував поділяти хвильову поверхню на окремі ділянки (зони). Користуючись методом зон Френеля, можна визначити дифракційні картини від щілини і дифракційних ґрат.

Кут, який визначає напрям на головний дифракційний максимум спектра, утвореного за допомогою ґрат, знаходять із співвідношення $d \sin \varphi = k\lambda$.

Дифракційні ґрати розкладають біле світло в спектр за довжинами хвиль. За її допомогою можна вимірювати довжини світлових хвиль.

- Голографія – особливий метод реєстрації на фотопластинці хвильового фронту випромінювання, що йде від предмета, і потім відновлення цього фронту для утворення зображення предмета. Голографію застосовують для записування і зберігання великого інформаційного матеріалу, в кіно, телебаченні і т. д. Вона є одним з перспективних методів сучасної фізики.
- Поперечність світлових хвиль було доведено експериментально в процесі спостереження проходження світла через анізотропні середовища – кристали. Дія світла на речовину визначається в основному вектором напруженості \mathbf{E} електричного поля. Якщо вектор \mathbf{E} коливається в різних напрямках, у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі, то світло називають природним. Якщо коливання відбуваються тільки в одному напрямі, то світло називають поляризованим. Поляризоване світло можна поляризувати під час заломлення і відбивання від меж поділу двох діелектриків. Світло може поляризуватися також у процесі проходження через анізотропне середовище.
- Явище поляризації доводить поперечний характер світлових хвиль. Поперечність світлових хвиль підтверджується і електромагнітною теорією світла.
- Залежність показника заломлення речовини від довжини хвилі називають дисперсією світла. Результатом дисперсії є розклад призмкою білого світла в спектр. Дисперсія характерна для всіх середовищ, крім вакууму. Дисперсію називають нормальною, якщо показник заломлення зростає із зменшенням довжини хвилі.
- Вид спектрів випускання залежить від хімічної природи і стану тіла. Спектр розжареного твердого тіла – суцільний. Спектри газів або пари – лінійчасті. Спектри молекул – смугасті.
- Спектри поглинання утворюються в процесі проходження і поглинання випромінювання в речовині. Атоми певної речовини поглинають ті світлові хвилі, які вони самі випускають. За спектрами випускання визначають хімічний склад Сонця і зір.
- Промені, які мають довжини хвиль менші, ніж фіолетові, заломлюються більше, ніж фіолетові промені, і лежать за фіолетовою частиною спектра, називають ультрафіолетовими, їх виявляють за хімічною дією. Промені, які мають довжини хвиль більші, ніж червоні, заломлюються менше від них і лежать за червоним кінцем спектра, називають інфрачервоними, їх виявляють за тепловою дією.
- Спектри зір дуже різні. Майже всі вони – спектри поглинання. Колір і спектр зір пов'язані з їх температурою. Джерелом енергії, яку дістають більшість зір і Сонце, є ядерні реакції перетворення водню в гелій.
- Рентгенівське випромінювання виникає від різкого гальмування швидких електронів. Його спектр суцільний. Максимальна енергія рентгенівського випромінювання не може перевищувати енергію електрона, якої він набув у прискорюючому полі.

Характеристичне рентгенівське випромінювання має лінійчастий спектр. Частоти його ліній характеризують речовину анода.

- Рентгенівське випромінювання використовують у медицині і техніці, наукових дослідженнях.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що називають кутом падіння? кутом відбивання? 2. Сформулюйте закони відбивання світла, закони заломлення світла. 3. Що називають абсолютним і відносним показником заломлення? 4. Що називають граничним кутом повного відбивання? 5. Що називають інтерференцією світла? 6. Які хвилі називають когерентними? 7. Сформулюйте умову максимумів і мінімумів інтерференції. 8. Що таке оптичний і геометричний шлях світла? 9. Як пояснити кольори тонких плівок? 10. Що таке просвітлена оптика? 11. Що називають дифракцією світла? За яких умов її можна спостерігати? 12. Поясніть дифракцію на одній щілині. 13. Сформулюйте умову головних максимумів при дифракції на ґратах. 14. Що розуміють під роздільною здатністю дифракційних ґрат? 15. Яке світло називають природним? поляризованим? 16. Сформулюйте закон Брюстера. 17. Які способи утворення поляризованого світла вам відомі? 18. Що називають дисперсією світла? 19. Що таке спектр? 20. Поясніть колір прозорих і непрозорих тіл. 21. Які лінії спектрів випромінювання? 22. Які речовини дають суцільний спектр? 23. Які речовини дають лінійчастий, смугастий спектр? 24. Розкажіть про ультрафіолетове випромінювання і його властивості. 25. Розкажіть про інфрачервоне випромінювання і його властивості. 26. Що називають спектральним аналізом? 27. Що таке фраунгоферові лінії? 28. Яка природа і властивості рентгенівських променів? 29. Що розуміють під гальмівним, характеристичним випромінюванням?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. На горизонтальному дні озера завглибшки 1,8 м лежить плоске дзеркало. На якій відстані S від місця входження променя у воду цей промінь знову вийде на поверхню води після відбивання від дзеркала? Кут падіння променя 30° .

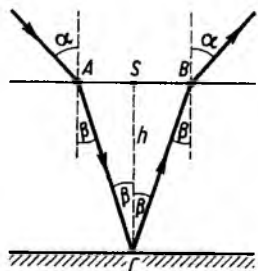


Рис. 21.31

Дано: $h = 1,8$ м; $\alpha = 30^\circ$; $n_{21} = 1,33$.

Знайти: S .

Розв'язання. Побудуємо хід променя. Нехай промінь світла падає на поверхню водоюми в точку A під кутом α (рис. 21.31). На межі поділу двох середовищ промінь заломлюється. Кут заломлення дорівнює β . За законом заломлення, $\sin \alpha / \sin \beta = n_{21}$. Заломлений промінь, відбившись у точці C від плоского дзеркала, яке лежить на дні водойми, вийде з води в точці B . Розглянемо $\triangle ABC$. У цьому трикутнику

$$s = AB = 2h \operatorname{tg} \beta, \operatorname{tg} \beta = \sin \beta / \cos \beta.$$

Знайдемо з (21.2) $\sin \beta = \sin \alpha / n_{21}$, тоді

$$s = \frac{2h \sin \alpha}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha}}.$$

Обчислення:

$$s = \frac{2 \cdot 1,8 \text{ м} \cdot 0,5}{\sqrt{(1,33)^2 - (0,5)^2}} = 1,45 \text{ м}.$$

Задача 2. Промінь світла виходить з діелектрика у вакуум. Граничний кут дорівнює 42° . Визначити швидкість світла в діелектрику.

Дано: $\alpha = 42^\circ$; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Знайти: v .

Розв'язання. Швидкість світла в діелектрику визначимо із співвідношення $v = c/n$, де n – показник заломлення діелектрика; його визначимо з умови (21.2): $\sin \alpha = 1/n$. Отже, $v = c \sin \alpha$.

Обчислення:

$$v = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 0,674 = 2,02 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Задача 3. На мильну плівку в повітрі під кутом $61^\circ 10'$ падає паралельний пучок монохроматичних променів $\lambda = 0,52$ мкм. При якій найменшій товщині плівки буде видно інтерференційні смуги, якщо спостереження ведуть у відбитому світлі?

Дано: $\lambda = 0,52 \cdot 10^{-6}$ м; $i = 61^\circ 10'$; $n = 1,33$.

Знайти: d .

Розв'язання. Запишемо умову максимуму:

$$2k \frac{\lambda}{2} = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2},$$

де d – товщина плівки в точці спостереження; n – показник заломлення плівки; i – кут падіння променів світла; λ – довжина хвилі падаючого світла. Доданок $\lambda/2$ у формулі (1) враховує втрату півхвилі при відбиванні світла від мильної плівки (тобто від межі поділу повітря – плівка).

Припустивши, що $k = 1$, оскільки товщина плівки найменша, знайдемо

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

Обчислення:

$$d = \frac{0,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{4\sqrt{1,33^2 - \sin^2 61^\circ 10'}} = \frac{0,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{4\sqrt{1,33^2 - 0,876^2}} = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,13 \text{ мкм}.$$

Задача 4. На дифракційні ґрати, що мають 500 штрихів на міліметр, падає плоска монохроматична хвиля ($\lambda = 0,5$ мкм). Визначити найбільший порядок спектра, який можна спостерігати, коли промені на ґрати падають нормально.

Дано: $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м.

Знайти: k_{\max} .

Розв'язання. Умова головних максимумів

$$d \sin \varphi = k \lambda.$$

Максимальному k відповідає $\sin \varphi = 1$, тому

$$d = k_{\max} \lambda.$$

Тоді

$$k_{\max} = \frac{d}{\lambda},$$

де $d = 1/N$.

Обчислення:

$$d = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{500} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$k_{\max} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 4.$$

Задача 5. Під яким кутом до горизонту має бути Сонце, щоб промені, відбиті від поверхні озера, були максимально поляризовані?

Дано: $n = 1,33$.

Знайти: γ .

Розв'язання. Відбитий промінь максимально поляризований, якщо для кута i його падіння виконується умова Брюстера (21.12):

$$\operatorname{tg} i_B = n, \quad (1)$$

де n – відносний показник заломлення двох середовищ. Сонце буде під кутом до горизонту

$$\gamma = \pi/2 - i_B. \quad (2)$$

Тоді

$$i_B = \operatorname{arctg} n = \operatorname{arctg} 1,33 \approx 53^\circ; \quad \gamma = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Людина, яка стоїть на березі озера, бачить Місяць на небі в напрямі, який з горизонтом утворює кут 60° . На відстані 0,9 м від себе людина бачить відбиток Місяця в озері. Визначити зріст людини.

2. Тонкий пучок світла напрямлений у повітрі на поверхню деякої рідини під кутом падіння 40° . Кут заломлення при цьому дорівнює 24° . Який буде кут заломлення при куті падіння 80° ?

3. Промінь світла напрямлений з повітря в скло ($n = 1,5$). Знайти кути падіння і заломлення, якщо кут між відбитим і заломленим променями дорівнює 90° .

4. Обчислити граничний кут повного відбивання для плексигласу і алмазу.

5. Промінь світла напрямлений у сірковуглеці на межу з повітрям під кутом 39° . Чи вийде промінь у повітря?

6. Граничний кут повного відбивання для спирту 47° . Знайти показник заломлення спирту.

7. Яку найменшу товщину повинна мати мильна плівка, щоб відбиті промені мали червоне забарвлення ($\lambda = 0,63$ мкм)? Білий промінь падає на плівку під кутом 30° .

8. На тонку плівку ($n = 1,33$) під кутом 50° падає паралельний пучок білого світла. При якій товщині плівки відбите світло має максимум для довжини хвилі 0,5 мкм?

9. На тонку плівку з показником заломлення 1,5, розміщену в повітрі, падає нормально до неї монохроматичне світло довжиною хвилі λ . Визначити, якою має бути найменша товщина плівки, щоб у відбитому світлі вона була темною. Який колір матиме плівка, якщо її товщина дорівнює 1,66 λ ?

10. На пластинку із щілиною, ширина якої 0,1 мм, падає нормально до неї монохроматичне світло з довжиною хвилі 0,7 мкм. Визначити ширину центральної світлої смуги, якщо екран встановлено на відстані 1 м від щілини.

11. На непрозорий екран із щілиною, ширина якої 10 мкм, падає паралельний пучок монохроматичного світла. Кут відхилення другого дифракційного максимуму $7^\circ 10'$. Визначити довжину хвилі падаючого світла.

12. На щілину завширшки 2 мкм падає перпендикулярно монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 0,589$ мкм. Знайти всі кути, в напрямі яких будуть максимуми світла.

13. На дифракційні ґрати нормально до них падає монохроматичне світло. Максимум другого порядку буде під кутом 30° до нормалі. Скільки спектрів різних порядків дають дифракційні ґрати?

14. При нормальному падінні світла на дифракційні ґрати було встановлено, що під кутом 35° збігаються максимуми спектральних ліній з довжинами хвиль 0,576 і 0,384 мкм. Визначити період ґрат і порядок спектрів, до яких належать ці лінії. Відомо, що для другої спектральної лінії максимальний порядок спектра, який дають ґрати, дорівнює п'яти.

15. Промінь світла, що проходить через шар води, падає на кварцову пластинку, частково відбивається, частково заломлюється. Визначити, який має бути кут падіння, щоб заломлений промінь був перпендикулярний до відбитого.

18. При переході променя світла з першого середовища в друге граничний кут дорівнює 61° . Під яким кутом на межу поділу цих середовищ має падати промінь, який іде з другого середовища в перше, щоб відбитий промінь був повністю поляризований? Зробити рисунок.

РОЗДІЛ 6 ОСНОВИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

У розділі розглянуто основи спеціальної теорії відносності, створеної А. Ейнштейном (1905). Ця теорія радикально змінила наші основні уявлення про простір, час, матерію і рух.

Виклад матеріалу розпочнемо з ньютонівських уявлень про простір і час, які лежать в основі класичної (дорелятивістської) фізики.

ГЛАВА 22 ОСНОВИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

§ 210. Принцип відносності у фізиці

Система відліку

Для описування механічного руху треба взяти тіло (або систему тіл) і розглядати відносно нього рух. Положення рухомої точки M (або тіла) звичайно розглядають у декартовій системі координат, у певний момент часу воно визначається трьома просторовими координатами (x, y, z) (рис. 22.1) або радіусом-вектором \vec{r} .

Для визначення швидкості якої-небудь рухомої точки не досить знати тільки її координати, треба мати ще й годинник. Як годинник можна використати будь-який періодичний процес, що дає масштаб часу. Сукупність декартової системи координат, пов'язаної з певними тілами відліку, і годинника називають *системою відліку* (рис. 22.1). У принципі таких систем може бути безліч. Але найзручнішою для описування механічних явищ є така система відліку, в якій закони механіки мають найпростіший вигляд.

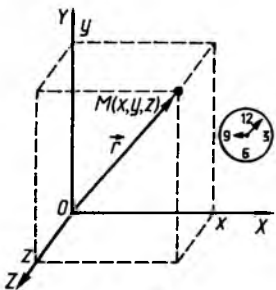


Рис. 22.1

Припустимо, що є така система відліку, в якій прискорення матеріальної точки зумовлене тільки взаємодією її з іншими тілами. Якщо в цій системі відліку на матеріальну точку не діють інші тіла, то вона рухається відносно даної системи відліку прямолінійно і рівномірно, або, як кажуть, за інерцією. Таку систему відліку називають *інерціальною*. Існування інерціальних систем відліку підтверджується численними дослідженнями. Перший і другий закони Ньютона виконуються не в будь-яких системах відліку, а тільки в інерціальних. У першому наближенні систему, пов'язану з поверхнею Землі, можна взяти за інерціальну, проте внаслідок обертання Землі це припущення не цілком обґрунтоване. За інерціальну систему відліку взято *геліоцентричну систему*, пов'язану з Сонцем і віддаленими “нерухомими” зорями, але, точно кажучи, і вона не є інерціальною, оскільки Сонце рухається навколо центра Галактики. Питання про те, чи є взята система відліку інерціальною, розв'язують на основі експерименту. Якщо в межах точності вимірювання в даній системі відліку закони Ньютона виконуються, то її можна вважати інерціальною.

Принцип відносності

Г. Галілей установив:

всі механічні явища в різних інерціальних системах відбуваються однаково, тобто жодними механічними дослідженнями, які виконують “усередині” даної інерціальної системи, не можна встановити, перебуває дана система в спокої або рухається прямолінійно і рівномірно. Це положення називають **принципом відносності Галілея**. Принцип відносності Галілея є узагальненням численних дослідів. За принципом Галілея, всі системи відліку, які відносно інерціально рухаються рівномірно і прямолінійно, також інерціальні. Систему, яка рухається прискорено відносно інерціальної, називають *неінерціальною*.

§ 211. Перетворення Галілея

Перетворення Галілея

Для тих випадків, коли рух тіла треба описати в іншій системі відліку, знайдемо формули перетворення координат при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої. Припустимо, що інерціальна система K' рухається зі швидкістю v уздовж осі Ox відносно іншої інерціальної системи K (рис. 22.2). Для спрощення припустимо, що осі координат систем K і K' у початковий момент часу $t = t' = 0$ збіглися. Припустимо, що матеріальна точка M перебуває у спокої відносно системи K . Її положення в системі K характеризується радіусом-вектором \mathbf{r} або координатами x, y, z . Відносно системи K' ця точка рухається і її положення в системі K' характеризується радіусом-вектором \mathbf{r}' або координатами x', y', z' .

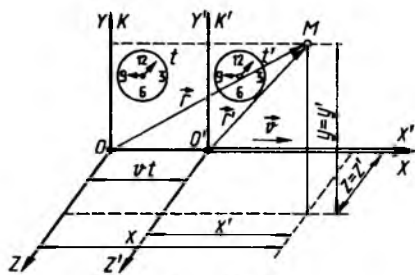


Рис. 22.2

натами x', y', z' . Перебіг часу в обох інерціальних системах відліку K і K' однаковий, годинники синхронізовані, тобто $t = t'$.

Зв'язок між радіусами-векторами \mathbf{r}' і \mathbf{r} тієї самої точки M у системах K і K' має вигляд (рис. 22.2)

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{v}t. \quad (22.1)$$

Співвідношення (22.1) можна записати для кожної з декартових координат. Урахувавши, що $t = t'$, дістанемо

$$x' = x - vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'. \quad (22.2)$$

Рівняння (22.2) називають *прямими перетвореннями Галілея*.

Якщо матеріальна точка M нерухома в системі K' , то рівняння її руху в системі K можна записати за допомогою обернених перетворень Галілея:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{v}t, \quad (22.3)$$

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'. \quad (22.4)$$

Закон додавання швидкостей при переході від однієї інерціальної системи до іншої

Цей закон можна дістати з перетворень Галілея. Здиференціюємо співвідношення (22.1) за часом:

$$\frac{d\mathbf{r}'}{dt} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} - \frac{d}{dt}(\mathbf{v}t).$$

Врахуємо, що $d\mathbf{r}'/dt = \mathbf{u}'$ – швидкість руху точки M у системі K' , $d\mathbf{r}/dt = \mathbf{u}$ – швидкість руху точки M в нерухомій системі K . Дістанемо

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \mathbf{v}. \quad (22.5)$$

§ 212. Експериментальні основи спеціальної теорії відносності

Фізика Галілея і Ньютона ґрунтувалась на уявленнях класичної механіки, яка виходила з існування тривимірного простору і часу єдиного для всіх спостерігачів і всіх інерціальних систем відліку. Вона передбачала, що відстань між двома точками простору (довжина відрізка) є

інваріантом, тобто має одне й те саме значення в усіх системах відліку. З цих принципів, які здавалися цілком природними і підтверджувались численними дослідами, і випливали перетворення Галілея. Принципи класичної механіки були непорушними до появи електромагнітної теорії Максвелла (див. § 181). Рівняння Максвелла істотно відрізняються від рівнянь класичної механіки і неінваріантні відносно перетворень Галілея. Це означає, що коли рівняння Максвелла є слушними в якійсь одній системі координат, то вони не є слушними при переході до іншої, яка рухається відносно першої прямолінійно і рівномірно. Було висловлено гіпотезу про існування деякого середовища, яке заповнює Всесвіт, такого, що рівняння Максвелла є правдивими тільки в одній, пов'язаній з цим середовищем системі відліку. Саме з цим середовищем послідовники Максвелла асоціювали поняття ефіру.

Гіпотеза про те, що весь світовий простір заповнений ефіром – носієм світлових хвиль, належить Р. Декарту. Електричні і магнітні явища також намагались пояснити за допомогою пружних напруг в ефірі. Уявлення про ефір змінювались. Вважали, що для різних галузей явищ існують різні ефіри: світловий, електричний, магнітний тощо. З встановленням зв'язків між різними розділами фізики зміцнювалось уявлення про єдиний ефір, який перебуває у спокої в абсолютному просторі.

Найбільш очевидним способом підтвердження існування ефіру і наявності в нього якихось властивостей мало стати вимірювання швидкості світла в рухомій системі відліку. Такою системою відліку може бути Земля, яка рухається по орбіті навколо Сонця із швидкістю $3 \cdot 10^4$ м/с, причому напрям руху Землі періодично змінюється із зміною пір року. За класичним законом додавання швидкостей, швидкість світла c' , виміряна в системі відліку, пов'язаній із Землею, має бути

$$c' = c \pm v,$$

де c – швидкість світла відносно ефіру; v – швидкість руху Землі. Знак між c і v залежить від напрямку руху Землі і світла. Прецизійні досліди проводили в кінці XIX ст. А. Майкельсон і Е. Морлі. Вони за допомогою інтерферометра вимірювали не саму швидкість світла, а відношення значень швидкостей світла у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Ці досліди багато разів повторювали, але з'ясувалося, що швидкість світла в системі відліку, пов'язаній із Землею, в усіх напрямках однакова. Дослід Майкельсона – Морлі став одним з вирішальних дослідів сучасної фізики; його результати суперечили гіпотезі про те, що світло поширюється через ефір. Інші досліди, які мали виявити рух Землі відносно ефіру за допомогою вже не оптичних, а електромагнітних явищ (досліди Траутона і А. Нобеля), давали результати, які узгоджувалися з дослідами Майкельсона і Морлі. Отже, рух Землі ніяк не позначається на швидкості поширення світла і класичний закон додавання швидкостей у цьому разі не виконується.

Усі спроби врятувати гіпотезу про існування ефіру, нарешті, зазнали невдачі.

Дослід Майкельсона – Морлі відіграв вирішальну роль у докорінній зміні наших уявлень про простір і час.

§ 213. Постулати Ейнштейна

Результати дослідів, які проводили Майкельсон, Морлі та інші фізики, не можна було пояснити з точки зору класичної фізики. Суперечність між теорією і практикою пояснив А. Ейнштейн у 1905 р. Він глибоко і критично проаналізував експериментальні методи вимірювання простору і часу. У своїй праці “До електродинаміки рухомих середовищ” Ейнштейн показав, що закони класичної механіки і перетворення Галілея правильні тоді, коли ми маємо справу з невеликими швидкостями руху тіл і вважаємо, що швидкість поширення сигналів нескінченна. Проте, якщо тіла рухаються із швидкостями, близькими до швидкості світла у вакуумі, закони класичної механіки мають бути замінені іншими, загальнішими, які враховують особливості такого руху, тобто законами релятивістської механіки. В основі цих законів лежать нові уявлення про простір і час.

Перегляд уявлень про властивості простору і часу спричинив створення на початку ХХ ст. спеціальної теорії відносності. Термін “спеціальна” підкреслює ту обставину, що ця теорія розглядає явища, які відбуваються тільки в інерціальних системах відліку.

В основі теорії відносності лежить положення, за яким **ніяка енергія, ніякий сигнал не можуть поширюватись із швидкістю, яка перевищує швидкість світла у вакуумі, а швидкість світла у вакуумі стала і не залежить від напрямку поширення.**

Це положення формулюють у вигляді двох постулатів: *принципу відносності і принципу сталості швидкості світла.*

Перший постулат є поширенням механічного принципу відносності Галілея на будь-які фізичні явища і формулюється так:

у будь-якій інерціальній системі будь-які фізичні явища при їх тожній постановці відбуваються однаково: усі закони природи і рівняння, що їх описують, інваріантні при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої.

З першого постулату випливає, що ніякими дослідями не можна визначити, чи перебуває дана інерціальна система в спокої, чи рухається прямолінійно і рівномірно, тобто всі інерціальні системи відліку за своїми фізичними властивостями еквівалентні одна одній.

Другий постулат твердить:

швидкість світла у вакуумі є величиною сталою і однаковою в усіх інерціальних системах відліку, вона не залежить від руху джерела світла і спостерігача.

Цей постулат важко зрозуміти. Він вимагає, щоб в одному й тому самому експерименті два спостерігачі, які перебувають у двох різних інерціальних системах (що рухаються одна відносно одної), діставали одне й те саме значення швидкості світла у вакуумі. Швидкість світла у вакуумі є максимально можливою швидкістю передавання сигналу. Отже, якщо всі інерціальні системи рівноправні, то й максимальна швидкість передавання сигналу в них має бути однаковою.

§ 214. Відносність одночасності

Згідно з класичними уявленнями про простір і час взаємодії, сигнали можуть миттю передаватись з однієї точки простору в іншу. У механіці Ньютона вважали, що таке поняття, як одночасність події, має той самий зміст для різних точок простору Всесвіту. З точки зору теорії відносності поняття “абсолютна одночасність” і “абсолютний час” не існують. Неозначеність поняття одночасності стане помітною при виконанні простого досліду, якщо розглядати дуже великі відстані. Розглянемо такий приклад. Нехай космонавт, який перебуває на Землі, запитує у свого товариша, що перебуває на Марсі, що в нього відбувається на “даний момент”. Радіосигналам потрібен час, щоб пройти відстань від Землі до Марса і назад, відповідь на задане з Землі запитання прийде не раніше ніж через 10 хв. Тому до моменту надходження відповіді інформація, що міститься в ній, стосуватиметься не того, що відбувається “тепер”, а того, що відбувалося, коли сигнал відправлявся з Марса. Отже, ми не зможемо довідатись, що відбувається на Марсі “в даний час”. Щоб дізнатися, в який час відбулася дана подія, треба звірити годинник космонавта на Марсі з годинником космонавта на Землі. Отже, постає питання про синхронізацію годинників.

У повсякденному житті годинники синхронізують, приймаючи сигнали точного часу по радіо. Радіосигнали, які передаються з Москви, приймають міста колишнього СРСР. Знаючи відстань від Москви до міста, де приймають сигнали точного часу, можна обчислити поправку на запізнення сигналу, наприклад, для С.-Петербурга вона становить 0,002 с. В земних умовах такі поправки неістотні, але коли йдеться про космічні відстані, як у нашому прикладі, вони мають велике значення. Добре відомо, що світло, яке вловлюють телескопи від різних зір, було випромінене ними десятки, сотні, а іноді й мільйони років тому. Синхронізувавши го-

динники у певній системі координат, за допомогою якого-небудь методу сигналізації ми визначимо власний час цієї системи координат. Але синхронізовані так годинники будуть такими тільки в одній системі, тобто в тій, в якій їх синхронізували. При цьому не можна ввести жодний час, однаковий для всіх систем координат.

Дві події, наприклад спалахи світла в A і B , вважають одночасними, якщо світловий сигнал, який виходить з A і B , за той самий час досягає спостерігача O , розміщеного посередині AB (рис. 22.3). Ці міркування будуть правдиві, якщо система AB рухається рівномірно й прямолінійно із швидкістю v і спостерігачі в ній на рух можуть не звертати уваги. При обміні світловими сигналами між спостерігачами, які перебувають

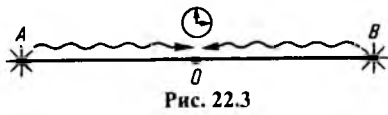


Рис. 22.3

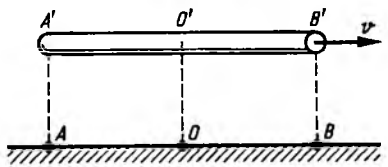


Рис. 22.4

в одній системі, саме це й буває, що пов'язано з неможливістю визначити, рухається дана система прямолінійно й рівномірно або перебуває в спокої. Виходячи з попереднього означення одночасності, покажемо, що при переході від однієї системи відліку до іншої одночасність не зберігається.

Розглянемо класичний приклад Ейнштейна, коли вздовж ділянки і залізничної колії AB із швидкістю v рухається поїзд $A'B'$ (рис. 22.4). Нехай O' – середина поїзда $A'B'$, яка збігається з серединою O відрізка AB у той момент, коли з A і B (одночасно для спостерігача O) виходять світлові сигнали. Спостерігач в O' , який рухається до B , сприймає сигнали, що вийшли з B , з випередженням порівняно з тими, що вийшли з A . Але оскільки єдиним можливим критерієм одночасності є збіг моментів приходу сигналів у точку, яка лежить посередині $A'B'$, то дві події, одночасні для O , не будуть одночасними для O' .

Отже, за теорією Ейнштейна, для кожної з розглядуваних інерціальних систем, що перебувають у відносному русі, існує лише *власний час*, який показує годинник, що перебуває у спокої в цій системі. Інакше кажучи, не існує абсолютної одночасності.

Час і рух пов'язані один з одним. Якщо поняття часу відносне, то, отже, усувається поняття “абсолютний рух”. Абсолютного руху не існує.

Наведені приклади показують, що час не абсолютний, а залежить, як і інші координати, від вибору системи відліку*.

* Час є однорідним. У ньому не можна знайти мить, яка відрізнялася б від інших сама по собі і могла б стати початком привілейованої системи відліку часу. Однорідність часу веде до того, що під час руху тіла або системи тіл зберігається незмінна енергія.

Математичним завершенням спеціальної теорії відносності стали праці Г. Мінковського, який у 1908 р. у доповіді про простір і час сказав: “Уявлення про простір і час, які я збираюсь розвинути перед Вами, виростили на основі експериментальної фізики. У цьому їх сила. Вони спричинюють радикальні наслідки. Віднині простір сам по собі і час сам по собі повністю відходять у царство тіней, і лише своєрідний союз обох цих понять зберігає самостійне існування”.

§ 215. Перетворення Лоренца

Перетворення Галілея виходять з припущення, що годинники синхронізуються за допомогою сигналів, які поширюються миттю. Проте таких сигналів насправді немає.

Існування верхньої межі для швидкості поширення сигналів ($c = 3 \times 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі) зумовило інші формули перетворення, які дають можливість за координатами і часом довільної події, визначеними в певній інерціальній системі K (тобто за значеннями x, y, z, t), знайти координати тієї самої події в будь-якій іншій інерціальній системі K' , що рухається відносно K у напрямі осі X прямолінійно й рівномірно із швидкістю v (тобто значення x', y', z', t'):

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (22.6)$$

$$y' = y, \quad (22.7)$$

$$z' = z, \quad (22.8)$$

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (22.9)$$

Формули (22.6) – (22.9) називають *перетвореннями Лоренца*. При $v \ll c$ перетворення Лоренца переходять у перетворення Галілея (22.2), (22.4), тобто теорія відносності не заперечує перетворень Галілея, а включає їх як окремий випадок, правдивий при малих v .

Далі покажемо, що існує загальний зв'язок між законами класичної і релятивістської механіки:

законали релятивістської механіки переходять у закони класичної механіки у випадку малих швидкостей ($v \ll c$).

Формули прямих і обернених перетворень Галілея і Лоренца

Прямі перетворення		Обернені перетворення	
Галілея	Лоренца	Галілея	Лоренца
$x' = x - vt$	$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$	$x = x' + vt'$	$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$
$y' = y$	$y' = y$	$y = y'$	$y = y'$
$z' = z$	$z' = z$	$z = z'$	$z = z'$
$t' = t$	$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$	$t = t'$	$t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

З перетворень Лоренца випливає, що швидкість v не може дорівнювати або бути більшою від швидкості світла c , оскільки підкореневий вираз при $v = c$ перетворюється в нуль, а при $v > c$ від'ємний і перетворення Лоренца втрачають фізичний зміст.

§ 216. Висновки з перетворень Лоренца

Відносність відстаней

Нехай твердий стрижень перебуває у спокої в системі відліку K' , яка рухається відносно системи K уздовж осі X із швидкістю v (рис. 22.5). Довжину цього стрижня в системі K можна виміряти, зафіксувавши відстань між його кінцями одночасно за годинником цієї системи (t). Згідно з перетвореннями Лоренца, для координат кінців стрижня в рухомій системі $K'(x'_2, x'_1)$ маємо:

$$x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \quad x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}};$$

$$x'_2 - x'_1 = \frac{(x_2 - vt) - (x_1 - vt)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

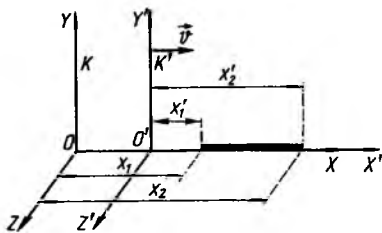


Рис. 22.5

Оскільки $x'_2 - x'_1$ – відстань між початком і кінцем стрижня в системі K' , відносно якої він перебуває в спокої, то $x'_2 - x'_1 = l$ – власна або довжина спокою стрижня. Відповідно $x_2 - x_1 = l$ – це відстань між початком і кінцем стрижня в системі K , відносно якої він рухається.

Підставивши ці позначення в написану вище формулу, дістанемо

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \tag{22.10}$$

або

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

З виразу (22.10) випливає, що довжина стрижня залежить від швидкості його руху v відносно системи відліку.

Якщо $v \ll c$, то підкореневий вираз прямує до одиниці і $l = l_0$, тобто при таких швидкостях довжина стрижня в усіх інерціальних системах відліку однакова. Якщо $v \rightarrow c$, то чим більша швидкість руху стрижня відносно якої-небудь системи відліку, тим менша його довжина, виміряна в цій системі. Отже, довжина не є незмінною величиною, а залежить від швидкості руху тіла відносно даної системи відліку. Незмінним є лише твердження про те, що стрижень, який перебуває в спокої, завжди довший від того, що рухається.

Відносність проміжків часу

У § 214 було показано, що однакові годинники в двох інерціальних системах відліку, які рухаються один відносно одного, йдуть несинхронно. Уявимо собі, що є спостерігач, відносно якого один годинник перебуває в спокої, а другий рухається із сталою швидкістю v . Виникає запитання: який із цих годинників для спостерігача йтиме швидше, а який – повільніше? Щоб відповісти на це запитання, розглянемо дві системи координат K і K' і скористаємось перетвореннями Лоренца. Під системою K' розуміємо, наприклад, корабель, який рухається із швидкістю v прямолінійно і рівномірно відносно берега. На кораблі перебуває спостерігач, годинник якого нерухомий відносно системи K' . Інший спостерігач і його годинник перебувають на Землі, тобто вони нерухомі відносно берега, який вважатимемо за систему відліку K , що перебуває в спокої. Протягом проміжку часу $t'_2 - t'_1 = \tau'$ спостерігач, що перебуває на кораблі, надсилає світловий сигнал на берег. Початок світлового сигналу t'_1 і кінець сигналу t'_2 він фіксує на своєму годиннику. Для нього початок і кінець світлового сигналу відбулися в одній точці простору, але в різний час: $x'_1 = x'_2$; $t'_1 \neq t'_2$.

Спостерігач, який перебуває на березі, приймає світловий сигнал протягом проміжку часу $\tau = t_2 - t_1$. Початок і кінець приймання сигналу спостерігач фіксує на своєму годиннику. Оскільки корабель рухається, то

спостерігач, який перебуває на березі, фіксує початок і кінець світлового сигналу в різних точках простору ($t_1 \neq t_2$; $x_1 \neq x_2$). Порівняємо інтервали часу τ' і τ , для цього скористаємось перетвореннями Лоренца:

$$t_1 = \frac{t'_1 + (v/c^2)x'_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \quad t_2 = \frac{t'_2 + (v/c^2)x'_2}{\sqrt{1-v^2/c^2}},$$

$$t_2 - t_1 = \frac{(t'_2 - t'_1) + (v/c^2)(x'_2 - x'_1)}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Оскільки $x'_2 = x'_1$, то

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \quad \text{або} \quad \tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (22.11)$$

З цієї формули видно, що тривалість того самого процесу різна в системах K і K' . У системі K тривалість процесу більша; отже, він відбувається повільніше, ніж у системі K' . Таким чином, для спостерігача годинник, що рухається, йде повільніше, ніж його власний годинник, що перебуває в спокої, – це явище називається сповільненням часу.

Час, який відлічують за годинником, що рухається разом з тілом, називають власним. Він найкоротший.

Дуже довго не було експериментальних фактів, які б доводили релятивістське сповільнення часу. Тільки в кінці 1930-х років це було експериментально підтверджено в дослідах із збудженням водневими атомами, а пізніше – в процесі вивчення космічних променів, де частинки рухаються з великими швидкостями і сповільнення часу для них досягає помітних значень. Ефект сповільнення було підтверджено в дослідах на визначення середньої тривалості життя мезонів. Мезони, виявлені в космічних променях, є зарядженими або нейтральними частинками, маса яких лежить між масою електрона і масою протона. Наприклад, μ -мезон, маса якого майже в 200 раз більша від маси електрона, розпадається на електрон, нейтрино і антинейтрино. Цей розпад спостерігали на знімках, добутих у камері Вільсона; він також фіксувався за допомогою лічильників іонізуючого випромінювання. Лічильники вимірюють середній час життя μ -мезона, який перебуває в спокої. Для цього μ -мезони спиняють у спеціальному металевому блоці. За допомогою лічильників можна зареєструвати час влучання μ -мезона в блок і час виходу електрона, який виникає внаслідок розпаду. Досліди показують, що середній час життя μ -мезона, що перебуває в спокої, $\tau_0 \approx 2,2 \cdot 10^{-6}$ с. У верхніх шарах атмосфери μ -мезони рухаються з середньою швидкістю, близькою до швидкості світла, і до

свого розпаду проходять багато кілометрів; отже, середній час життя рухомих мезонів значно більший від середнього часу життя тих, що перебувають у спокої. Припустимо, що μ -мезон рухається із швидкістю світла, тоді середньому часу життя τ_0 , що вимірюється в його власній системі відліку, відповідає шлях $s_0 \approx c\tau_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ с} \approx 600 \text{ м}$. У будь-якій іншій системі відліку цей час збільшується, і в експериментах з космічними променями йому відповідає середній шлях до розпаду порядку 5 км. Дані дослідів підтверджують, що мезони, які рухаються, живуть довше, ніж ті, що перебувають у спокої. Отже, чим швидше рухається мезон відносно Землі, тим більший час його життя за земним годинником.

Поняття про ефект Доплера

З акустики відомо, що

при відносному русі джерела і приймача звукових сигналів змінюється частота звукових коливань, що сприймаються.

Цей ефект, передбачений Х. Доплером (1845) для акустичних хвиль, пояснюється з позицій класичної фізики. Ефект Доплера в оптичному діапазоні вперше спостерігав А. Фізо, який помітив зміщення спектральних ліній у випромінюванні небесних тіл. Ефект Доплера в оптичному діапазоні однозначно визначається релятивістським ефектом сповільнення годинників.

Внаслідок зміни реєстрованої частоти зміщуються спектральні лінії відносно їх нормального положення. Якщо джерело світла і приймач зближуються, то лінії зміщені до фіолетового кінця (*фіолетове зміщення*), якщо віддаляються – до червоного (*червоне зміщення*). Ефект Доплера дає можливість визначити швидкості наближення або віддалення різних небесних тіл. Доплерівське тлумачення червоного зміщення веде до уявлення про те, що тепер

метагалактика розширюється і окремі галактики віддаляються одна від одної.

§ 217. Релятивістський закон додавання швидкостей

У класичній механіці закон додавання швидкостей має вигляд [див. (22.5), (22.6)]

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u} \pm \mathbf{v},$$

де \mathbf{u} і \mathbf{u}' – відповідно швидкості тіла в інерціальних системах відліку K і K' ; \mathbf{v} – відносна швидкість руху цих систем. Покажемо, що він не є прав-

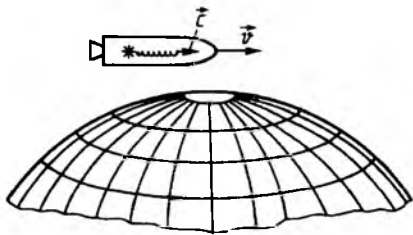


Рис. 22.6

дивим при русі із швидкостями, близькими до швидкості світла. Нехай спостерігач, який перебуває на космічному кораблі, що рухається із швидкістю v відносно Землі, посилає світловий сигнал у напрямі свого руху (рис. 22.6). За класичним законом додавання швидкостей, швидкість світлового сигналу для спостерігача,

який перебуває на Землі, має дорівнювати $c + v$, що суперечить другому постулату Ейнштейна. Отже, новим уявленням про простір і час має відповідати і новий закон додавання швидкостей. Закон додавання швидкостей у релятивістській механіці є наслідком перетворень Лоренца.

Нехай швидкість v напрямлена вздовж осі $X(X')$. У системі K' вздовж осі X' рухається точка M із швидкістю $u'_x = dx'/dt'$. Щоб знайти швидкість $u_x = dx/dt$ цієї точки в системі K , треба записати співвідношення, яке пов'яже u_x і u'_x . З перетворень Лоренца маємо

$$dx = \frac{dx' + v dt'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad dt = \frac{dt' + (v/c^2) dx'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$u_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dx' + v dt'}{dt' + (v/c^2) dx'}.$$

Поділивши чисельник і знаменник правої частини цього співвідношення на dt' , дістанемо *релятивістський закон додавання швидкостей*:

$$u_x = \frac{(dx'/dt') + v}{1 + (v/c^2) \cdot (dx'/dt')} = \frac{u'_x + v}{1 + (vu'_x)/c^2}. \quad (22.12)$$

Повернемось до прикладу, розглянутого на початку параграфа (рис. 22.6). Згідно з (22.12), швидкість світлового сигналу для спостерігача, що перебуває на Землі,

$$u_x = \frac{c + v}{1 + (vc)/c^2} = \frac{c(c + v)}{c + v} = c. \quad (22.13)$$

Цей результат відповідає *принципу сталості швидкості світла*: при додаванні будь-яких швидкостей результат не перевищує швидкості світла у вакуумі, а саме світло поширюється з однаковою швидкістю c з точки зору будь-якого спостерігача.

Легко переконатися, що у випадку руху з малими швидкостями ($u_x < c, v < c$) формула (22.12) перетворюється в класичний закон додавання швидкості.

§ 218. Поняття релятивістської динаміки – маса, імпульс

Із спеціальної теорії відносності випливають два важливих висновки. Ці висновки стосуються взаємозв'язку між масою й енергією та масою і швидкістю. До Ейнштейна інертну масу розглядали як величину сталу. Але в 1901 р. фізики-експериментатори встановили, що маса електронів, які швидко рухаються, зростає при збільшенні швидкості. Поки швидкість частинки, яка рухається, мала порівняно із швидкістю світла, маса практично не зростає. Тому в класичній механіці, де вивчають малі швидкості великих тіл, зростання маси не було помічене.

За теорією відносності,

маса того самого тіла має різні значення залежно від швидкості його руху і від вибору системи відліку, в якій її вимірюють.

Залежність маси m тіла, яке рухається, від швидкості v руху виражається такою формулою:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (22.14)$$

де m_0 – маса спокою, тобто маса тіла в системі відліку, відносно якої воно перебуває в спокої.

При $v < c$ релятивістська маса m прямує до m_0 . Графік залежності маси від швидкості подано на рис. 22.7.

Як у класичній механіці, так і в релятивістській маса – міра інертності.

У релятивістській динаміці інертність зростає із зростанням швидкості, тобто, чим більша швидкість, тим важче збільшити її. Якщо $v = c$, то маса прямує до нескінченності. Звідси випливає, що жодне тіло, яке має ненульову масу спокою ($m_0 \neq 0$), не може рухатись із швидкістю, яка дорівнює швидкості світла у вакуумі. Теорія відносності не заперечує існування частинок, які рухаються із швидкістю c . Такими частинками є *фотони*, в яких маса спокою дорівнює нулю.

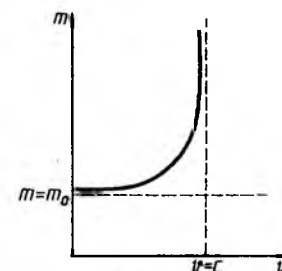


Рис. 22.7

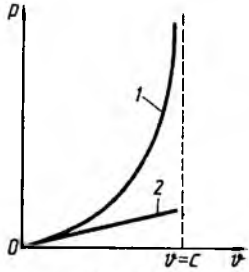


Рис. 22.8

У вакуумі фотони завжди рухаються із швидкістю, що дорівнює швидкості світла.

У класичній фізиці імпульс визначається $p = mv$, де m – маса тіла; v – швидкість його руху. Але маса рухомого тіла залежить від швидкості [див. (20.14)], тому релятивістський імпульс

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (22.15)$$

Крива 1 на рис. 22.8 характеризує залежність імпульсу від швидкості світла. Як випливає з формули (22.15), при швидкостях руху v , малих порівняно з c , імпульс визначають за класичною формулою $p = m_0 v$ (крива 2), тобто графіки, які зображають релятивістський і класичний імпульси, збігаються.

При швидкостях руху, порівнянних з c , релятивістський і класичний імпульси не збігаються. Значення релятивістського імпульсу прямує до нескінченності. Слід зазначити, що для замкненої системи і в релятивістській динаміці справджується закон збереження імпульсу. Саме користуючись законом збереження імпульсу і теоремою додавання швидкостей, і виводять формулу (22.14), яка визначає залежність маси від швидкості.

§ 219. Закон взаємозв'язку маси й енергії.

Зв'язок між імпульсом та енергією тіла

Зміна швидкості v в релятивістській механіці зумовлює зміну маси m , а отже, і повної енергії E , тобто між масою й енергією існує взаємозв'язок. Цей взаємозв'язок установив Ейнштейн:

$$E = mc^2,$$

або

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (22.16)$$

З (22.16) випливає, що будь-якій масі (рухомій m або тій, що перебуває в спокої, m_0) відповідає певне значення енергії. Якщо тіло перебуває в стані спокою, то його енергія спокою визначається співвідношенням

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (22.17)$$

Енергія спокою є внутрішньою енергією тіла.

Внутрішня енергія тіла складається з кінетичної енергії всіх частинок відносно центра мас, потенціальної енергії їх взаємодії і суми енергій спокою всіх частинок.

У релятивістській механіці закон збереження маси спокою не справджується.

Саме на цьому уявленні ґрунтується пояснення дефекту маси ядра (див. § 247) і ядерних реакцій. Дефект маси полягає в тому, що **сума мас спокою окремих складових частинок ядра атома більша від маси спокою самого ядра.**

У теорії відносності є правдивим закон збереження релятивістської маси й енергії:

зміна повної енергії тіла (або системи) ΔE супроводиться еквівалентною зміною її маси (Δm)

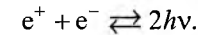
$$\Delta m = \Delta E / c^2, \quad \Delta E = \Delta m c^2. \quad (22.18)$$

Маса тіла, яка в нерелятивістській механіці виступає як міра інертності (перший закон Ньютона) або міра гравітації (закон всесвітнього тяжіння), в релятивістській механіці означає ще енерговміст тіла.

Фізичний зміст формули (22.18) такий:

існує принципова можливість переходу матеріальних об'єктів, які мають масу спокою, в електромагнітне випромінювання, що не має маси спокою, при цьому виконується закон збереження енергії.

Класичним прикладом цього є анігіляція електрон-позитронної пари і, навпаки, утворення пари електрон – позитрон із квантів електромагнітного випромінювання:



Кінетична енергія. Зв'язок імпульсу тіла з енергією

У релятивістській динаміці значення кінетичної енергії E_k визначається як різниця енергій E – рухомого тіла і E_0 – тіла, яке перебуває в спокої:

$$E_k = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) m_0 c^2. \quad (22.19)$$

При $v \ll c$ рівняння (19.19) переходить у класичний вираз

$$E_k = m_0 v^2 / 2.$$

Раніше було показано, що імпульс (22.15) і енергія (22.16) будь-якого тіла залежать від швидкості його руху. Знайдемо співвідношення, яке пов'язує імпульс тіла з енергією, для цього піднесемо до квадрата рівність (22.16):

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^4}{1 - v^2/c^2}, \text{ або } E^2 = m_0^2 c^4 + \frac{E^2 v^2}{c^2}.$$

Підставивши в праву частину рівняння $E = mc^2$, дістанемо $E^2 = m_0^2 c^4 + c^2 (mv)^2$. Урахувавши, що $p = mv$, маємо $E^2 = m_0^2 c^4 + c^2 p^2$ і остаточно

$$m_0^2 c^4 = E^2 - c^2 p^2. \quad (22.20)$$

Вираз $(E^2 - c^2 p^2)$ інваріантний: у всіх системах відліку його значення однакове і дорівнює E_0^2 .

Розглянемо випадок, коли маса спокою тіла (частинки) дорівнює нулю. При цьому

$$E^2 - c^2 p^2 = 0, \quad E = \pm cp. \quad (22.21)$$

З формули (22.21) випливає, що тіло, маючи масу спокою, яка дорівнює нулю, може мати відмінні від нуля енергію й імпульс тільки тоді, коли воно рухається із швидкістю світла. До таких частинок належать фотони. Отже,

твердження, що жодне тіло не може рухатись із швидкістю світла, застосовне тільки до тіл з масою спокою, яка відмінна від нуля.

На закінчення цієї глави слід зазначити, що майже через 80 років після створення теорії відносності немає ніяких експериментальних даних, які хоча б непрямо ставили цю теорію під сумнів, і, навпаки, висновки теорії відносності мають надійні дослідні підтвердження. Наприклад, рух заряджених частинок у прискорювачах визначають за рівняннями релятивістської динаміки. Успішна робота прискорювачів – доказ правдивості цих рівнянь. Робота атомних електростанцій – ілюстрація правильності твердження теорії відносності про існування енергії спокою. Співвідношення між масою і енергією є основним способом розрахунку енергії зв'язку атомних ядер і дає правильні результати.

Короткі висновки

- Спеціальна теорія відносності – це нове вчення про простір і час, яке змінило старі (класичні) уявлення.
- В основу теорії відносності покладено положення, за яким жодна енергія, жодний сигнал не може поширюватися із швидкістю, що перевищує швидкість світла у вакуумі, а швидкість світла у вакуумі стала і не залежить від напрямку поширення. Це положення формулюють у вигляді двох постулатів: принципу відносності та принципу сталості швидкості світла.

- Згідно з теорією відносності, одночасність подій, відстані і проміжки часу є не абсолютними, а відносними. Із спеціальної теорії відносності випливають два важливі наслідки. Вони визначають взаємозв'язок між масою і швидкістю, масою і енергією.
- Залежність маси рухомого тіла від швидкості руху

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

- Як у класичній механіці, так і в релятивістській маса – це міра інертності.
- Релятивістський імпульс тіла

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

- Зміна швидкості в релятивістській механіці спричинює зміну маси, а отже, і повної енергії:

$$E = mc^2, \text{ або } E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Якщо тіло перебуває в стані спокою, то його енергія

$$E_0 = m_0 c^2.$$

- Енергія спокою – це внутрішня енергія тіла.
- У теорії відносності є слушним закон збереження релятивістської маси й енергії: зміна повної енергії тіла (або системи) супроводиться еквівалентною зміною його маси:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

Фізичне значення цього співвідношення таке: існує принципова можливість переходу матеріальних об'єктів, що мають масу спокою, в електромагнітне випромінювання, яке не має маси спокою, при цьому виконується закон збереження енергії. Класичним прикладом цього є анігіляція електрон-позитронної пари і, навпаки, утворення пари електрон-позитрон із квантів електромагнітного випромінювання. Це співвідношення – найважливіше для ядерної фізики і фізики елементарних частинок.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що називають системою відліку? 2. Які системи відліку називають інерціальними? 3. Чим відрізняється принцип відносності Галілея від принципу відносності Ейнштейна? 4. З перетворень Галілея виведіть класичний закон додавання швидкостей. 5. Напишіть релятивістський закон додавання швидкостей. 6. Як ви розумієте відносність одночасності подій? відстані і проміжків часу? 7. Як маса рухомого тіла залежить від швидкості? 8. За якою формулою визначають релятивістський імпульс тіла? 9. Що таке енергія спокою? 10. Сформулюйте закон збереження релятивістської маси й енергії.
-

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Іонізований атом, вилетівши з прискорювача із швидкістю $0,89 c$, випустив фотон у напрямі свого руху. Визначити швидкість фотона відносно прискорювача.

Дано: $u' = 0,89 c$.

Знайти: u .

Розв'язання. Запишемо формулу (22.12) релятивістського закону додавання швидкостей:

$$u = \frac{u' + v}{1 + (u'v)/c^2}.$$

Тут $v = c$ – швидкість фотона. З урахуванням того, що $u' = 0,89 c$, дістанемо

$$u = \frac{0,89 c + c}{1 + (0,89 c \cdot c)/c^2} = c.$$

Швидкість фотона у власній системі координат і відносно прискорювача однакова і дорівнює швидкості світла.

Задача 2. Протон рухається із швидкістю $0,7 c$. Знайти його імпульс і кінетичну енергію.

Дано: $m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг; $v = 0,7 c$; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Знайти: p , E_k .

Розв'язання. Запишемо вираз (22.15) для релятивістського імпульсу і врахуємо, що $v = 0,7 c$. Дістанемо

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m_0 \cdot 0,7 c}{\sqrt{1 - 0,7^2}}.$$

Аналогічно за формулою (19.19) обчислимо кінетичну енергію протона:

$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

Обчислення:

$$E_k = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 0,7^2}} - 1 \right) = 0,6 \cdot 10^{-10} \text{ Дж},$$

$$p = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 0,7 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{\sqrt{1 - 0,7^2}} = 4,91 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. З якою швидкістю має рухатися стрижень, щоб його розміри в напрямі руху скоротилися у три рази? Чому дорівнює відносне скорочення довжини стрижня?

2. Космічна ракета рухається з великою швидкістю відносно Землі. Релятивістське скорочення довжини при цьому дорівнює 36 %. Визначити, якої швидкості досягла ракета.

3. Час життя π -мезона в системі координат, пов'язаній з ним, дорівнює $2,6 \cdot 10^{-8}$ с. Чому дорівнює час життя π -мезона для спостерігача, відносно якого π -мезон рухається із швидкістю $0,99 c$?

4. Обчислити швидкість, повну і кінетичну енергії протона в той момент, коли його маса дорівнює масі спокою α -частинки?

5. Яку кінетичну енергію має електрон, рухаючись із швидкістю $2,9 \cdot 10^8$ м/с?

6. У скільки разів маса рухомого нейтрона більша за масу рухомого електрона, якщо їх швидкості відповідно дорівнюють $0,85$ і $0,95 c$? Чому дорівнюють їх кінетичні енергії?

7. Знайти імпульс, повну і кінетичну енергії електрона, який рухається із швидкістю $0,7 c$.

8. Протон проходить електричне поле з прискорюючою різницею потенціалів $9,5 \cdot 10^5$ В. Чому дорівнюють його скінченна швидкість, повна і кінетична енергії?

9. На скільки процентів збільшиться маса електрона після проходження ним у прискорюючому електричному полі різниці потенціалів в $1,55$ МВ?

10. Електрон рухається із швидкістю, яка дорівнює $0,97 c$. Назустріч йому із швидкістю $0,5 c$ рухається протон. Визначити швидкість їх відносного руху. У скільки разів відрізняється їх кінетична енергія?

РОЗДІЛ 7 ЕЛЕМЕНТИ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ

Електромагнітному випромінюванню притаманні як хвильові, так і квантові властивості. Чим більша довжина хвилі випромінювання, тим більше воно проявляє хвильові властивості. Чим менша довжина хвилі, тим чіткіше проявляються квантові властивості випромінювання. Зв'язок між хвильовими і корпускулярними властивостями електромагнітного випромінювання визначається формулою Планка $\varepsilon = h\nu$, або $\varepsilon = hc/\lambda$. Такі явища, як теплове випромінювання, фотоелектричний ефект, можна зрозуміти, виходячи лише з квантової теорії випромінювання і поглинання електромагнітного випромінювання.

Новий етап у розвитку фізики пов'язаний з відкриттям у 1887 р. електрона. Було з'ясовано, що атоми не є елементарними; вони – складні системи, до яких входять електрони.

Вирішальну роль для розуміння структури атома відіграли досліди Резерфорда з розсіяння α -частинок. Ці досліди – фундаментальні не тільки для атомної, а й для ядерної фізики.

За порівняно короткий строк питання атомної і ядерної фізики з теоретичних і експериментальних стали практичними і промисловими. На їх основі створено атомну, рентгенівську, радіоспектроскопію, квантові генератори, атомні реактори, побудовано електростанції і кораблі.

Одночасно з фізикою атомного ядра почала швидко розвиватися фізика елементарних частинок. Перші успіхи в цій галузі пов'язані з випромінюванням космічного проміння. Було відкрито велику кількість елементарних частинок. Встановлено їх універсальну взаємоперетворюваність.

ГЛАВА 23 КВАНТОВА ОПТИКА

§ 220. Теплове випромінювання, його характеристики. Закон Кірхгофа

Теплове випромінювання

Найбільш поширеним у природі видом електромагнітного випромінювання є теплове випромінювання.

Теплове випромінювання відбувається завдяки внутрішній енергії речовини і тому властиве всім тілам при будь-якій температурі, відмінній від 0 К.

Теплове випромінювання веде до зменшення внутрішньої енергії тіла і, отже, до зниження температури тіла, до охолодження. Щоб забезпечити можливість тривалого випромінювання енергії, необхідно поповнювати її зменшення. Але, випромінюючи, тіло саме поглинає частину енергії, випромінюваної іншими тілами. Поглинання енергії веде до збільшення внутрішньої енергії тіла і, отже, до підвищення температури. Постійне випромінювання і поглинання енергії тілами призводить до того, що в ізольованій термодинамічній системі кінець кінцем встановлюється така температура, при якій зменшення енергії тілом при випромінюванні компенсується її збільшенням при поглинанні, спектр енергії, яка випромінюється і поглинається, не змінюється з часом. Таке випромінювання називають *рівноважним*.

Стан термодинамічної системи, при якому її параметри не змінюються з часом, називають *термодинамічною рівновагою*. Для системи, яка перебуває в термодинамічній рівновазі, характерні такі властивості:

для теплового випромінювання стан термодинамічної рівноваги ізольованої системи встановлюється з часом; якщо система досягла термодинамічної рівноваги і зовнішні умови не змінюються, то система не може сама довільно вийти з цього стану.

Усі інші види випромінювань (їх об'єднують під загальною назвою люмінесценція) цієї властивості не мають. Наприклад, при хемілюмінесценції випромінювання виникає завдяки енергії, яка виділяється під час хімічних перетворень. Процес випромінювання при хемілюмінесценції триває доти, поки йде хімічна реакція. Теплова рівновага встановлюється тільки тоді, коли закінчиться хімічний процес, а з ним і хемілюмінесценція. Те саме буде при електро-, фото- і катодолюмінесценції. Отже,

з усіх видів випромінювання рівноважним може бути тільки теплове.

Воно залежить від температури тіла, оскільки є наслідком хаотичного теплового руху молекул і атомів.

Характеристики теплового випромінювання

Випромінювання характеризують його енергією W . Потік випромінювання Φ_e – це відношення енергії випромінювання до часу t , за який воно відбулося:

$$\Phi_e = W / t.$$

Відношення потоку випромінювання, яке випускає тіло, до площі S поверхні випромінювача називають енергетичною світністю тіла:

$$R_e = \Phi_e / S. \quad (23.1)$$

Одиниця енергетичної світності – ват на квадратний метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Наведені вище характеристики не враховують спектрального складу випромінювання. У загальному випадку тіло може випромінювати (поглинати) електромагнітні хвилі різних довжин хвиль і хвилі кожної довжини виносять (приносять) свою частку енергії. Ця частка енергії в разі випромінювання характеризується *спектральною густиною енергетичної світності* r_λ – відношенням енергетичної світності ΔR_e , що відповідає вузькій ділянці спектра, до ширини цієї ділянки $\Delta\lambda$:

$$r_\lambda = \Delta R_e / \Delta\lambda. \quad (23.2)$$

Вимірювання показують, що r_λ для даного тіла залежить як від довжини хвилі λ , поблизу якої взято інтервал $\Delta\lambda$, так і від температури T тіла.

Коефіцієнтом поглинання α називають величину, яка дорівнює відношенню потоку випромінювання Φ'_e , поглинутого даним тілом, до потоку випромінювання Φ_e , яке падає на це тіло:

$$\alpha = \Phi'_e / \Phi_e. \quad (23.3)$$

Коефіцієнт поглинання можна розглядати і для даного інтервалу довжин хвиль $\Delta\lambda$. При цьому

$$\alpha_\lambda = \Delta\Phi'_{e\lambda} / \Delta\Phi_{e\lambda}.$$

Закон Кірхгофа

Якщо система складається з кількох тіл, нагрітих до різних температур, то через деякий час температури зрівняються навіть тоді, коли не буде передаватись тепло конвекцією і теплопровідністю. Гарячі тіла, випромінюючи, передають холодним енергії більше, ніж одержують від них, так триває доти, поки настане рівноважний стан. У стані термодинамічної рівноваги тіл, які обмінюються енергією тільки через випромінювання і поглинання, відношення спектральної густини енергетичної світності до коефіцієнта поглинання є величиною сталою, яка не залежить від природи тіла. Для всіх тіл воно виражається однією і тією самою функцією від довжини хвилі λ і температури T :

$$\frac{r_{\lambda_1}}{\alpha_{\lambda_1}} = \frac{r_{\lambda_2}}{\alpha_{\lambda_2}} = f(T, \lambda). \quad (23.4)$$

Це співвідношення називають *законом Кірхгофа* (див. § 220). З нього випливає, що

тіло поглинає електромагнітні хвилі переважно в тому інтервалі, в якому само їх випромінює.

Тіло, яке при будь-якій температурі поглинає всю енергію електромагнітного випромінювання довільної довжини хвилі, що падає на нього, називають *чорним*. Для нього $\alpha_\lambda = 1$. До чорного тіла за своїми властивостями близькі сажа, чорний оксамит, платинова чорнь. Тіло, для якого $\alpha_\lambda < 1$, називають *сірим*.

Властивості чорного тіла добре відтворює тіло з невеликим отвором S у замкненій порожнині, стінки якої виготовлені з поглинаючого матеріалу (рис. 23.1). Промінь світла, який падає всередину цієї порожнини через отвір S , зазнає багаторазового відбивання. При кожному відбиванні стінки порожнини поглинають частину енергії. Тому інтенсивність променя світла, який виходить з отвору, в багато разів менша від інтенсивності променя, що входив. Чим більше відношення площі порожнини до площі отвору, тим ближче таке тіло до чорного.

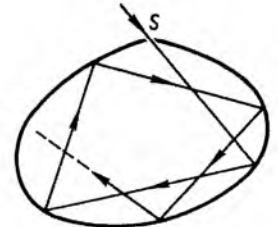


Рис. 23.1

§ 221. Закон Стефана – Больцмана. Закон Віна

Експериментальні криві розподілу енергії у спектрі випромінювання чорного тіла, тобто залежність спектральної густини енергетичної світності r_λ чорного тіла від довжини хвилі λ при сталій температурі T , зображені на рис. 23.2. З рисунка видно, що

спектр випромінювання чорного тіла суцільний, тобто в спектрі зображений неперервний ряд довжин хвиль.

З підвищенням температури зростає випромінювальна здатність чорного тіла. Кількісно це виражається *законом Стефана – Больцмана*:

енергетична світність R_e чорного тіла пропорційна четвертому степеню температури T :

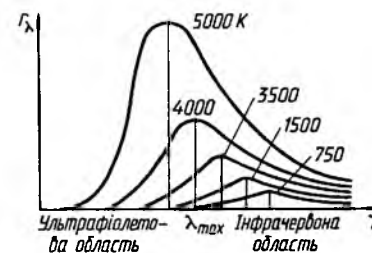


Рис. 23.2

$$R_e = \sigma T^4, \quad (23.5)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – стала Стефана – Больцмана.

Розподіл енергії у спектрі випромінювання чорного тіла залежить від довжини хвилі.

Із збільшенням довжини хвилі λ зростає, досягаючи чітко вираженого максимуму при деякій довжині хвилі λ_{max} , а потім зменшується.

З підвищенням температури максимум випромінювання зміщується в бік коротших хвиль.

Зменшення λ у бік коротших хвиль виражене різкіше, ніж у бік довших.

Довжина хвилі λ_{max} обернено пропорційна температурі чорного тіла:

$$\lambda_{\text{max}} = C' / T. \quad (23.6)$$

Формула (23.6) виражає закон зміщення Віна. У ній $C' = 2,898 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – стала Віна.

Закони Стефана – Больцмана і Віна є емпіричними. Численні спроби теоретично встановити закон випромінювання чорного тіла тривалий час вели до результатів, які узгоджувалися з дослідом тільки в обмеженому інтервалі температур і довжин хвиль. Це пояснювалось тим, що в основу цих спроб було покладено уявлення електродинаміки і термодинаміки, за якими тіло випромінює і поглинає енергію безперервно. Проте ці уявлення були неточними.

§ 222. Люмінесценція

Люмінесценція (або, як її іноді не зовсім правильно називають, холодне світіння тіл) полягає в тому, що під дією світла деякі тверді, рідкі або газоподібні речовини випромінюють характерне для них випромінювання, яке називають *випромінюванням люмінесценції*. При люмінесценції світло, яке падає, поглинається, а потім випромінюється світло люмінесценції, склад якого відрізняється від поглинутого. Деякі види фотолюмінесценції були відомі давно: наприклад, *флуоресценція* – короткочасне світіння, яке припиняється майже відразу після припинення опромінення тіла, і *фосфоресценція* – світіння, яке триває ще деякий час після опромінювання. Проте наукового означення самого поняття люмінесценції не було, тому не можна було відповісти на питання про те, що таке люмінесценція, які її основні ознаки і чим вона відрізняється від інших видів випромінювання. Тривалі пошуки законів люмінесценції спричинювали лише встановлення деяких емпіричних правил, які не охоплювали всіх основних дослідних фактів і допускали значні винятки. Прикладом

такого правила є закон Стокса, за яким довжина хвилі випромінювання люмінесценції має бути більшою від довжини хвилі збуджуючого світла.

Оскільки енергія випромінювання пропорційна його частоті ν (і обернено пропорційна довжині хвилі λ), то збільшення довжини хвилі при люмінесценції свідчить про те, що деяка частина енергії, поглинутої люмінесцентною речовиною, залишається в ній, перетворюючись у тепло. Але цей «закон» часто порушується на досліді.

Справжні закони спектрального перетворення світла відкрив С. І. Вавилов внаслідок тривалого експериментального і теоретичного дослідження енергетики люмінесцентних процесів. Вони є теоретичною основою не тільки науки про люмінесценцію, а й для її технічних застосувань.

Тепер люмінесценцією називають випромінювання, надлишкове над тепловим випромінюванням тіла при даній температурі, тривалість якого значно перевищує період світлових хвиль ($\approx 10^{-15} \text{ с}$).

С. І. Вавилов перший запропонував використати потужне ультрафіолетове випромінювання ртутних ламп для добування видимого світла за допомогою люмінесцентних речовин. Ідучи цим шляхом, він створив люмінесцентні лампи денного світла. Звичайна електрична лампа, запалена вдень, має червоно-жовте світло. Ввечері ця лампа дуже спотворює кольори тіл, які нас оточують. Сині кольори здаються чорними, зелені стають тьмяними і брудними, а оранжеві і червоні тони здаються дуже яскравими. В люмінесцентних лампах для перетворення випромінювання ртуті у видиме світло на внутрішню стінку газорозрядної трубки, заповненої парою ртуті при низькому тиску, наносять шар кристалічного люмінесцентного порошку. Застосовуючи різні порошки, можна дістати світло будь-якого кольору. Найбільший практичний інтерес мають порошки, світіння яких наближається до денного розсіяного світла. Коефіцієнт корисної дії і строк служби таких ламп значно довший від звичайних.

Люмінесцентні лампи дуже поширені. Ними освітлюють цехи заводів і фабрик і заводів. Вони створюють чудові умови для освітлення музеїв і картинних галерей; завдяки повній вибухонебезпечності щодо рудникових газів їх успішно застосовують у шахтах. Ними освітлено станції Московського метрополітену, магазини, установи тощо.

§ 223. Квантова гіпотеза Планка. Фотони

У 1900 р. німецький фізик М. Планк припустив, що **енергія випромінюється тілом не безперервно, як це припускалось у класичній фізиці, а окремими дискретними порціями – квантами, енергія ϵ яких пропорційна частоті ν коливань:**

$$\varepsilon = h\nu. \quad (23.7)$$

Тут $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – стала Планка, або квант дії.

Будь-яке тіло складається з безлічі атомів. Кожний з атомів випромінює електромагнітні хвилі. За гіпотезою Планка,

енергія атома може змінюватися лише певними порціями – квантами, кратними деякій енергії, тобто набувати значень $\varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, \dots, n\varepsilon$.

Знаючи сталу Планка, можна знайти значення квантів енергії для коливань з різними частотами. Встановлено, що значення цих енергій дуже малі. Так, навіть для частоти 10^{10} Гц

$$h\nu = 6,66 \cdot 10^{-24} \text{ Дж},$$

так що з макроскопічної точки зору здається, що енергія коливань змінюється безперервно. Проте в мікросвіті, де доводиться мати справу з малими величинами, ці енергії досить помітні.

Виходячи з запропонованої гіпотези, Планк побудував нову теорію теплової рівноваги і запропонував формулу, яка правильно описує спектр випромінювання абсолютно чорного тіла. Розгляд цієї формули виходить за межі нашого курсу.

Фундаментальність гіпотези Планка була підтверджена тим, що знайдені раніше емпіричні закони випромінювання абсолютно чорного тіла можна вивести з формули Планка. До цих законів належать закон Стефана – Больцмана і закон Віна.

ФОТОНИ

Розвиток гіпотези Планка спричинив створення уявлень про квантові властивості світла. Кванти світла дістали назву *фотонів*. Згідно з законом пропорційності маси й енергії і гіпотезою Планка, енергію фотона визначають за формулами

$$\varepsilon = mc^2, \quad \varepsilon = h\nu.$$

Прирівнявши праві частини цих рівнянь, дістанемо вираз для маси фотона

$$m = h\nu / c^2, \quad (23.8)$$

або з урахуванням, що $c = \lambda\nu$,

$$m = \frac{h}{c\lambda}.$$

Імпульс фотона – це добуток його маси на швидкість:

$$p = mc. \quad (23.9)$$

Підставивши значення m з (23.8), дістанемо $p = h\nu / c$, або

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (23.10)$$

Маса спокою фотона дорівнює нулю.

Квант електромагнітного випромінювання існує тільки поширюючись із швидкістю світла, маючи при цьому кінцеві значення енергії й імпульсу.

У монохроматичному світлі з частотою ν всі фотони мають однакові енергію, імпульс і масу.

§ 224. Зовнішній фотоелектричний ефект

Планківська теорія випромінювання абсолютно чорного тіла і вивчення фотоелектричного ефекту були основою для створення квантової теорії світла.

Фотоелектричний ефект – виривання електронів з атомів або молекул речовини під дією світла – вперше встановив у 1887 р. Г. Герц.

Якщо електрони, вибиті світлом, вилітають за межі речовини, фотоефект називається зовнішнім. Зовнішній фотоефект буває переважно у металу. Якщо відірвані від своїх атомів або молекул електрони залишаються всередині освітлюваної речовини вільними, то фотоефект називають внутрішнім. Внутрішній фотоефект властивий деяким напівпровідникам і меншою мірою – діелектрикам. Явище зовнішнього фотоефекту вперше дослідив О. Г. Столетов у 1890 р. Явище внутрішнього фотоефекту було досліджене акад. А. Йоффе у 1908 р.

Схему дослідів Столетова при вивченні зовнішнього фотоефекту зображено на рис. 23.3. У вакуумній трубці розміщують досліджувану пластинку K , яка буде катодом, і допоміжний електрод A , що буде анодом. Електроди K і A через потенціометр P приєднано до джерела напруги. Напругу між електродами (анодна напруга) вимірюють вольтметром V , струм у колі – гальванометром G .

Якщо пластинку K не освітлювати, струму в колі не буде, бо вакуумний проміжок між катодом і анодом струму не проводить. Якщо досліджувану пластинку освітлити через вікно C , то світло виб'є з пластинки електрони (їх назива-

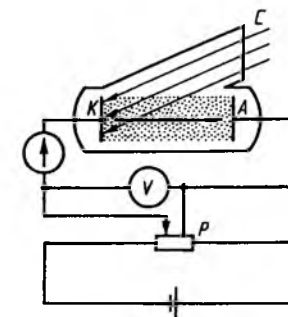


Рис. 23.3

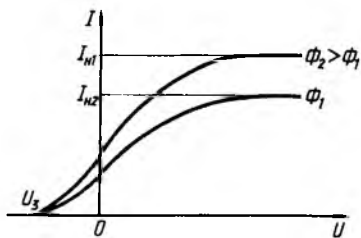


Рис. 23.4

ють *фотоелектронами*). Під дією електричного поля фотоелектрони рухаються до анода A , замикаючи коло. Гальванометр показує наявність струму (його називають *фотострумом*). За допомогою потенціометра P можна змінювати значення і знак анодної напруги. Треба мати на увазі, що струм у колі виникає і тоді, коли анодна напруга дорівнює нулю, і

навіть при невеликій затримуючій негативній напрузі. Пояснюється це тим, що фотоелектрони, які вилітають з катода, мають кінетичну енергію, завдяки якій виконується робота проти сил затримуючого поля.

На рис. 23.4 подано залежність сили фотоструму від анодної напруги при сталому світловому потоці.

При певній різниці потенціалів між електродами всі вирвані з катода електрони досягнуть анода, через гальванометр проходить струм, який визначається кількістю електронів, які вириваються світлом з поверхні катода за одиницю часу. Цей струм називають *струмом насичення* I_n . Якщо поле гальмує електрони, то при деякому значенні U_3 електрони перестають вилітати з катода. За значенням U_3 можна визначити швидкість електронів, які вилітають.

Нехай v – швидкість електрона, який вилетів, m і e – його маса і заряд. Кінетична енергія цього електрона дорівнює $mv^2/2$. Електрон може пролетіти крізь гальмуюче поле, різниця потенціалів якого дорівнює U , якщо $eU \leq mv^2/2$. Визначивши U_3 з умови $mv^2/2 = eU_3$, знайдемо швидкість цих електронів:

$$v = \sqrt{\frac{2eU_3}{m}}. \quad (23.11)$$

Закони Столетова

Внаслідок численних старанно поставлених дослідів Столетов установив такі *закони фотоефекту*.

1. Сила фотоструму насичення I_n , який виникає при освітленні монохроматичним світлом, пропорційна світловому потоку, що падає на катод:

$$I_n = k\Phi_e. \quad (23.12)$$

Коефіцієнт пропорційності k , який відповідає силі фотоструму (в мікроамперах) при освітленні катода світловим потоком в 1 лм, називають

фоточутливістю освітлюваної пластинки. Його вимірюють у мікроамперах на люмен (мкА/лм).

2. Швидкість фотоелектронів збільшується із зростанням частоти (із зменшенням довжини хвилі) падаючого світла і не залежить від інтенсивності світлового потоку.

3. Незалежно від інтенсивності світлового потоку фотоефект починається тільки при певній для даного металу мінімальній частоті (максимальній довжині хвилі) світла, що називається червоною межею фотоефекту.

Хвильова теорія світла спроможна пояснити лише перший із цих законів. За цією теорією, світло, яке є електромагнітними хвилями, надає електронам, розміщеним поблизу поверхні металу, коливаючого руху з амплітудою, яка залежить від напруженості поля, а отже, від інтенсивності падаючого світла. Внаслідок цього електрон набуває кінетичної енергії, достатньої для подолання сили притягання позитивних іонів і вилітання його з металу. Чим більша інтенсивність падаючого світла, тим більша кількість електронів може одержати енергію, достатню для вилітання з металу, і тим більший буде фотострум насичення. Це пояснює перший закон фотоефекту. Але з цього міркування випливає, що кінетична енергія вилітних електронів також має бути пропорційна інтенсивності світла, яке падає на пластинку, а це суперечить другому закону. Точно так само незрозумілим з точки зору хвильової теорії є й існування червоної межі фотоефекту.

Рівняння Ейнштейна

Щоб пояснити ці загадкові закономірності фотоефекту, Ейнштейн використав гіпотезу Планка, за якою електромагнітне випромінювання – це не неперервна хвиля, а потік окремих частинок – квантів.

Ейнштейн припустив, що явище фотоелектричного ефекту є підтвердженням дискретності світла. Адже коли дискретність природи світла проявляється при його випромінюванні, то вона має зберігатися й тоді, коли випромінювання поширюється в просторі, і при поглинанні.

Ейнштейн показав, що будь-яке монохроматичне випромінювання є сукупністю квантів, енергія яких пропорційна частоті. Коефіцієнтом пропорційності є стала Планка. Це припущення дало можливість пояснити закони фотоефекту. Енергія кванта $h\nu$, що падає на речовину, витрачається на роботу A виривання електрона з речовини і на надання електрону кінетичної енергії $mv^2/2$. Електрон, що міститься всередині речовини, поглинувши квант світла, або покине речовину, або залишиться всередині неї. Це залежить від того, що більше: енергія поглинутого кванта світла

чи робота виходу електрона. Якщо енергія поглинутого кванта більша від роботи виходу, то кінетична енергія фотоелектрона дорівнює різниці енергії поглинутого кванта світла і роботи виходу ($mv^2/2 = hv - A$):

$$hv = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (23.13)$$

Вираз (23.13) називається *рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоелефекту*.

Рівняння Ейнштейна є окремим випадком закону збереження і перетворення енергії в застосуванні до явища фотоелефекту.

Робота виходу електрона з металу залежить від природи речовини.

Для деяких металів її обчислено і зведено в довідкові таблиці.

Із зменшенням частоти падаючого світла (збільшенням довжини хвилі) енергія падаючих квантів (фотонів) при деякій частоті ν_k (або довжині хвилі λ_k) може дорівнювати роботі виходу, тобто $h\nu_k = A$, або $hc/\lambda_k = A$, звідки

$$\nu_k = \frac{A}{h}, \text{ або } \lambda_k = \frac{hc}{A}. \quad (23.14)$$

Гранична довжина хвилі λ_k падаючого світла, при якому виникає фотоелефект, називається *червоною межею фотоелефекту*.

На основі дослідів з фотоелефекту, які виконували з дедалі більшою точністю, було встановлено:

електрон одночасно може одержати енергію не від одного фотона, а від кількох.

Такий фотоелектричний ефект дістав назву *багатофотонного*. Рівняння Ейнштейна для багатофотонного фотоелефекту

$$Nh\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (23.15)$$

де N – число фотонів, які передають енергію одному електрону.

При багатофотонному фотоелефекті червона межа зміщується в бік довгих хвиль.

§ 225. Внутрішній фотоелефект

Внутрішній фотоелефект у кристалічних напівпровідниках і деяких діелектриках полягає в тому, що під дією світла електропровідність цих речовин збільшується завдяки зростанню в них кількості вільних носіїв струму – електронів провідності і дірок. Докладно механізм утворення енергетичних рівнів і зон описано в гл. 15.

Тут ми зазначимо, що енергетична зона не має ніяких просторових розмірів, а є поняттям, яке відображає той факт, що будь-який електрон кристала може мати енергії, які лежать у певних границях. Цими границями є верхня і нижня межі зони. У фразі “ширина забороненої зони” під словом “ширина” треба розуміти лише те, що значення енергії електрона, який перебуває на даному рівні, відрізняється від енергії електрона, що перебуває на іншому рівні, на ΔE .

Ширина забороненої зони визначає енергію ΔE , яку треба додатково надати електрону, щоб перевести його із заповненої зони в зону провідності. Цю енергію називають *енергією активації* і вимірюють в електрон-вольтах. Напівпровідник може проводити струм, якщо електрони із заповненої зони перейшли в зону провідності. Звідси явище внутрішнього фотоелефекту часто називають *фотопровідністю*.

Найближчі до ядра електрони міцно зв’язані з ядрами і не беруть участі в провідності. Електропровідність виникає лише завдяки валентним електронам зони провідності.

Механізм фотопровідності можна пояснити так. При освітленні поверхні напівпровідника фотон, поглинутий у напівпровіднику, віддає свою енергію валентним електронам. Якщо енергія фотона більша від ширини забороненої зони, то електрон переходить у зону провідності і стає електроном провідності, а в заповненій зоні утворюється дірка (див. § 137). Утворена дірка може бути заповнена одним з найближчих сусідніх електронів, але тоді звільниться місце, яке щойно займав електрон, тобто виникне нова дірка, і т. д. У цьому процесі електрон переміщатиметься проти напряму електричного поля, а вільне місце, що заповнюється електронами, – дірка – переміщується їм назустріч, у напрямі поля. В електричних і магнітних полях дірка поводить себе аналогічно позитивному заряду, величина якого дорівнює заряду електрона. Отже, один поглинутий фотон вивільняє пару електрон – дірка, при освітленні провідника збільшується кількість носіїв струму, збільшується струм при незмінній напрузі, що еквівалентно зменшенню опору.

При освітленні світлом, для якого $h\nu < \Delta E$, фотоелефект не виникає.

§ 226. Типи фотоелементів

Фотоелементи із зовнішнім фотоелефектом

У техніці великого поширення набули фотоелементи – прилади, дія яких ґрунтується на використанні фотоелефекту. До них належать вакуумні фотоелементи, які практично не мають інерційності, і газонаповнені фотоелементи, що мають більшу інерційність, але й більшу чутливість.

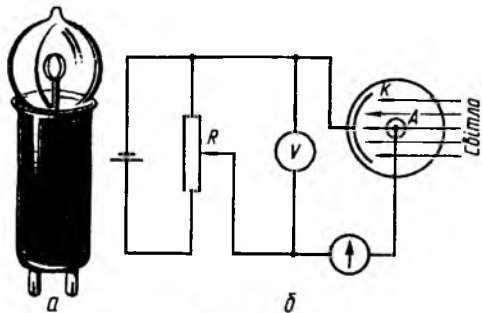


Рис. 23.5

На рис. 23.5, *a* і *б* показано зовнішній вигляд і схему фотоелемента, який складається із скляної або кварцової колби, частину внутрішньої поверхні якої покрито шаром світлочутливого металу *K*. За світлочутливий шар, як правило, беруть лужні метали, що мають невелику роботу виходу. Повітря з колби старанно видаляють.

Усередині колби є металеве кільце (або сітка) *A*. Як від світлочутливого шару, так і від кільця назовні зроблено виводи, за допомогою яких фотоелемент приєднують до батареї так, щоб металевий шар був катодом, а кільце – анодом. У коло ввімкнено також гальванометр для вимірювання струму. Світло, надходячи на катод, вибиває з нього електрони, які летять до анода. По колу йде фотострум, який виявляє гальванометр. Сучасні фотоелементи реагують не тільки на видиме світло, а навіть на інфрачервоні промені.

Чутливість вакуумних фотоелементів невелика (не перевищує кількох десятків мікроампер на люмен), тобто струм у колі вакуумного фотоелемента невеликий. Для підсилення струму (підвищення чутливості) у колбу вводять розріджений газ. У газонаповнених фотоелементах електрони, які вибиваються світлом з катода, при достатніх напругах між катодом і анодом набувають такої швидкості, що можуть іонізувати частинки газу, який наповнює фотоелемент; виникає ударна іонізація. Утворені при цьому іони, в свою чергу, починають рухатись і іонізують нейтральні частинки газу; внаслідок цього до анода прямує лавина електронів, яка дедалі зростає, фотострум значно збільшується, чутливість фотоелемента зростає.

Основне технічне застосування фотоелементів – у фототелеграфії (передавання зображення на відстань по проводах), у телебаченні і в звуковому кіно*. Крім того, фотоелементи широко застосовують у фотореле, за допомогою яких автоматично приводять у дію найрізноманітніші механізми. У фотореле використано безінерційність фотоелемента, тобто здатність фотоелемента практично миттю реагувати на світлову дію або її зміну. Фотореле може працювати, коли на елемент потрапляє світло, або коли освітлення фотоелемента припиняється.

* У звуковому кіно фотоелементи застосовують для відтворення звуку, записаного на кінострічку у вигляді "звукової доріжки". У телебаченні в процесі передавання зображень на відстань у передавальному пристрої – іконоскопі – світлові сигнали перетворюються в електричні, для цього поверхню іконоскопа покривають великою кількістю мікрофотоелементів. Світлові сигнали, перетворені в електричні, передаються у вигляді електромагнітних хвиль. Ці сигнали приймає антена телевізора, і в електронно-променевої трубі – кінескопі – вони перетворюються у світлові.

Фотореле мають різне застосування. Фотореле можуть у потрібний час вмикати і вимикати вуличні ліхтарі в містах, світло маяків і бакенів, сортувати різні деталі за кольором і формою, пускати або спиняти електродвигуни, верстати тощо.

Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом

До них належать фотоопори і вентиляльні фотоелементи. Фотоелементи з внутрішнім фотоелементом мають значно більшу інерційність порівняно з фотоелементами, які ґрунтуються на зовнішньому фотоелементі.

Фотоопорами називають напівпровідникові прилади, опір яких залежить від інтенсивності світла, яке падає на них. Принцип дії фотоопору такий. У затемненому напівпровіднику при деякій температурі є певна кількість вільних електронів. Ці електрони зумовлюють звичайну (темнову) провідність напівпровідника. Якщо до затемненого фотоопору прикласти напругу, то виникне *темновий струм* I_T , значення якого залежить від прикладеної напруги. В освітленому фотоопорі в шарі напівпровідника утворюються додаткові вільні електрони і дірки. У зв'язку з цим його провідність збільшується, струм I_C у колі (його називають *світловим*) також збільшується. Різницю між світловим і темновим струмами називають *фотострумом*: $I = I_C - I_T$. Фотоопори широко застосовують у звуковому кіно, телебаченні, автоматичці, телемеханіці, для сигналізації.

Іншим видом застосування внутрішнього фотоелемента в приладах є вентиляльні фотоелементи, тобто елементи із запірним шаром. Вентильний ефект виникає в тих напівпровідниках, в яких між металом і напівпровідником або між напівпровідниками *p*- і *n*-типу поблизу поверхні контакту створюється запірний шар, який має односторонню провідність (див. гл. 12). Внаслідок внутрішнього фотоелемента при освітленні рівноважний розподіл носіїв струму в зоні контакту порушується, змінюється порівняно з рівноважною контактна різниця потенціалів, тобто виникає фотоелектрорушійна сила, яка пропорційна світловому потоку. На рис. 23.6 подано схему такого фотоелемента.

Металева пластинка *M*, яка є одним з електродів, і нанесений на неї тонкий шар напівпровідника *P* (селену), покритого тонкою прозорою плівкою золота або іншого металу, що є другим електродом, з'єднані зовнішнім колом, в яке ввімкнено гальванометр *G*. Якщо напівпровідниковий шар освітлити через другий електрод, то в

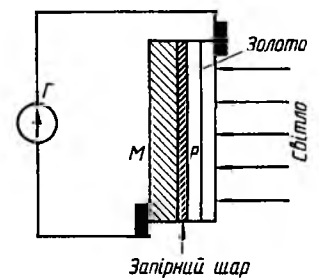


Рис. 23.6

шарі P внаслідок внутрішнього фотоелекту виникають вільні електрони. Вони рухаються хаотично, проте на межі металу з провідником через вентиляльний ефект утворюється ЕРС, тому в металі виникає надлишок електронів, у напівпровіднику – надлишок дірок. Якщо коло при цьому замкнене, по ньому проходить струм. Отже, вентиляльний фотоелемент є генератором струму, який безпосередньо перетворює світлову енергію в електричну. На такому самому принципі ґрунтується дія сонячних батарей, які з успіхом використовують на космічних кораблях. Вентиляльні фотоелементи мають перевагу перед вакуумними, оскільки працюють без джерела струму.

§ 227. Тиск світла

Досліди Лебедева

У 1901 р. П. М. Лебедев, проводячи старанні вимірювання, встановив, що світло, падаючи на яку-небудь поверхню, чинить на неї тиск, який залежить від світлового потоку і відбивної здатності поверхні цього тіла.

Пристрій, за допомогою якого П. М. Лебедев вимірював світловий тиск, складався з легкого каркаса із закріпленими на ньому тонкими “крильцями” – світлими і темними дисками завтовшки від 0,01 до 0,1 мм (рис. 23.7). Диски були розміщені симетрично відносно осі підвісу, навколо якої каркас міг повертатися. Світло, падаючи на “крильця”, чинило на світлі й темні диски різний тиск. Тому каркас, підвішений на тонкій скляній нитці, зазнавав обертального моменту, який закручував нитку. Тиск світла визначали за кутом закручування нитки.

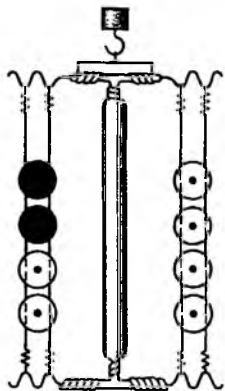


Рис. 23.7

Це явище можна пояснити як на основі хвильових уявлень про світло, так і з точки зору квантової теорії світла.

За електромагнітною теорією світла, тиск світла пояснюється виникненням механічних сил, які діють на електрони освітлюваного тіла з боку електричного і магнітного компонентів електромагнітного поля.

Згідно з обчисленнями, виконаними за електромагнітною теорією світла Максвелла, тиск, який чинить електромагнітна хвиля, що падає на поверхню, становить

$$p = \frac{E_e}{c}, \quad (23.16)$$

де $E_e = \Phi_e / S$ – енергетична освітленість поверхні; c – швидкість світла у вакуумі. З урахуванням того, що на поверхню діє і відбита хвиля (ρ – коефіцієнт відбивання),

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho). \quad (23.17)$$

Квантове пояснення тиску світла

Квантова теорія світла пояснює світловий тиск як результат передавання фотонами свого імпульсу атомам або молекулам речовини.

Нехай на поверхні площею S нормально до неї щосекунди падає N фотонів частоти ν . Кожний фотон має імпульс $h\nu/c$. Якщо ρ – коефіцієнт відбивання поверхні, то ρN фотонів відіб’ється від поверхні, а $(1 - \rho)N$ фотонів буде поглинуто.

Кожний поглинутий квант світла поверхні – імпульс $h\nu/c$, а кожний відбитий – імпульс $[(h\nu/c) - (-h\nu/c)] = 2h\nu/c$, оскільки при відбиванні напрям імпульсу фотона змінюється на протилежний, і імпульс, який передається ним частинкам речовини, становить $2h\nu/c$. Повний імпульс, який одержує поверхня тіла, дорівнюватиме

$$\frac{2h\nu}{c}\rho N + \frac{h\nu}{c}(1 - \rho)N = \frac{h\nu}{c}(1 + \rho)N. \quad (23.18)$$

Обчислимо світловий тиск. Для цього (23.18) поділимо на площу S “крильця”:

$$p = \frac{h\nu N}{cS}(1 + \rho). \quad (23.19)$$

Якщо врахувати, що $h\nu N / S = E_e$, то формула (23.19) набуде вигляду

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho). \quad (23.20)$$

Вирази (23.17) і (23.20), виведені в межах електромагнітної і квантової теорій, збігаються.

Експериментально слушність цих результатів була доведена дослідями П. М. Лебедева.

Тиск природного світла дуже малий. Якщо коефіцієнт поглинання поверхні близький до одиниці, то тиск сонячних променів на таку поверхню на Землі дорівнює приблизно $5 \cdot 10^{-6}$ Па (тобто $3,7 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.).

Цей тиск на десять порядків менший від атмосферного тиску біля поверхні Землі.

Виміряти такий малий тиск П. М. Лебедев зміг тільки внаслідок винахідливої винахідливості і майстерності постановки і проведення експерименту.

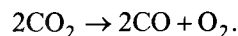
Світловий тиск не відіграє ніякої ролі в явищах, з якими ми стикаємось у житті. Але в космічних і мікроскопічних системах його значення істотне.

У мікросвіті тиск світла проявляється в світловій віддачі, якої зазнає збуджений атом при випромінюванні ним світла. Гравітаційне притягання зовнішніх шарів зоряної речовини до її центра зрівноважується силою, значний внесок у яку дає тиск світла, що йде з глибини зорі назовні.

§ 228. Хімічна дія світла

Внаслідок дії світла в деяких речовинах відбуваються хімічні перетворення – *фотохімічні реакції*. Фотохімічні перетворення дуже різноманітні. Під дією світла складні молекули можуть розкладатися на складові частини (наприклад, бромисте срібло – на срібло і бром) або, навпаки, можуть утворюватися складні молекули (наприклад, якщо освітити суміш хлору і водню, то реакція утворення хлористого водню відбувається так бурхливо, що супроводиться вибухом).

Багато фотохімічних реакцій відіграють велику роль у природі і техніці. Головна з них – *фотохімічний розклад вуглекислоти* під дією світла в зелених частинах рослин. Ця реакція має величезне значення, бо вона забезпечує кругообіг вуглецю, без якого неможливе тривале існування органічного життя на Землі. Внаслідок життєдіяльності тварин і рослин (дихання) вуглець неперервно окислюється (утворення CO_2). Зворотний процес відновлення вуглецю проходить під впливом світла в зелених частинах рослин. Ця реакція відбувається за схемою



Фотохімічна реакція розкладу бромистого срібла – в основі фотографії і всіх її наукових та технічних застосувань. Явище вицвітання фарб, що зводиться переважно до фотохімічного окислення цих фарб, має дуже велике значення для розуміння процесів, які відбуваються в оці людини і тварини і лежать в основі зорового сприйняття. Дуже багато фотохімічних реакцій тепер використовують у хімічному виробництві, і, отже, вони мають безпосереднє промислове значення.

§ 229. Поняття про корпускулярно-хвильову природу світла

Розглянуті вище явища теплового випромінювання і фотоелектричний ефект підтверджують достовірність гіпотези про дискретну природу світла. Але з позицій цієї гіпотези не можна пояснити такі явища, як, наприклад, інтерференція і дифракція світла, блискуче пояснені з точки зору електромагнітної (хвильової) теорії світла.

Фотонна гіпотеза не дає можливості створити послідовну корпускулярну теорію випромінювання: в основі цієї гіпотези лежить поняття кванта світла, основною характеристикою якого є його енергія ϵ , пов'язана з частотою ν . Частота є характеристикою неперервного періодичного процесу. Отже, частоту, яка визначає енергію кванта світла, запозичено з хвильової теорії.

Слід звернути увагу на таке. За класичним уявленням, енергія в матеріальній частинки має цілком певне значення. Але будь-яке випромінювання не може бути точно монохроматичним, тобто воно характеризується деякою шириною $\Delta\nu$ спектрального інтервалу. У цьому розумінні вираз $\epsilon = h\nu$ суперечливий. Справжній зміст цієї суперечності був розкритий при дальшому розвитку квантової механіки. Отже,

електромагнітне випромінювання – це складна форма матерії, яка має подвійну корпускулярно-хвильову природу (інакше це називають корпускулярно-хвильовим дуалізмом).

Дослідження останніх десятиліть показують, що корпускулярно-хвильовий дуалізм притаманний не тільки світлу, а й частинкам мікросвіту. Корпускулярно-хвильовий дуалізм – це прояв взаємозв'язку двох основних форм матерії: речовини і поля.

Короткі висновки

- Найбільш поширеним у природі видом електромагнітного випромінювання є теплове випромінювання. Теплове випромінювання відбувається завдяки внутрішній енергії речовини і тому властиве всім тілам при будь-якій температурі, відмінній від 0 К. Теплове випромінювання – рівноважне. Його спектр суцільний.
- Тіло, яке при будь-якій температурі поглинає всю енергію електромагнітного випромінювання, що падає на нього, довільної довжини хвилі називають чорним.
- Розподіл енергії в спектрі випромінювання чорного тіла залежить від довжини хвилі. Із збільшенням довжини хвилі спектральна густина енергетичної світності зростає, досягаючи чітко вираженого максимуму при деякій довжині хвилі λ_{max} , а потім спадає.

З підвищенням температури максимум випромінювання зміщується в бік коротших хвиль.

- Люмінесценцією називають випромінювання, яке є надлишком над тепловим випромінюванням тіла при певній температурі, тривалість якого значно перевищує період світлових хвиль ($\approx 10^{-15}$ с).

Люмінесценція має велике практичне застосування.

- У 1900 р. М. Планк для пояснення закономірностей теплового випромінювання запропонував нову теорію, за якою атоми випромінюють електромагнітне випромінювання точно певними порціями – квантами. Основна характеристика квантів – енергія

$$\varepsilon = h\nu.$$

Розвиток гіпотези Планка зумовив створення уявлення про квантові властивості світла. Кванти світла назвали фотонами. Фотони характеризуються енергією, масою, імпульсом:

$$\varepsilon = mc^2, \quad \varepsilon = h\nu, \quad m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad p = \frac{h\nu}{c}.$$

- Маса спокою фотона дорівнює нулю.
- У монохроматичному світлі всі фотони мають однакову енергію, імпульс і масу.
- Явище зовнішнього фотоелектричного ефекту виявив Г. Р. Герц, дослідив О. Г. Столетов, який встановив закони фотоелектричного ефекту. Пояснив явище зовнішнього фотоелектричного ефекту А. Ейнштейн. Він припустив, що електромагнітне випромінювання поглинається також окремими порціями. Енергія кванта, який падає на речовину, витрачається на роботу виривання електрона з речовини і надання електрону кінетичної енергії

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Фотоелектричний ефект поширений у техніці. Фотоелементи застосовують у різних автоматах, на явищі фотоелектричного ефекту основана будова сонячних батарей.

- Згідно з обчисленням, виконаним на основі електромагнітної теорії світла Максвелла, тиск, який чинить електромагнітна хвиля на поверхню, становить

$$p = \frac{E_{\text{е}}}{c}(1 + \rho).$$

Квантова теорія світла пояснює світловий тиск як результат передавання фотонами свого імпульсу атомам або молекулам.

Формули для обчислення тиску світла в межах електромагнітної і квантової теорій збігаються. Експериментально правдивість цих результатів довів на дослідах М. П. Лебедев.

- Під дією світла складні молекули можуть розкладатися на складові частини, тобто поглинання світла речовиною супроводиться хімічними реакціями. Багато фотохімічних реакцій мають велике значення у природі і техніці, головна з них – реакція фотосинтезу.
- Хвильові і квантові властивості світла не виключають, а взаємно доповнюють одні одних. Вони виражають справжні закономірності поширення світла і взаємодії його з речовиною. Електромагнітне випромінювання – складна форма матерії, яка має подвійну корпускулярно-хвильову природу.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Назвіть характеристики теплового випромінювання.
2. Сформулюйте закон Кірхгофа.
3. Яке тіло називають чорним?
4. Побудуйте і поясніть криву розподілу енергії у спектрі чорного тіла.
5. Що називають люмінесценцією?
6. Сформулюйте гіпотезу Планка.
7. Що таке квант? Чому дорівнює енергія кванта?
8. Чому дорівнює енергія, маса, імпульс фотона?
9. Що називають явищем зовнішнього фотоелектричного ефекту?
10. Сформулюйте закон Столетова.
11. Поясніть рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту.
12. Що таке червона межа фотоелектричного ефекту?
13. Який фотоелектричний ефект називають багатофотонним?
14. Який фотоелектричний ефект називають внутрішнім?
15. Які ви знаєте типи фотоелементів?
16. Обчисліть тиск світла на основі квантової теорії.
17. Що таке фотохімічні реакції?
18. Що таке корпускулярно-хвильовий дуалізм?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Яку потужність треба підводити до свинцевої кульки радіусом 4 см, щоб підтримувати її температуру 27 °С, якщо температура навколишнього середовища – 23 °С? Вважати, що тепло втрачається тільки внаслідок випромінювання. Поглинальна здатність свинцю дорівнює 0,6.

Дано: $r = 4$ см = 0,04 м; $T = (273 + 27) \text{ К} = 300 \text{ К}$; $T_0 = (273 - 23) \text{ К} = 250 \text{ К}$; $\rho = 0,6$.

Знайти: p .

Розв'язання. За законом Стефана – Больцмана, енергетична світність абсолютно чорного тіла $R_{\text{е}} = \sigma T^4$. З поверхні кулі $S = 4\pi r^2$ випромінюється тепловий потік $\Phi_{\text{е}} = S\sigma T^4$. Але оскільки випромінювання відбувається в середовищі з температурою T_0 , то куля одночасно й поглинає потік випромінювання $\Phi_0 = S\sigma T_0^4$. Результуючий потік випромінювання

$$\Phi_1 = \Phi_{\text{е}} - \Phi_0 = S\sigma(T^4 - T_0^4).$$

З урахуванням поглинальної здатності кулі

$$p = \Phi_1 \rho = S\rho\sigma(T^4 - T_0^4) = 4\pi r^2 \rho\sigma(T^4 - T_0^4).$$

Обчислення:

$$p = 4 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \times \\ \times \text{ К}^{-4} (300^4 \text{ К}^4 - 250^4 \text{ К}^4) \cdot 0,6 = 2,86 \text{ Вт}.$$

Задача 2. У скільки разів збільшиться потік випромінювання чорного тіла, якщо максимум енергії випромінювання пересунеться від червоної межі видимого спектра до його фіолетової межі?

Дано: $\lambda_{\text{ч}} = 0,76$ мкм; $\lambda_{\text{ф}} = 0,38$ мкм;

Знайти: $n = \Phi_{\text{эф}} / \Phi_{\text{еф}}$.

Розв'язання. Довжину хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання чорного тіла, визначимо із закону зміщення Віна:

$$\lambda_{\max} = c'/T. \quad (1)$$

За формулою (1) визначимо температури, які відповідають червоній ($T_{\text{ч}}$) і фіолетовій ($T_{\text{ф}}$) межах видимої області спектра:

$$T_{\text{ч}} = c'/\lambda_{\text{ч}}, \quad T_{\text{ф}} = c'/\lambda_{\text{ф}}.$$

Потік випромінювання чорного тіла

$$\Phi_{\text{е}} = R_{\text{е}}S,$$

де $R_{\text{е}}$ – енергетична світність чорного тіла; S – площа його поверхні. За законом Стефана – Больцмана, $R_{\text{е}} = \sigma T^4$. Отже,

$$\Phi_{\text{сч}} = \sigma T_{\text{ч}}^4 S, \quad \Phi_{\text{сф}} = \sigma T_{\text{ф}}^4 S,$$

$$n = \frac{\Phi_{\text{сф}}}{\Phi_{\text{сч}}} = \frac{\sigma S (c'/\lambda_{\text{ф}})^4}{\sigma S (c'/\lambda_{\text{ч}})^4} = \left(\frac{\lambda_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ф}}} \right)^4.$$

Обчислення:

$$n = \left(\frac{0,76 \text{ мкм}}{0,38 \text{ мкм}} \right)^4 = 2^4 = 16.$$

Задача 3. Визначити червонохвильову межу фотоелектру для натрію, якщо робота виходу електрона з фотокатода дорівнює 2,3 еВ.

Дано: $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; $A = 2,3$ еВ = $2,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Знайти: $\lambda_{\text{ч}}$.

Розв'язання. Запишемо рівняння для червоної межі фотоелектру і обчислимо з нього шукану довжину хвилі:

$$h\nu_{\text{ч}} = A, \text{ або } \frac{hc}{\lambda_{\text{ч}}} = A,$$

звідки

$$\lambda_{\text{ч}} = \frac{hc}{A}.$$

Обчислення:

$$\lambda_{\text{ч}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{3,68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Задача 4. Тиск монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 0,6$ мкм на чорну поверхню дорівнює 10^{-7} Н/м². Скільки фотонів падає щосекунди на 1 м² поверхні?

Дано: $\lambda = 0,6$ мкм = $0,6 \cdot 10^{-6}$ м; $p = 10^{-7}$ Н/м²; $S = 1$ м².

Знайти: n .

Розв'язання. Тиск світла визначається за формулою (23.17):

$$p = \frac{E_{\text{е}}}{c} (1 + \rho),$$

де $E_{\text{е}} = \Phi_{\text{е}} / S$ – енергетична освітленість поверхні. Потік випромінювання $\Phi_{\text{е}} = nh\nu$. Отже, $p = nh\nu / (cS) = nhc / (\lambda cS) = nh / (\lambda S)$. Звідси

$$n = \frac{p\lambda S}{h}.$$

Обчислення:

$$n = \frac{10^{-7} \cdot \text{Н/м}^2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 1 \text{ м}^2}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}} = 9,05 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. При якій температурі енергетична світність чорного тіла дорівнює 1 кВт/м²?
2. Температура абсолютно чорного тіла зменшилась на 1 %. На скільки процентів зменшилась енергетична світність тіла?
3. Поверхнева густина потоку випромінювання Сонця, що падає на площадку 1 м², яка перпендикулярна до сонячних променів і лежить за межами атмосфери, поблизу Землі дорівнює 1,35 кВт/м². Яка буде температура чорної пластинки, установленної за межами атмосфери поблизу Землі перпендикулярно до променів Сонця?
4. Стальна болванка при температурі 927 °С випромінює за секунду 8,2 Дж з кожного 1 см² поверхні. Визначити коефіцієнт поглинання цієї болванки.
5. Площа поверхні нитки розжарення 60-ватної вольфрамової лампи розжарювання 0,5 см². Коефіцієнт поглинання вольфраму 0,6. Визначити температуру нитки розжарення.
6. Вважаючи, що температура поверхні Сонця дорівнює 5800 К, визначити поверхневу густина потоку сонячного випромінювання, яке падає на площадку, встановлену перпендикулярно до сонячних променів поблизу Землі за межами земної атмосфери. Вважати, що Сонце – чорне тіло.
7. При нагріванні тіла довжина хвилі, на яку припадає максимум спектральної густини енергетичної світності, змінилась від 1,49 до 1,19 мкм. Як змінилась температура абсолютно чорного тіла?
8. Визначити енергію фотона: а) для червоного світла $\lambda = 600$ нм; б) для жорсткого рентгенівського проміння $\lambda = 0,01$ нм.
9. Знайти масу фотона: а) монохроматичного світла $\lambda = 0,5$ мкм; б) рентгенівського випромінювання $\lambda = 0,025$ нм; в) гамма-випромінювання $\lambda = 1,24 \cdot 10^{-3}$ нм.
10. Визначити довжину хвилі фотона, маса якого дорівнює масі електрона, що перебуває в спокої.
11. Червона межа для деякого металу 0,6 мкм. Метал освітлюється світлом, довжина хвилі якого 0,4 мкм. Визначити максимальну швидкість електронів, які вибиває світло з металу.

12. Вибиті світлом при фотоелекті електрони повністю затримуються зворотним потенціалом 4 В. Червона межа для металу 0,6 мкм. Визначити частоту падаючого світла.

13. До якого максимального потенціалу зарядиться пластинка, покрита цезієм, при дії на неї фіолетових променів з довжиною хвилі 0,4 мкм? Робота виходу електрона для цезію дорівнює 1,9 еВ.

14. Потік монохроматичних променів з довжиною хвилі 600 нм падає нормально на пластинку з коефіцієнтом відбивання 0,2. Скільки фотонів щосекунди падає на пластинку, якщо промені тиснуть на пластинку із силою 10^{-13} Н/м²?

15. Визначити тиск сонячних променів, які падають перпендикулярно на дзеркальну пластинку, встановлену поблизу Землі за межею земної атмосфери. Вважати, що температура Сонця дорівнює 5800 К.

ГЛАВА 24

БУДОВА АТОМА

§ 230. Розвиток поглядів на будову речовини

Гіпотеза про те, що всі речовини складаються з великої кількості атомів зародилась понад 2 тис. років тому. Прихильники атомістичної теорії розглядали атом як найдрібнішу неподільну частинку (від грец. “атомос” – неподільний) і вважали, що вся різноманітність світу є не що інше, як поєднання незмінних частинок – атомів.

Конкретні уявлення про будову атомів розвивалися з нагромодженням фізикою фактів про властивість речовини.

Велика роль у цій галузі фізичної науки належить Д. І. Менделєєву, який, відкривши періодичний закон, уперше на науковій основі поставив питання про єдину природу атомів. Він писав: “При всій видимій простоті справи нині ще не можна стверджувати яку-небудь гіпотезу, яка б достатньо пояснювала цей закон періодичності...”. Далі Д. І. Менделєєв зазначав, що атоми простих тіл – це складні речовини.

Відкриття, зроблені в другій половині XIX ст., змусили поступово взяти під сумнів слушність уявлення про атоми як неподільні частинки. Дуже важливим стало відкриття німецьких учених Г. Кірхгофа і Р. Бунзена. Вони встановили:

кожному хімічному елементу відповідає характерний, властивий лише цьому елементу, набір спектральних ліній у спектрах випромінювання і поглинання.

Це означало:

світло випромінюється і поглинається окремими атомами, а атом, у свою чергу, – це складна система, здатна взаємодіяти з електромагнітним полем.

Про це саме свідчило явище іонізації атомів, виявлене при дослідженнях електролізу і газового розряду. Це явище можна було пояснити, припустивши, що атом у процесі іонізації втрачає частину своїх зарядів і набуває нових. Відповідь на питання, що є носієм заряду, який втрачає або набуває атом у процесі іонізації, було дано наприкінці XIX ст. З’ясувалося, що таким носієм є електрон, який входить до складу атома, – негативно заряджена частинка з масою $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг і зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Спираючись на ці відкриття, англійський фізик Дж. Томсон у 1898 р. запропонував першу модель атома у вигляді позитивно зарядженої кульки радіусом порядку 10^{-10} м, в яку вкраплено окремі електрони, що нейтралізують позитивний заряд.

§ 231. Закономірності в атомних спектрах водню

Внутрішню будову атома вивчати безпосередньо не можна через його малі розміри ($\approx 10^{-10}$ м). Структура атома проявляється тільки безпосередньо в явищах, пов’язаних з його внутрішньою будовою. До таких явищ належить *випромінювання*. Тут ученим вдалося встановити загальні закономірності в характері спектрів і знайти ряд емпіричних законів, яким вони підпорядковані. Було доведено, що спектральні лінії всіх елементів можна розбити на ряд серій.

Структури відповідних серій, які належать до різних хімічних елементів, подібні між собою.

У межах однієї серії розміщення спектральних ліній має певний порядок. Найпростіший атом – атом водню.

У 1885 р. Й. Бальмеру вдалося знайти формулу, що описує розподіл спектральних ліній видимого спектра водню, які дістали назву *серії Бальмера*:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{n^2}{n^2 - 4}, \quad (24.1)$$

де λ_0 – деяка стала, а n для різних ліній серії набуває значення послідовного ряду цілих чисел, починаючи з трьох ($n = 3, 4, 5, \dots$). Формула (24.1) визначає довжину хвилі, що відповідає послідовним лініям серії Бальмера, як функцію цілого числа. Значення $\lambda_0 = 0,364613$ мкм було встановлене при порівнянні формули (23.1) з даними експериментів.

Частину спектра атома водню подано на рис. 23.1 (Символами $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$ позначено видимі лінії, H_∞ відповідає межі бальмерівської серії.)

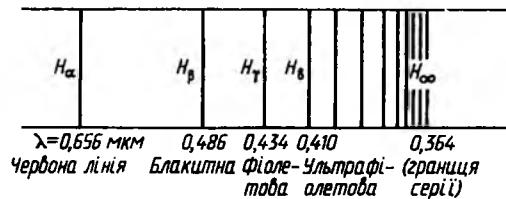


Рис. 24.1

Дослідження випромінювання в невидимій частині спектра показали, що існують серії, розміщені в інфрачервоній і ультрафіолетовій областях спектра, які дістали назву *серія Пашена*, *серія Лаймана*.

Формули, які визначають розміщення спектральних ліній у кожній з цих серій, аналогічні формулі для серії Бальмера. І звичайно узагальнену формулу Бальмера для всіх ліній спектра атома водню записують у вигляді

$$\frac{1}{\lambda} = R_1 \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right); \quad (24.2)$$

тут λ – довжина хвилі (величину λ^{-1} називають *хвильовим числом*); R_1 – стала, що дорівнює $1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$; i та n набувають цілком певних значень для кожної серії і кожної спектральної лінії.

Враховавши, що $\lambda = c/v$ і $1/\lambda = v/c$, формулу (23.2) можна записати у вигляді

$$v = R \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (24.3)$$

де $R = R_1 c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ – стала Рідберга.

При збільшенні n довжина хвилі зменшується, а частота ліній збільшується і досягає граничного значення (межі серії) R/i^2 при $n \rightarrow \infty$.

Аналогічні спектри мають не тільки водень, а, наприклад, і лужні метали. Розміщення спектральних ліній у них визначається формулою, аналогічною формулі Бальмера. Частота, що відповідає якій-небудь спектральній лінії цієї серії, є різницею двох величин, одна з яких залежить від номера серії (i) і стала для всіх ліній даної серії, а друга визначається номером лінії в цій серії (n). Вивчаючи спектри, В. Рітц встановив, що частота деякої спектральної лінії нерідко дорівнює сумі частот, які відповідають двом іншим лініям спектра. Для пояснення цієї закономірності він запропонував *комбінаційний* принцип, який є основою всієї сучасної спек-троскопії:

для кожного атома можна знайти послідовність чисел (які називають спектральними термами) таких, що частоти всіх спектральних

Характеристика серій

Серія	i	n
Лаймана	1	2, 3, 4, ...
Бальмера	2	3, 4, 5, ...
Пашена	3	4, 5, 6, ...

ліній цього атома можна записати у вигляді різниці двох яких-небудь спектральних термів:

$$v = T_1(i) - T_2(n). \quad (24.4)$$

Слушність цього принципу підтверджується численними експериментальними даними. Його обґрунтування пов'язане з будовою атома, з процесами, які відбуваються всередині атома при випромінюванні хвиль з частотою, що відповідає якій-небудь спектральній лінії.

§ 232. Ядерна модель атома. Досліди Резерфорда

Експериментально перевірів модель Томсона в 1911 р. англійський фізик Е. Резерфорд. Він використав для цієї мети потік швидких позитивно заряджених α -частинок, що випромінюються деякими так званими радіоактивними речовинами (наприклад, полонієм) і мають заряд $+2e$ і масу, що дорівнює $6,64 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Пропускаючи пучок α -частинок через тонку золоту фольгу, Резерфорд встановив, що деяка кількість частинок відхиляється на досить значний кут від початкового напрямку, а інші навіть відбиваються від фольги.

Спрощену схему дослідів Резерфорда зображено на рис. 24.2. Джерело α -частинок поміщали всередині свинцевої порожнини з вузьким каналом. Усі α -частинки, крім тих, що рухались вузьким каналом, поглиналися свинцем. Вузький пучок α -частинок падав на золоту фольгу перпендикулярно до її поверхні. За фольгою був розміщений рухомий екран, покритий флуоресціюючою речовиною; α -частинки, які пройшли крізь фольгу, спричинювали спалахи на екрані. Така установка у вакуумі давала можливість спостерігати α -частинки, розсіяні під кутом до 150° .

Цей результат не можна було пояснити в межах моделі Томсона, оскільки позитивний заряд атома, розподілений по всьому його об'єму, не міг так значно вплинути на масивні і швидкі α -частинки.

Узагальнивши результати дослідів, Резерфорд запропонував *ядерну (планетарну) модель будови атома*, в якій атом має вигляд мініатюрної Сонячної системи. За цюю моделлю, весь позитивний заряд і майже вся маса атома (99,4%) зосереджені

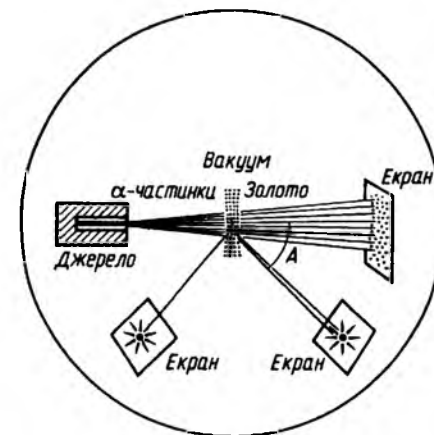


Рис. 24.2

в атомному ядрі. Розмір ядра ($\sim 10^{-15}$ м) дуже малий порівняно з розміром атома ($\sim 10^{-10}$ м). Навколо ядра по замкнених еліптичних орбітах, які в першому наближенні можна вважати коловими, рухаються електрони, утворюючи електронну оболонку атома. Заряд ядра дорівнює сумарному заряду електронів.

Проте запропонована Резерфордом модель будови атома не пояснила спектральних закономірностей і навіть суперечила законам класичної механіки й електродинаміки.

Справді, рух електрона по орбіті, як і всякий криволінійний рух, є рухом з прискоренням. За законами класичної електродинаміки, криволінійний рух має супроводитись випромінюванням світла відповідної частоти. Отже, в процесі руху електрона навколо ядра атом має безперервно випромінювати енергію. Але зменшення енергії призводить до зменшення радіуса орбіти електрона – електрон рухається по спіралі, наближаючись до ядра. А оскільки швидкість руху електрона не змінюється, то збільшується і колова частота його обертання і неперервно зростає частота випромінювання, тобто спектр випромінювання має бути суцільним. Неперервно наближаючись до ядра, електрон через малий час повинен упасти на ядро, тобто в моделі Резерфорда атом – нестійка система.

Насправді ж атоми – дуже стійкі системи і мають лінійчасті, а не суцільні спектри випромінювання.

§ 233. Теорія будови атома за Бором

Постулати Бора

Вихід з цього важкого стану запропонував у 1913 р. великий фізик ХХ ст. Н. Бор. Він увів ідеї квантової теорії в ядерну модель Резерфорда і розробив теорію атома водню, яка повністю підтвердилась експериментально.

В основі борівської теорії атома лежать *два основних положення – постулати*:

1. Електрони можуть рухатися в атомі тільки по певних орбітах, перебуваючи на яких вони, незважаючи на наявність у них прискорення, не випромінюють.

Ці орбіти відповідають стаціонарним станам електронів в атомі і визначаються умовою

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}, \quad (24.5)$$

де r_n – радіус n -ї орбіти; v_n – швидкість електрона на цій орбіті; m_e – маса електрона; $m_e v_n r_n$ – момент імпульсу електрона на цій орбіті; n – ціле число ($n \neq 0$).

2. Атом випромінює або поглинає квант електромагнітної енергії при переході електрона з одного стаціонарного стану в інший.

Енергія кванта дорівнює різниці енергій стаціонарних станів електрона до (E_2) і після (E_1) переходу:

$$h\nu = E_2 - E_1. \quad (24.6)$$

Розглянемо найпростіший атом – атом водню. Він складається з ядра, до складу якого входить один протон, і одного електрона, що обертається навколо ядра по коловій орбіті. На електрон з боку ядра діє кулонівська сила притягання, надаючи йому доцентрового прискорення. Тому

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ee}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}, \quad (24.7)$$

де e – заряд електрона і протона; ϵ_0 – електрична стала. Оскільки має виконуватись перший постулат Бора, скористаємось виразом (24.6). Визначимо з нього швидкість v_n , піднесемо до квадрата і підставимо в (24.7). Із знайденого виразу визначимо

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2}, \quad (24.8)$$

де $n = 1, 2, 3, \dots$

Як впливає із співвідношення (22.8), радіуси орбіт електрона в атомі водню пропорційні n^2 . Підставивши в (24.8) значення констант і вважаючи, що $n = 1$, дістанемо значення першого борівського радіуса, який є одиницею довжини в атомній фізиці:

$$r_B = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Рівні енергій в атомі

За борівською моделлю, ядро атома нерухоме, тому повна енергія E атома є сумою кінетичної енергії E_k обертання електрона і потенціальної енергії E_{II} взаємодії електрона з ядром:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}, \quad E_{\text{п}} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}, \quad (24.9)$$

$$E = E_k + E_{\text{п}} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}.$$

Знайдене значення E від'ємне, бо ми вважаємо, що значення потенціальної енергії двох зарядів, які розміщені на нескінченно великій відстані, дорівнює нулю. При зближенні зарядів потенціальна енергія зменшується.

Як впливає з рівняння (24.9), найменшу енергію атом має при $n = 1$. У цьому разі кажуть, що атом перебуває в *основному енергетичному стані*. Стани з $n > 1$ називають *збудженими*.

Визначимо енергію E_n на будь-якому енергетичному рівні. Для цього у вираз (24.9) підставимо значення r_n з (24.8). Дістанемо

$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2 \cdot \epsilon_0^2 n^2}. \quad (24.10)$$

Лінійчасті спектри

Під час переходу електрона з одного енергетичного рівня на інший за другим постулатом Бора виділяється або поглинається 1 квант енергії

$$h\nu = E_2 - E_1 = \frac{me^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (24.11)$$

Якщо електрон переходить, наприклад, з другої орбіти ($n_2 = 2$) на першу ($n_1 = 1$), то виділяється квант енергії. У протилежному разі такий самий квант поглинається. Отже, максимальну енергію атома водню можна надати для того, щоб перевести електрон на орбіту з $n = 1$ на $n \rightarrow \infty$, тобто відірвати його від ядра атома (іонізувати атом).

Із співвідношення (24.11) можна визначити частоту ν або довжину хвилі $\lambda = c/\nu$ фотона, який поглинається або випромінюється:

$$\nu = \frac{me^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (24.12)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8h^3 \epsilon_0^2 c} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (24.13)$$

Формули (24.12) і (24.13) називають *серіальними формулами*. Отже, вираз (24.12) – це узагальнена формула Бальмера, а величина

$$R = \frac{me^4}{8h^3 \epsilon_0^2 c} \quad (24.14)$$

є *сталою Рідберга*. Значення R , обчислене за формулою (24.14), збігається з експериментальним значенням цієї сталої, що підтверджує правильність теорії Бора для атома водню.

Теорія Бора пояснила розбіжність експериментальних визначень сталої Рідберга для атома водню і однократно іонізованого атома гелію.

Бор вважав, що для визначення точних виразів сталої Рідберга треба враховувати рух ядра під дією сил з боку електрона. Теорія, що виходить з припущення про нерухомість ядра, є тільки першим наближенням. Отже, на основі теорії Бора можна пояснити наявність лінійчастих спектрів, які утворюються у атома водню при переході електрона з одного стаціонарного стану в інший. Кожну спектральну лінію отримують внаслідок того, що атом випромінює фотон при переході з одного енергетичного стану в інший. При цьому різниця між енергіями атома в початковому і кінцевому станах визначає частоту електромагнітного випромінювання, а отже, і положення даної лінії в спектрі. Надаючи n у співвідношенні (24.10) різних значень, можна дістати ряд значень енергій стаціонарних станів атома водню (рис. 24.3).

Існування дискретних енергетичних станів атомів є однією з найхарактерніших особливостей їх властивостей, його доведено численними дослідженнями.

Народження теорії Бора ознаменувало початок нового етапу в розвитку сучасної фізики. Проте ця теорія мала ряд недоліків. Сам Бор перший помітив і підкреслив слабкі сторони запропонованої ним теорії: штучність планетарної моделі, своєрідність понять стаціонарних станів, тобто поєднання класичних квантових понять.

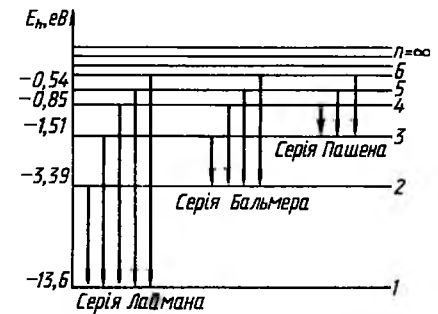


Рис. 24.3

§ 234. Гіпотеза де Бройля. Хвильові властивості частинок

Теорія Бора була проміжною ланкою між класичними уявленнями і новими ідеями хвильової механіки, які сформувалися на 1923 р. Причина встановлення цих ідей – *корпускулярно-хвильовий дуалізм ви-*

промінювання. Співвідношення $\varepsilon = h\nu$ між енергією квантів і частотою показувало, що дуалізм пов'язаний з самим існуванням квантів. Але чи пов'язаний цей дуалізм хвиль і частинок з природою кванта дії, тобто зі сталою Планка? Оскільки властивості електрона в стаціонарних станах описуються за допомогою сталої Планка, то чи не властивий такий дуалізм і електрону, чи не є корпускулярно-хвильова подвійність властивостей, характерна для електромагнітного поля, універсальною?

Гіпотеза де Бройля

Ідея приписати хвильові властивості електрону належить французькому фізику Луї де Бройлю. Проводячи аналогію між квантом, який має енергію $\varepsilon = h\nu$, та імпульсом $p = h/\lambda$, де Бройль припустив, що рух електрона або будь-якої іншої частинки, яка має масу спокою, пов'язаний із хвильовим процесом.

Цьому процесу відповідає хвиля (хвиля де Бройля), довжина якої

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (24.15)$$

де mv – модуль імпульсу рухомої частинки.

Грунтуючись на гіпотезі де Бройля, можна пояснити перший постулат Бора. Підставивши в (24.5) значення h , визначене з формули (24.15), дістанемо

$$2\pi r_n = n\lambda. \quad (24.16)$$

Це співвідношення показує, що з точки зору гіпотези де Бройля стаціонарними є лише ті орбіти, на яких вкладається ціле число хвиль де Бройля.

Оскільки частинки речовини мають хвильові властивості, то можна спостерігати їх інтерференцію і дифракцію. Саме з цього боку гіпотеза де Бройля і дістала експериментальне підтвердження в ряді дослідів, під час яких встановлено дифракцію електронів, протонів, нейтронів, атомів.

Дослід Девіссона і Джермера

У 1927 р. К. Девіссон і Л. Джермер вивчали розсіяння електронів на монокристалі нікелю. Досліди показали, що при заданому куті падіння електрони відбиваються від поверхні кристала під різними кутами, причому в одних напрямках виникали максимуми числа відбитих електронів, в інших – мінімуми, тобто спостерігалась дифракційна кар-

тина. Досліди Девіссона і Джермера встановили, що електрони дифрагували як хвилі, довжини цих хвиль точно збігалися з довжинами хвиль де Бройля.

Хвильові властивості характерні не тільки для пучка рухомих частинок, а й для окремої рухомої частинки. За допомогою дослідів В. Фабрикант, Г. Біберман і П. Сушкін виявили явище дифракції одиночних електронів. Обстрілюючи металеву плівку окремими електронами, також спостерігали дифракційну картину, як і тоді, коли проходив пучок електронів. Отже, електрони, як і фотони, мають подвійну корпускулярно-хвильову природу. Корпускулярні ($\varepsilon = h\nu$) і хвильові [$\lambda = h/(mv)$] характеристики зв'язані між собою квантом дії – сталою Планка.

§ 235. Поняття про квантову механіку

Теорія Бора неспроможна була пояснити багатьох явищ мікросвіту – будови багатоелектронних атомів, молекул, хімічного зв'язку тощо. Ідеї де Бройля і встановлені на досліді хвильові властивості частинок речовини були поштовхом до створення принципово нової теорії, яка описує поведження мікрочастинок з урахуванням їх хвильових властивостей. Цією теорією стала *квантова (хвильова) механіка*, основи якої створили в 1925–1926 рр. В. Гейзенберг і Е. Шредінгер.

Квантова механіка розкриває дві основні властивості речовини: квантованість внутрішньоатомних процесів і хвильову природу частинок.

Квантова механіка позбавлена наочності, характерної для класичної механіки. Образами звичного нам макросвіту не можна описати явища, які відбуваються у мікросвіті.

Вивчаючи явища, які відбуваються в макросвіті, ми користувалися законами класичної фізики, що лишаються непорушними, якщо обмежити область їх застосування. У гл. 22 було показано, що для розв'язання питання про те, якими законами механіки – класичними чи релятивістськими – необхідно користуватися, щоб описати явище, яке ми розглядаємо, треба знати, з якою швидкістю рухається досліджуваний об'єкт. Якщо його швидкість сумірна зі швидкістю світла у вакуумі, то треба застосувати релятивістські формули.

Швидкість світла у вакуумі є критерієм, який визначає межу застосовності класичних законів, оскільки вона є максимальною швидкістю передавання сигналів.

Виникає питання, чи існує такий критерій для описування поведження найдрібніших частинок речовини, яким властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм? Так, такий критерій існує, це – стала Планка.

Співвідношення невизначеностей

Щоб описати поведінку будь-якої частинки, треба визначити її координату x , імпульс p , енергію E і т. д.

У класичній фізиці немає яких-небудь обмежень, що забороняють з будь-яким ступенем точності одночасно виміряти, наприклад, координату x та імпульс p_x . У квантовій механіці становище принципово інше.

Оскільки рухома частинка має корпускулярно-хвильовий дуалізм, то одночасно точно визначити координату x та імпульс p_x не можна.

Старанний аналіз поведінки мікроскопічних частинок, проведений В. Гейзенбергом, показав, що існує принципова границя точності вимірювання цих величин. Якщо позначити Δx – неточність (невизначеність) визначення координати, Δp_x – неточність (невизначеність) визначень імпульсу, то ці величини між собою зв'язані залежністю

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar. \quad (24.17)$$

Цю залежність називають *співвідношенням невизначеностей Гейзенберга*. З неї випливає: **чим точніше визначено координату ($\Delta x \rightarrow 0$), тим менш точно визначено імпульс ($\Delta p \rightarrow \infty$) і навпаки.**

Отже, співвідношення невизначеностей встановлює границі, за якими принципи класичної фізики неприйнятні. Якщо добуток $\Delta x \Delta p$ порівняний з \hbar , то поведінку частинки описується законами квантової механіки, а якщо добуток $\Delta x \Delta p$ великий порівняно з \hbar , то поведінку частинки описується законами класичної фізики.

Якщо рух електрона розглядати в атомі, то співвідношення невизначеностей вносить істотні зміни в уявлення про траєкторію електрона, тобто про його орбіту. Радіус першої борівської орбіти атома водню $r_1 \approx 0,5 \cdot 10^{-10}$ м. Швидкість електрона на орбіті $v \approx 10^6$ м/с. Коли припустити, що швидкість визначено з точністю 10 %, тобто $\Delta v = 10^5$ м/с, то невизначеність координати

$$\Delta x \approx \frac{h}{m \Delta v} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 10^5 \text{ м/с}} \approx 73 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

що майже в 150 разів перевищує радіус орбіти.

Отже, класичне поняття траєкторії (орбіти) для електрона в атомі втрачає зміст. Про квантово-механічний зміст поняття орбіти мова йтиме далі.

Для макроскопічних тіл обмеження, які накладаються співвідношенням невизначеностей Гейзенберга, зовсім неістотні.

Наприклад, для маленької краплі діаметром 0,1 мм ($m = 5 \cdot 10^{-10}$ кг), яка рухається зі швидкістю $v = 10$ м/с, виміряною з точністю до 10 %, тобто при $\Delta p = m \Delta v = 5 \cdot 10^{-10}$ кг · м/с, невизначеності координати

$$\Delta x = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{5 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{м/с}} \approx 10^{-24} \text{ м},$$

що в 10^{20} раз менше від діаметра краплі.

Законали квантової механіки дістали ймовірнісне трактування: вони визначають ймовірність появи тієї чи іншої події.

Так, у досліді з дифракцією електронів попадання електрона в певну точку фотопластинки можна передбачити тільки з певним ступенем ймовірності.

Ймовірнісне трактування явищ мікросвіту – характерна особливість квантової механіки.

Рух мікрочастинки у квантовій механіці описується за допомогою деякої функції координат і часу – хвильової функції ψ (пси -функції), яка є основною характеристикою частинки. Конкретний вигляд ψ -функції (її математичний вираз) визначається станом частинки, характером сил, які діють на неї. Фізичний зміст має не сама ψ -функція, а квадрат її модуля $|\psi|^2$, який характеризує ймовірність перебування частинки в певній точці простору. Величина $|\psi|^2$ – це ймовірність того, що частинку можна знайти в малому об'ємі dV . Знаючи, як змінюється ψ -функція від точки до точки, можна зробити висновок про те, де найімовірніше можна знайти частинку. Виходячи з цього, зручно уявити, що частинка ніби “розмазана” в певній області простору у вигляді своєрідної хмари змінної густини. В атомній фізиці є таке поняття – *електронна хмара*, розподілена в атомі або молекулі. Густина електронної хмари – безпосередня міра ймовірності перебування електрона в певній точці.

§ 236. Квантові числа

Подальше нагромадження відомостей про атом і успіхи квантової механіки спричинили відмовлення від планетарної моделі атома. Враховуючи характер руху електронів в атомі, у сучасних моде-

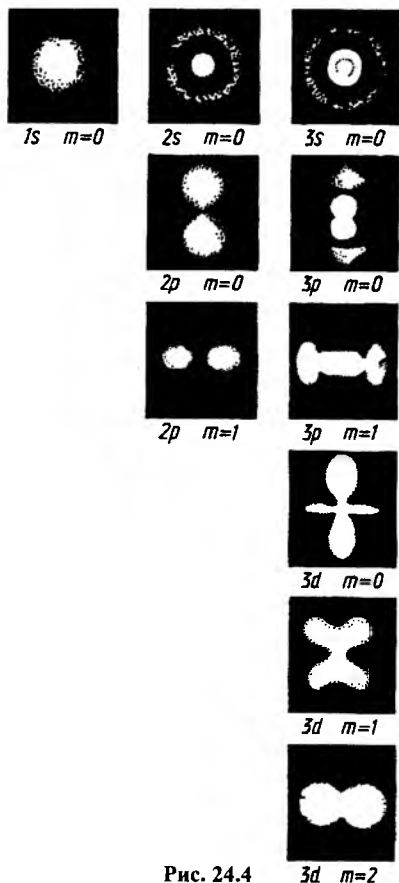


Рис. 24.4

лях атома використовують поняття електронної хмари. Густина електронної хмари, яку утворює кожний електрон, нерівномірна, вона змінюється залежно від відстані до ядра атома і максимальна там, де більша ймовірність перебування електрона. Форма, розміри та орієнтація в просторі електронної хмари однозначно визначаються квантовими числами. Шредінгер показав, що

стан електрона в атомі характеризується трьома квантовими числами: головним n , орбітальним l і магнітним m .

Головне квантове число n визначає середню відстань електрона від ядра атома, тобто розміри електронної хмари. Для найпростішого атома (атома водню) це число характеризує й енергію електрона. Головне квантове число набуває значення $n = 1, 2, 3, \dots$

Орбітальне квантове число l визначає значення моменту імпульсу електрона і характеризує форму електронної хмари. Воно набуває значення $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$.

Магнітне квантове число m визначає місце знаходження хмари в просторі і набуває значення $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$.

Стан електрона в атомі із заданими квантовими числами n і l позначають так: $1s, 2s, 2p, 3s$ і т. д. Тут цифри $1, 2, 3, \dots$ мають значення головного, а букви s, p, d – орбітального квантових чисел. Символам s, p, d відповідають значення $l = 0, 1, 2, \dots$. На рис. 24.4 показано форми електронних хмар, здобутих за допомогою фотографування спеціальних моделей. З рисунка видно, що класичне поняття орбіти електрона в атомі – досить умовне.

Якщо атом помістити в потужне однорідне магнітне поле, то можна встановити, що електрони мають не тільки електричні заряди, а й власні магнітні і механічні моменти. Власний механічний момент електрона назвали спіном (від англ. – обертати). Спочатку припускали, що спін зу-

мовлений обертанням електрона навколо своєї осі. Проте дослідні дані свідчать про те, що уявлення про електрон як обертову кульку не зовсім точне.

Спін треба вважати внутрішньою властивістю, притаманною електрону, подібно до того як притаманні йому заряд і маса.

Квантові розрахунки показують, що електрон може мати спінове квантове число або $s = 1/2$, або $s = -1/2$, інших значень бути не може.

Отже, стан електрона в атомі характеризується чотирма квантовими числами: n, l, m, s .

§ 237. Принцип Паулі.

Періодична система елементів Менделєєва

Швейцарський фізик В. Паулі встановив один з основних законів квантової механіки:

у тому самому атомі не може бути двох електронів, які мають однаковий набір чотирьох квантових чисел:

Інакше кажучи,

в одному і тому самому стані не можуть бути одночасно два електрони.

Цей закон назвали *принципом Паулі*. З нього випливає, що загальна кількість електронних станів в атомі, які відрізняються хоча б одним з квантових чисел при даному головному квантовому числі n , дорівнює $2n^2$.

Електрони, які займають сукупність станів з однаковим значенням головного квантового числа n , утворюють електронну оболонку. Розрізняють такі оболонки:

Оболонка	n	Оболонка	n
K	1	M	3
L	2	N	4

У кожній оболонці атома електрони розподіляються по підоболонках, які відповідають певному значенню орбітального квантового числа l . Залежно від l електрон міститься в підоболонці із символами s, p, d, f і т. д.

Розподіл електронів по підоболонках

Головне квантове число n	Електронна оболонка	Кількість електронів у станах				Максимальна кількість електронів
		s ($l = 0$)	p ($l = 1$)	d ($l = 2$)	f ($l = 3$)	
1	K	2	–	–	–	2
2	L	2	6	–	–	8
3	M	2	6	10	–	18
4	N	2	6	10	14	32

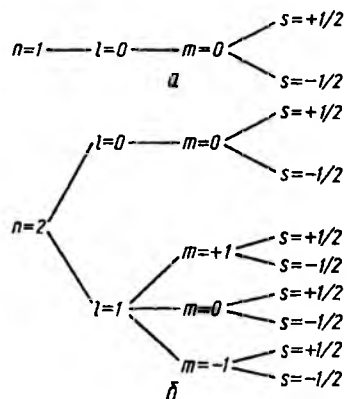


Рис. 24.5

Простежимо, як заповнюються оболонки. В атомі водню один електрон, він перебуває в *K*-оболонці ($n=1$), у наступного елемента – гелію – два електрони і обидва вони в *K*-оболонці. За принципом Паулі, на *K*-оболонці не може бути більше двох електронів (рис. 24.5, а). Отже, для гелію вона вже заповнена. У атома літію три електрони, два з них містяться на *K*-оболонці, третій – на оболонці *L* ($n=2$). На *L*-оболонці може бути $2n^2=8$ електронів (рис. 24.5, б), заповнення *L*-оболонки закінчується неоном. Міркування для $n=3, 4, \dots$ можна продовжити.

Періодичність таблиці Менделєєва збігається з періодичністю заповнення електронних оболонок.

Отже, періодичність закладена в самій структурі атомів.

§ 238. Поняття про квантові генератори

Поява *квантових генераторів* – одне з найвидатніших досягнень нової галузі науки – квантової електроніки.

Перші квантові генератори розробили М. Г. Басов і О. М. Прохоров (СРСР) та Ч. Таунс (США). Оптичні квантові генератори, які називають *лазерами* – цілком новий тип джерел світла.

Збуджений атом може віддати енергію збудження, не випромінюючись, а завдяки *спонтанним* і *вимушеним* переходам. Випромінювання звичайних джерел світла спонтанне: воно некогерентне, складається з цугів хвиль різних частот, поляризацій і напрямів поширення. Принцип лазерної техніки полягає у використанні вимушеного (індукованого) когерентного випромінювання.

Під *індукованим випромінюванням* розуміють *випромінювання збуджених атомів, спричинене дією світла, яке падає на них*. У цьому разі перехід збудженого атома на нижчий рівень супроводиться випромінюванням фотона, який за характеристиками не відрізняється від індукуючого фотона. Внаслідок такого вимушеного квантового переходу в речовині генератора виникають уже два однакові фотони: один первинний – вимушений, другий вторинний – випромінений. Оскільки речовина складається з безлічі атомів, таких вторинних фотонів стає дедалі більше, світло підсилюється.

Кількість вимушених переходів залежить від густини потоку падаючих фотонів. Для утворення потужного індукованого випромінювання необхідно, щоб у збудженому стані атоми могли перебувати досить довгий час. Взаємодія електромагнітного випромінювання з речовиною супроводиться або його поглинанням, тобто зменшенням інтенсивності світла внаслідок проходження його через речовину (рис. 24.6, а), або його підсиленням (рис. 24.6, б). Для того щоб речовина підсилювала прохідне електромагнітне випромінювання, необхідно створити в ньому нерівноважний (інверсний) стан, тобто такий стан, в якому атомів, що перебувають на збудженому рівні, більше, ніж на нижчих. Процес переведення речовини в такий стан називають *оптичним накачуванням*.

Розглянемо принцип дії оптичного квантового генератора – *рубінового лазера*, створеного в 1960 р. На рис. 24.7 подано схему рубінового лазера. Рубін (активне середовище) – це кристал Al_2O_3 , до складу якого входить близько 0,05 % іонів Cr^{3+} ; іони хрому мають основне значення у лазерному процесі. Світлове випромінювання лазера створюють іони хрому, які збуджуються в газорозрядній трубці 2, спірально закрученій навколо рубінового стрижня 1; її називають *лампою накачування*. Рубіновий стрижень лазера являє собою циліндр, торці якого старанно відполіровані і покриті шаром срібла так, що один торець повністю відбиває світло, а другий – частково відбиває і частково пропускає його. Якщо лампа накачування спалахує, на рубіновий стрижень надходять фотони різних частот. Атоми хрому, поглинувши частину фотонів певної енергії, переходять у збуджений стан. Завдяки обмеженим спонтанним переходам у стрижні може виникнути вимушене випромінювання, яке поширюється точно вздовж його осі і підсилюється від багаторазового відбивання від торцевих дзеркал, які виконують роль об'ємного резонатора. Внаслідок цього виникає потужне монохроматичне випромінювання – світловий імпульс, частина якого виходить через напівпрозоре дзеркало. Тривалість такого імпульсу $\sim 10^{-3}$ с. Це пов'язано з тим, що всі збуджені іони хрому за цей час переходять у незбуджений стан. Світловий пучок лазера точно напрямлений і має малу розбіжність. Об'ємний резонатор лазера призначений для створення позитивного зворотного зв'язку і для формування геометричних параметрів вихідного променя лазера.

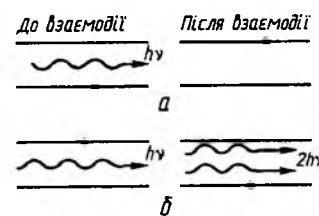


Рис. 24.6

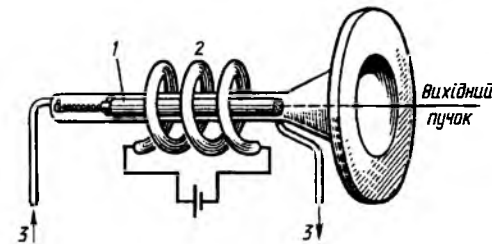


Рис. 24.7

Не вся енергія, поглинута рубіновим стрижнем, перетворюється в лазерне випромінювання. Частина її, досить значна ($\approx 50\%$), витрачається на нагрівання стрижня, тому в конструкції лазера передбачено охолодження 3. Швидкість повторення імпульсів лазера залежить від системи охолодження рубінового кристала. При температурі стрижня порядку 1000 K рубіновий лазер руйнується.

Лазерних матеріалів дуже багато. Це насамперед скло, в яке введено іони неодиму, флюорит кальцію з іонами самарію тощо. Різні лазерні матеріали дають світлове випромінювання різних довжин хвиль: рубіновий лазер – 0,694 мкм, лазер на склі з неодимом – 1,06 мкм (інфрачервоне випромінювання). У лазерах активним середовищем можуть бути гази або їх суміші (Ne, Ar, Ne–He тощо). У газових лазерах атоми активного середовища часто збуджують високочастотним розрядом. Як правило, випромінювання газових лазерів неперервне. Створено напівпровідникові, хімічні, газодинамічні та інші лазери.

§ 239. Деякі застосування лазерів

Густина потужності лазерного пучка може досягти порядку $10^{12} - 10^{16}$ Вт/см². Цього досить, щоб, сфокусувавши його в зоні фокальної плями, за час 10^{-8} с пропалити отвір у вольфрамівій фользі. Цю властивість лазерних пучків використовують у світлопроменевих верстатах, за допомогою яких “пробивають” отвори в годинникових камінцях з рубіну, алмазу, в тугоплавких сплавах і важкооброблюваних металах.

Лазери мають велике застосування в мікроелектроніці. За допомогою лазерів зварюють різні з’єднання для мікросхем, напильюють напівпровідникові шари і т. д. Висока монохроматичність і напрямленість лазерного випромінювання дають можливість використовувати його для вимірювання відстаней. Наприклад, 17 листопада 1970 р. радянська автоматична станція “Луна-17” доставила на поверхню Місяця пересувну лабораторію “Луноход-1”. На ньому було встановлено лазерний відбивач. За часом проходження лазерного пучка, посланого з Землі і відбитого назад відбивачем лунохода, було точно виміряно відстань від Землі до Місяця.

За допомогою лазерів можна вимірювати не тільки астрономічні, а й малі відстані. Один з найцікавіших приладів, створених для вимірювання малих відстаней, – це лазерний інтерферометр. За його допомогою виміряно деформацію земної кори з похибкою $3 \cdot 10^{-9}$ м.

У медицині однією з галузей застосування оптичних квантових генераторів є хірургія. Вихідний пучок світла використовують для зашивання, стерилізації і припікання ділянок живих тканин. Проведено успішні ек-

перименти із застосуванням лазера для усунення відшарувань сітківки ока. Око при такій операції є лінзою, яка фокусує випромінювання на сітківці. Інтенсивність пучка світла при цьому така низька, що око в цілому не пошкоджується, а в тому місці, де пучок світла фокусується, сітківка приварюється.

Короткі висновки

- Внутрішню будову атома вивчати безпосередньо не можна через малість його розмірів. Структура атома виявляється лише посередньо в явищах, пов’язаних з його внутрішньою будовою. До таких явищ належить випромінювання.
- Е. Резерфорд запропонував ядерну (планетарну) модель атома. За цієї моделлю, весь позитивний заряд і майже вся маса атома (99,4 %) зосереджені в атомному ядрі. Розміри ядра $\sim 10^{-15}$ м, розмір атома $\sim 10^{-10}$ м. Навколо ядра по замкнених орбітах рухаються електрони. Модель будови атома, запропонована Резерфордом, не пояснила спектральних закономірностей і суперечила законам класичної механіки. За моделлю Резерфорда, атом – нестійка система. Насправді атом стійкий. Вихід з цього утрудненого стану запропонував Н. Бор у 1913 р.
- В основі теорії Бора лежать два постулати.
 1. Електрони можуть рухатися в атомі лише по певних орбітах, перебуваючи на яких вони, незважаючи на наявність у них прискорення, не випромінюють. Ці орбіти відповідають стаціонарним станам електронів в атомі і визначаються умовою

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}.$$

2. Атом випромінює або поглинає квант електромагнітної енергії при переході електрона з одного стаціонарного стану в інший. Енергія кванта дорівнює різниці енергій стаціонарних станів електрона до E_2 і після E_1 -переходу:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

- Бор ввів правило квантування, яке дало змогу визначити можливі радіуси орбіт електрона і значення енергії атома водню. На основі теорії Бора можна пояснити наявність лінійчастих спектрів, які утворюються біля атома водню при переході електрона з одного стаціонарного стану в інший. Існування дискретних енергетичних станів атомів – одна з найхарактерніших особливостей їх властивостей, її доведено численними дослідженнями.
- Народження теорії Бора було початком нового стану в розвитку сучасної фізики. Проте ця теорія мала ряд недоліків: штучність планетарної моделі, своєрідність понять стаціонарних станів, тобто поєднання класичних і квантових понять. Ця теорія – певний перехідний стан на шляху створення послідовної теорії атомних і ядерних явищ.

- У 1923 р. Л. де Бройль запропонував гіпотезу, за якою будь-яка частинка поряд з корпускулярними властивостями має й хвильові, тобто поводить себе за певних умов як хвиля:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Експериментально гіпотезу де Бройля підтверджено дослідами Девісона і Джермера, Фабриканта, Бібермена і Сушкіна.

Отже, електрони, як і фотони, мають подвійну корпускулярно-хвильову природу. Корпускулярні $\epsilon = h\nu$ і хвильові $\lambda = h/(mv)$ характеристики зв'язані між собою квантом дії – сталою Планка.

- Ідея де Бройля була поштовхом до створення принципово нової теорії, яка описує поведінку мікрочастинок з урахуванням їх хвильових властивостей – квантової (хвильової механіки), яка розкриває дві основні властивості речовини: квантованість внутрішньоатомних процесів і хвильову природу частинок.
- Фундаментальним принципом квантової механіки є співвідношення невизначеностей, яке стверджує, що одночасно точно визначити координати та імпульс рухомої частинки не можна, оскільки їй властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar.$$

- На основі квантової теорії випромінювання були побудовані квантові генератори. Оптичні квантові генератори – новий тип джерел світла, їх широко застосовують у різних галузях науки і техніки.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Розкажіть про закономірності в атомних спектрах. 2. Поясніть узагальнену формулу Бальмера. 3. Розкажіть про досліди Резерфорда на розсіяння α -частинок. 4. Сформулюйте постулати Бора. 5. Поясніть на основі теорії Бора наявність спектрів в атомі водню. 6. У чому недоліки теорії Бора? 7. У чому смисл гіпотези де Бройля? 8. Що таке квантова механіка? 9. Як ви розумієте співвідношення невизначеностей? 10. Які квантові числа ви знаєте? У чому їх значення? 11. Сформулюйте принцип Паулі. 12. Що таке квантові генератори? 13. Де застосовують лазери?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Визначити частоту світла, випромінюваного атомом водню, при переході електрона на рівень з головним квантовим числом $i = 2$, якщо радіус орбіти електрона змінився в 9 раз.

Дано: $i = 2$; $r_i / r_n = 1/9$.

Знайти: ν .

Розв'язання. Частоту світла, випромінюваного атомом водню, визначають за формулою

$$\nu = R \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1)$$

де R – стала Рідберга; n – номер орбіти, з якої переходить електрон; $i = 2$ – номер орбіти, на яку переходить електрон.

З формули (24.8) для радіуса орбіти випливає, що

$$\frac{i^2}{n^2} = \frac{r_i}{r_n} = \frac{1}{9}.$$

Поділимо і помножимо праву частину рівності (1) на i^2 ; одержимо

$$\nu = R \left(1 - \frac{i^2}{n^2} \right) \frac{1}{i^2}.$$

Обчислення:

$$\nu = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \left(1 - \frac{1}{9} \right) \frac{1}{4} = 0,73 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

Задача 2. Визначити довжину хвилі де Бройля, якщо кінетична енергія електрона дорівнює 0,5 кеВ.

Дано: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг; $E_k = 0,5$ кеВ $= 0,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-16}$ Дж $= 0,8 \cdot 10^{-16}$ Дж; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Знайти: λ .

Розв'язання. Довжину хвилі де Бройля визначають за формулою (24.15):

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \quad (1)$$

З виразу для кінетичної енергії $E_k = \frac{mv^2}{2}$ знайдемо

$$v = \sqrt{2E_k / m}. \quad (2)$$

Підставивши (2) в (1), дістанемо

$$\lambda = \frac{h}{m\sqrt{2E_k / m}} = \frac{h}{\sqrt{2E_k m}}.$$

Обчислення:

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{\sqrt{2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-16} \text{ Дж} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

- Обчислити період обертання електрона на першій борівській орбіті в атомі водню.
- Обчислити швидкість електрона на третьому енергетичному рівні в атомі водню.

3. При переході електрона в атомі водню із збудженого стану в основний радіус орбіти електрона зменшився в 16 разів. Визначити довжину хвилі випроміненого фотона.
4. Визначити довжину хвилі де Бройля електрона, який пройшов прискорюючу різницю потенціалів 10^3 В.
5. Знайти довжину хвилі де Бройля молекули водню, яка рухається із середньою квадратичною швидкістю при температурі 300 К. Маса молекули водню $3,4 \cdot 10^{-27}$ кг.
6. Порівняти довжину хвилі де Бройля тіла масою 1 г, яке рухається зі швидкістю 1 м/с, з результатами задач 4 і 5.
7. У скільки разів змінюються радіус орбіти і енергія атома водню при переході із стану $n = 5$ до стану $i = 1$?
8. Які швидкості і прискорення електрона на першій борівській орбіті?

ГЛАВА 25

ФІЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

§ 240. Природна радіоактивність

У 1896 р. Антуан Анрі Беккерель, вивчаючи явище люмінесценції солей урану, встановив, що якщо освітити сіль урану сонячним промінням, а потім покласти її на загорнуту в чорний папір фотопластинку, то остання темніє під дією, як він вважав, променів люмінесценції.

Але одного разу Беккерель поклав на фотопластинку сіль урану, не освітивши її попередньо промінням Сонця, і весь препарат поклав у темний ящик. Через кілька днів, проявивши фотопластинку, він помітив на ній відбиток шматка уранової руди.

Виконавши такі дослід з різними солями урану, Беккерель дійшов висновку, що уранова сіль випромінює проміння невідомого типу, яке проходить крізь папір, дерево, тонкі металеві пластинки, робить повітря провідником електрики. Проміння, відкрите Беккерелем, назвали радіоактивним (від лат. “радіус” – промінь).

Було з’ясовано, що уран – не єдиний елемент, здатний випромінювати радіоактивне проміння. Марія Склодовська-Кюрі і П’єр Кюрі, які всебічно вивчили радіоактивність, виділили з уранової руди два радіоактивні елементи: полоній Po і радій Ra.

За відкриття і дослідження радіоактивності урану А. Беккерелем разом з П. Кюрі і М. Склодовською-Кюрі було отримано Нобелівську премію у 1903 році.

Експериментально Ернест Резерфорд установив, що радіоактивне випромінювання неоднорідне і складається з кількох сортів променів. Це впли-

вало з результатів дослідів, схему яких подано на рис. 25.1. Поперечне магнітне поле, напрямлене перпендикулярно до площини рисунка, ділить випромінювання, що випускається радіоактивним джерелом, на три пучки: α , β , γ .

Перший – це потік моноенергетичних ядер гелію; другий – потік електронів, третій – потік квантів електромагнітної енергії.

Радіоактивність елемента не залежить від того, чи він хімічно чистий, чи він буде в складі якої-небудь хімічної сполуки. Радіоактивність – внутрішньо-ядерний процес.

Це впливає з того, що на нього ніяк не діють ні вид хімічної сполуки, в яку входить дане ядро, ні агрегатний стан речовини, ні великі тиски, ні дуже високі температури, ні електричні й магнітні поля, тобто всі ті дії, які можуть змінювати стан електронної оболонки атома.

Отже, під природною радіоактивністю розуміють явище мимовільного перетворення атомних ядер нестійких ізотопів у стійкі, що супроводжується випусканням частинок і випромінюванням енергії. Таким чином, відкриття явища радіоактивності дуже близько підвело фізиків до вивчення будови атомного ядра.



Рис. 25.1

§ 241. Закон радіоактивного розпаду

У процесі вивчення природної радіоактивності перед експериментаторами виникло питання: за яким законом розпадаються радіоактивні елементи? Численні досліді показують, що з часом кількість радіоактивних атомів у певному об’ємі речовини зменшується. Для одних елементів ця кількість зменшується дуже швидко – протягом хвилин і навіть секунд; для інших на це потрібно мільярди років. Було встановлено, що розпад ядер – явище випадкове. Не можна сказати, що станеться з даним ядром: воно може однаковою мірою і зазнати розпаду, і зберегтися цілим незалежно від того, який час воно взагалі існує. Можна також твердити, що є деяка ймовірність розпаду кожного радіоактивного елемента за певний проміжок часу; отже, зміна радіоактивності з часом має підлягати статистичній закономірності. Однією з основних характеристик радіоактивного елемента є величина, яка визначає ймовірність розпаду кожного окремого атома за секунду, її позначають λ і називають *сталюю радіоактивного розпаду*.

Якщо в початковий момент часу $t = 0$ є N_0 радіоактивних атомів, то в момент часу t кількість радіоактивних атомів N , які залишились, визначають за формулою

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (25.1)$$

де $e \approx 2,72$ – основа натурального логарифма.

Вираз (25.1) називають законом радіоактивного розпаду.

Період піврозпаду

Це час $T_{1/2}$, після якого початкова кількість N_0 атомів радіоактивної речовини зменшується вдвічі. Якщо $t = T_{1/2}$, то $N = N_0 / 2$ і тоді $N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$, звідки $\lambda T_{1/2} = \ln 2$, або

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (25.2)$$

Період піврозпаду сталий для певного ізотопу. Періоди піврозпаду різних радіоактивних ізотопів змінюються в дуже широких межах: від 4,56 млрд років в урані до $1,5 \cdot 10^{-4}$ с в ізотопі полонію. Сталість періоду піврозпаду певних атомів в ізотопі підтверджує статистичний характер радіоактивних перетворень.

Усі ізотопи елементів з порядковим номером, більшим від 83, радіоактивні. Природні радіоактивні елементи можна розмістити в чотири ряди, кожний член якого (крім першого) утворюється внаслідок радіоактивного розпаду попереднього. Родоначальниками цих рядів є ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{90}^{232}\text{Th}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{93}^{237}\text{Np}$. Ряд ${}_{92}^{237}\text{U}$ закінчується стабільним ізотопом свинцю ${}_{82}^{206}\text{Pb}$, ряд торію ${}_{90}^{232}\text{Th}$ – стійким ізотопом свинцю ${}_{82}^{208}\text{Pb}$; кінцевим продуктом ряду актинію ${}_{92}^{235}\text{U}$ є стабільний ізотоп свинцю ${}_{82}^{207}\text{Pb}$. Ряд нептунію ${}_{93}^{237}\text{Np}$ закінчується стабільним ізотопом вісмуту ${}_{83}^{209}\text{Bi}$. Родоначальники радіоактивних рядів мають великі періоди піврозпаду, наприклад, ${}_{92}^{238}\text{U} - 4,56 \cdot 10^9$ років, ${}_{90}^{232}\text{Th} - 1,39 \cdot 10^{10}$ років. Протягом геологічних епох між усіма членами радіоактивного ряду встановлюється вікова рівновага, при якій кількості радіоактивних речовин пропорційні їх періодам піврозпаду.

Активність A радіоактивної речовини характеризує кількість розпадів ядер за 1 с.

Одиницею активності є *беккерель*:

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ розп./с} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

Величину $\tau = 1/\lambda$ називають *середнім часом життя* радіоактивного ізотопу. Значення λ і τ не залежать від зовнішніх умов, а визначаються тільки властивостями атомного ядра.

§ 242. Способи спостереження і реєстрації заряджених частинок

Випромінювання радіоактивних речовин досліджують різними методами, з якими ми ознайомимось у загальних рисах. Мета таких досліджень – з'ясувати природу частинок, які випромінюються при радіоактивному розпаді, виміряти енергію цих частинок та інтенсивність випромінювання (тобто визначити кількість частинок, які випускаються радіоактивною речовиною за 1 с).

Найбільш поширені для реєстрації ядерних частинок і випромінювання методи, які ґрунтуються на іонізуючій і фотохімічній дії частинок. До них належать хімічні, калориметричні і фотографічні методи. Іонізуючу дію випромінювання використовують в іонізаційних камерах, лічильниках Гейгера – Мюллера і сцинтиляційних лічильниках.

Камера Вільсона

Цей прилад сконструював у 1911 р. англійський фізик Ч. Вільсон. Він ґрунтується на здатності швидких частинок іонізувати молекули речовини, яка перебуває в пароподібному стані.

Схему камери Вільсона зображено на рис. 25.2. Робочий об'єм камери l заповнений повітрям або іншим газом і містить у собі насичену пару води або спирту. Якщо поршень 2 швидко рухається вниз, пара або газ в об'ємі l адіабатно розширюється і охолоджується, при цьому пара стає пересиченою. Коли через об'єм камери пролітає заряджена частинка, то на своєму шляху вона створює іони, на яких при розширенні об'єму l утворюються крапельки сконденсованої пари. Отже, частинка залишає за собою видимий слід (трек) у вигляді вузької смужки туману. Цей трек можна спостерігати або сфотографувати.

Альфа-частинки значною мірою іонізують газ і тому залишають у камері Вільсона жирні сліди. Бета-частинки після себе залишають дуже тонкі треки (рис. 25.3). Гамма-кванти можна виявити з допомогою камери Вільсона за фотоелектронами, які вони вибивають з молекул газу, що заповнює робочий об'єм камери.

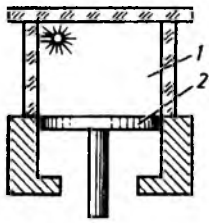


Рис. 25.2

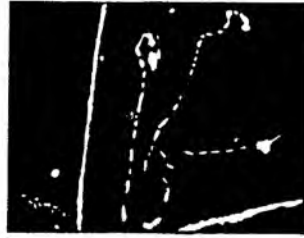


Рис. 25.3

Камеру Вільсона часто поміщають у потужне магнітне поле, що дає можливість за викривленням треків частинок визначати їх енергію і знак заряду, а за товщиною треків – заряд і масу частинок.

Газорозрядні лічильники

У дослідженнях з ядерної фізики часто використовують лічильники заряджених частинок, призначені для реєстрації окремих частинок. Розглянемо принцип дії одного з видів лічильників – пропорційного (рис. 25.4). Лічильник складається з наповненого газом циліндра 1, в який введено два електроди: анод 3 – це тонка металева нитка, обидва кінці якої закріплені на ізоляторах; катод 2 виконаний у вигляді струмопровідного металевого шару, нанесеного на внутрішню поверхню циліндра.

Між катодом і анодом прикладається напруга до кількох сотень вольт, внаслідок чого всередині лічильника створюється електричне поле. Частинка, яка потрапляє в лічильник, іонізує молекули газу, і в електричному полі між катодом і анодом виникає напрямлений рух іонів, тобто відбувається газовий розряд. Розрядний струм створює великий спад напруги на опорі R_n , і напруга між електродами дуже зменшується, тому розряд припиняється.

Після припинення струму між катодом і анодом знову відновлюється велика напруга і лічильник готовий до реєстрації наступної частинки. Імпульс напруги, який виникає на опорі R_n , підсилюється і реєструється спеціальним лічильним пристроєм. Пропорційними лічильники називають тому, що сила струму газового розряду, який виникає після проходження іонізуючої частинки, пропорційна кількості утворених нею іонів.

Один з різновидів *пропорційних лічильників* запропонували Е. Резерфорд і Г. Гейгер у 1908 р. Пізніше у 1928 р. лічильник удосконалив Е. Мюллер, і тому його назвали *лічильником Гейгера – Мюллера*.

У 1934 р. П. О. Черенков, досліджуючи світіння рідин під дією γ -випромінювання радіо, спостерігав слабе синє світіння, яскравість якого в чистих прозорих рідинах мало залежала від їх хімічного складу.

Світіння, спричинюване радіоактивними випромінюваннями, помітили ще П'єр і Марія Кюрі, але вони вважали його звичайною люмінесценцією. С. І. Вавилов і П. О. Черенков припустили, що це світіння виникає внаслідок гальмування швидких електронів, які вибиваються γ -квантами з молекул опромінюваної речовини. Це припущення перевірили так: оскільки магнітне поле відхиляє електрони, то світіння, якщо воно виникає на шляху гальмівного електрона, має відхилитися магнітним полем. І справді, при накладанні магнітного поля світіння відхилилось у відповідний бік. Отже, це не була люмінесценція.

З теорії цього явища, названого *ефектом Вавилова – Черенкова* *, зовсім несподівано випливало, що

світло мають випромінювати електрони, які рухаються швидше від світла.

Але теорія відносності переконливо свідчить про повну неможливість такого руху. І все-таки виявилось, що можна обганяти світло. Справа в тому, що в теорії відносності граничною швидкістю є швидкість світла у вакуумі. У речовині світло поширюється з меншою швидкістю $v_e = c/n$, де n – показник заломлення середовища. Якщо енергія γ -кванта велика, то вибитий ним електрон може рухатись із швидкістю u , більшою від швидкості світла в середовищі, але такою, що не перевищує швидкості світла у вакуумі. Отже, для виникнення випромінювання Черенкова необхідні такі умови: $u > v_e$ або $\beta n > 1$, де $\beta = u/c$. Зміст цього явища такий.

Електрон, який рухається із швидкістю v_e , обганяє своє власне електромагнітне поле і починає цим полем гальмуватися.

Внаслідок гальмування й виникає випромінювання (світіння). Випромінювання Вавилова – Черенкова має точну напрямленість. Воно зосереджене в межах кута $\sin \varphi = v_e/u$ (рис. 25.5) і напрямлене в бік руху електрона. Такий рух електрона можна порівняти з рухом глісера по гладенькій по-

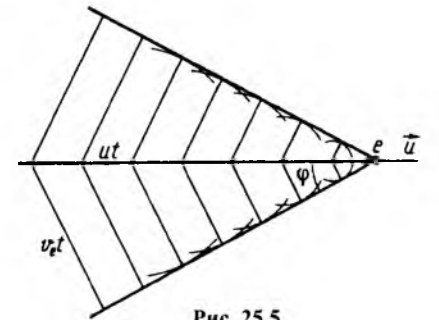


Рис. 25.5

* Ефект Вавилова – Черенкова теоретично пояснили І. Е. Тамм і І. М. Франк. За відкриття ефекту та з'ясування його механізму Черенкову, Тамму і Франку у 1958 р. було присуджено Нобелівську премію.

верхні води, коли за ним виникають розбіжні хвилі з конусоподібним фронтом, причому кут конуса тим менший, чим з більшою швидкістю рухається глісер.

Лічильник Черенкова

Ефект Вавилова – Черенкова властивий не тільки електронам, а й будь-яким іншим зарядженим частинкам: при великих швидкостях руху в густих середовищах ($n > 1$) вони випромінюють електромагнітні хвилі – світло. Отже, світіння Вавилова – Черенкова можна використати для визначення швидкості руху швидких частинок. На цьому ефекті ґрунтується дія лічильника Черенкова.

Лічильник складається з чистої рідини, наприклад води або прозорого твердого тіла, сполучених з фотопомножувачем, який реєструє кожну окрему “надсвітлову” частинку (рис. 25.6). Особливістю цього лічильника

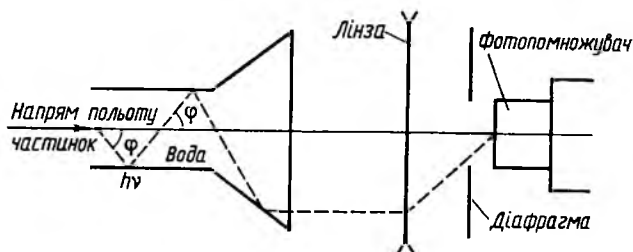


Рис. 25.6

є те, що він реєструє не будь-які заряджені частинки, а тільки ті, в яких швидкість більша від швидкості світла в певному середовищі. Крім того, яскравість спалаху залежить від заряду частинки. Тому, добираючи відповідне середовище, можна виділяти частинки з певними інтервалами енергій або з певним значенням заряду. Такі лічильники встановлюють, наприклад, на супутниках і космічних ракетах для вивчення космічного проміння.

§ 244. Відкриття нейтрона

У 1920 р. Е. Резерфорд припустив, що може існувати незаряджена (нейтральна) частинка, маса якої приблизно дорівнює сумі мас протона і електрона. Численні досліди, проведені в період з 1920 по 1930 р. для виявлення цієї частинки, не давали позитивних наслідків. У 1930 р. німецькі фізики В. Боте і Р. Беккер виявили випромінювання великої проникної здатності, яке не відхилялось електричним полем. За своїми

властивостями це випромінювання було схоже на дуже жорстке (тобто таке, що глибоко проникає в речовину) рентгенівське проміння. У 1932 р. французькі фізики Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі встановили, що при опромінюванні цим випромінюванням парафіну, води та інших водневоподібних сполук виникають протони великих енергій. У цьому ж році англійський учений Дж. Чедвік, учень Е. Резерфорда, який багато років шукав нейтрон, довів, що випромінювання, відкрите Боте і Беккером, – це потік нейтральних частинок, маса яких трохи більша від маси протона. Отже, нейтрон, на існування якого вказували Е. Резерфорд та інші фізики, був відкритий як окрема частинка.

§ 245. Будова атомного ядра

Відкриття нейтрона відіграло велику роль у розумінні будови атомного ядра.

Радянський фізик Д. Д. Іваненко і німецький учений В. Гейзенберг у 1932 р. запропонували протон-нейтронну модель, за якою ядро будь-якого хімічного елемента складається з двох видів елементарних частинок: протонів p і нейтронів n , які пізніше дістали назву нуклонів. Подальшими експериментальними дослідженнями було доведено правдивість цієї моделі, і тепер вона загально визнана.

Протони мають позитивний заряд, який за модулем дорівнює заряду електрона. Нейтрони електрично нейтральні. Маса протона в 1836 раз більша за масу електрона. Маса нейтрона більша від маси протона на 2,5 маси електрона. Маси нейтрона m_n і протона m_p у вуглецевій шкалі атомних мас (а. о. м) відповідно дорівнюють: $m_n = 1,008665012$ а. о. м., $m_p = 1,007276470$ а. о. м. Протон і нейтрон належать до класу ферміонів – частинок, які мають півцілий спин. Кількість протонів у ядрі визначає заряд ядра $+Ze$. Значення Z збігається з атомним номером відповідного хімічного елемента в періодичній системі Менделєєва. Кількість нейтронів у ядрі позначають N . Загальну кількість нуклонів у ядрі називають масовим числом A ядра:

$$A = N + Z. \quad (25.3)$$

Атомні ядра позначають символами. Якщо X відповідає символу атома хімічного елемента в періодичній системі Менделєєва, то символ ядра цього атома має вигляд ${}^A_Z X$. Ядра, які мають той самий заряд Z при різних A , називають ізотопами. Ізотопи ядер хімічного елемента мають однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів у складі ядра.

Існування ізотопів установив у 1910 р. англійський фізик Ф. Содді. Усі хімічні елементи (крім технецію ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ і прометію ${}^{141}_{61}\text{Pm}$) мають ізотопи. Наприклад, водень має три нукліди: легкий з ядром ${}^1_1\text{H}$ (протій), важкий з ядром ${}^2_1\text{H}$ (дейтерій) і штучний з ядром ${}^3_1\text{H}$ (тритій). Уран ($Z = 92$) має 12 ізотопів з масовими числами від $A = 228$ до $A = 239$. Усі хімічні елементи – це природні суміші ізотопів. Тому кожний хімічний елемент має відносну атомну масу, яка є середнім значенням атомних мас усіх його ізотопів.

Фізичні властивості ізотопів трохи відмінні від стабільних елементів. Наприклад, температура кипіння протію 20,39 К, а дейтерію 23,57 К.

Ядра, які мають те саме A при різних Z , називають *ізобарами*. Прикладом ізобарної пари можуть бути ${}^{36}_{16}\text{S}$ і ${}^{36}_{18}\text{Ar}$, ізобарної тріади – ${}^{50}_{22}\text{Ti}$; ${}^{50}_{23}\text{V}$; ${}^{50}_{24}\text{Cr}$. Ядро має спін, який дорівнює векторній сумі спінів нуклонів, що утворюють його. За усталеною термінологією, під спіном частинки або ядра розуміють спінове квантове число. Спінові квантові числа протонів і нейтронів дорівнюють $1/2$. Для обчислення спіну ядра має значення парність або непарність чисел Z і N . Спін ядра, яке складається з парної кількості нуклонів, є цілим числом або нулем. Спін ядра, яке складається з непарної кількості нуклонів, – півцілий.

Внаслідок того, що нуклони, які входять до складу ядра, мають хвильові властивості, атомне ядро не має різко виражених меж.

Під *радіусом атомних ядер* розуміють лінійні розміри області, в якій проявляється дія ядерних сил. Експериментальні дані з розсіювання α -частинок речовиною дали можливість установити емпіричну формулу для обчислення радіуса ядра: $R = R_0 A^{1/3}$, де $R_0 \approx (1,2 \div 1,7) 10^{-15}$ м.

Об'єм ядра пропорційний кількості нуклонів A , які входять до нього; це означає, що нуклони в усіх ядрах упаковані приблизно з однаковою густиною. Густина ядерної речовини велика, і її значення приблизно відповідає $\rho = 2 \cdot 10^{11}$ кг/м³, тобто близько 200 млн т в 1 см³.

§ 246. Дефект маси, енергія зв'язку і стійкість атомних ядер

Більшість ядер – це стійкі утворення, хоч між протонами, що входять до складу ядра, діють сили кулонівського відштовхування.

Стійкість атомних ядер означає, що між нуклонами в ядрах існує певна взаємодія. Про міцність того або іншого утворення роблять висновки з

того, наскільки легко або важко зруйнувати його: чим важче його зруйнувати, тим воно міцніше. Зруйнувати ядро – це значить розірвати зв'язки між його нуклонами, або, інакше кажучи, виконати роботу проти сил зв'язку між ними. Такий підхід, що ґрунтується на законі збереження енергії, дає можливість зробити ряд важливих висновків про специфіку тих зв'язків, які утримують нуклони в ядрі.

Введемо поняття енергії зв'язку окремого нуклона в ядрі, тобто *питомої енергії зв'язку* $\Delta E_{\text{пит}}$. Це фізична величина, що дорівнює роботі, яку треба виконати, щоб видалити нуклон з ядра. Повна енергія зв'язку ядра визначається роботою, яку треба виконати, щоб розщепити ядро на нуклони, які його утворюють. Із закону збереження енергії випливає, що при утворенні ядра виділяється енергія, необхідна для розщеплення ядра на нуклони, з яких воно складається. Повну енергію зв'язку ядра характеризує величина Δm , яку називають *дефектом маси*. Під дефектом маси розуміють різницю між сумою мас протонів і нейтронів, які перебувають у вільному стані, і масою утвореного з них ядра. Якщо ядро з масою $M_{\text{я}}$, утворене із Z протонів з масою m_p кожний, і з $(A - Z)$ нейтронів з масою m_n кожний, то

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}. \quad (25.4)$$

Наявність дефекту маси показує, що для повного розщеплення ядра на нуклони (протони і нейтрони), які його утворюють, необхідно затратити енергію

$$\Delta E_{\text{зв}} = \Delta m c^2. \quad (25.5)$$

Величину $\Delta E_{\text{зв}}$ називають *енергією зв'язку (повною енергією зв'язку)*. Вона є безпосередньою мірою стійкості ядра.

В ядерній фізиці для обчислення енергій застосовують атомну одиницю енергії (а. о. е.) – величину, яка відповідає енергії однієї атомної одиниці маси:

$$\begin{aligned} 1 \text{ а. о. е.} &= 1c^2 \cdot 1 \text{ а. о. м.} = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2 / \text{с}^2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = \\ &= 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,1 \text{ МеВ.} \end{aligned}$$

Як було вже показано, питома енергія зв'язку – це енергія, що припадає на один нуклон:

$$\Delta E_{\text{пит}} = \frac{\Delta E_{\text{зв}}}{A}. \quad (25.6)$$

Питома енергія зв'язку дуже велика. Вона становить у середньому близько 8 МеВ на один нуклон.

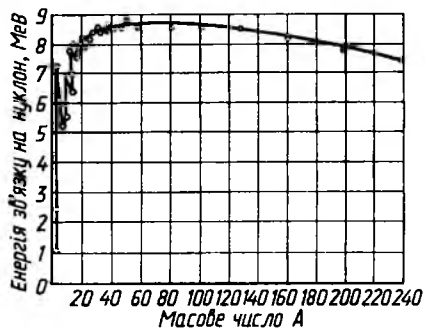


Рис. 25.7

На рис. 25.7 подано криву залежності питомої енергії зв'язку від масового числа A . З рисунка видно, що різні ядра мають різні значення $\Delta E_{\text{пит}}$.

Найміцніше пов'язані нуклони в ядрах середньої частини періодичної системи Менделєєва. У цих ядрах питома енергія зв'язку близька до 8,7 Мев. Із зростанням кількості нуклонів у ядрі питома енергія зв'язку зменшується. Для ядер, розміщених у кінці періодичної системи (наприклад, для урану), $\Delta E_{\text{пит}}$ приблизно становить 7,6 Мев.

Це свідчить про те, що для добування ядерної енергії принципово можливі два методи. Один ґрунтується на поділі важких ядер, другий – на синтезі легких.

§ 247. Ядерні сили

До складу ядра входять протони, які зазнають взаємного нуклонівського відштовхування, і нейтрони. Стійкість ядер, які не розлітаються під дією кулонівських сил відштовхування, свідчить про те, що в ядрах діють специфічні сили притягання, які називають *ядерними силами*. Ядерні сили не можуть бути звичайними силами кулонівської взаємодії. Кулонівська взаємодія між протоном і протоном зводиться до відштовхування, а між нейтроном і протоном та нейтроном і нейтроном її немає. Електричні сили залежать від заряду і малі порівняно з ядерними. Гравітаційні сили також не можуть удержувати частинки в ядрі, бо вони дуже малі. Наприклад, гравітаційна взаємодія двох протонів у 10^{36} разів менша від їх кулонівської взаємодії. Як ядерні сили не можуть бути і сили магнітної взаємодії. Розрахунки показують, що енергія магнітної взаємодії, наприклад протона і нейтрона в ядрі атома дейтерію ${}^2_1\text{H}$, становить близько 0,1 Мев, що значно менше від енергії зв'язку нуклонів у ядрі (2,2 Мев).

Усе це свідчить про те, що ядерні сили не можна звести ні до електричних, ні до магнітних, ні до гравітаційних, вони є специфічним видом сил.

Взаємодія між нуклонами в ядрі є прикладом сильних взаємодій – взаємодій через ядерні сили.

Ядерні сили мають ряд характерних властивостей:

1) вони є силами притягання;

2) це короткодійні сили, їх дія проявляється на відстані порядку 10^{-15} м. Відстань, на якій діють ядерні сили, називають *радіусом дії ядерних сил*;

3) ядерні сили мають *властивість зарядової незалежності*: ядерні сили, які діють між протоном і нейтроном, між двома протонами або між двома нейтронами, однакові;

4) ядерні сили не є центральними, як, наприклад, сили гравітаційні і кулонівські;

5) ядерні сили мають властивість насичення.

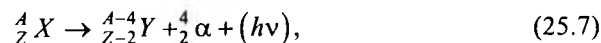
Кожний нуклон взаємодіє не з усіма нуклонами ядра, а тільки з обмеженою кількістю найближчих до нього нуклонів. Наслідком цієї властивості є майже лінійна залежність енергії зв'язку в ядрі від масового числа A . Якби насичення не було, то кожний нуклон у ядрі взаємодівав би з рештою $(A-1)$ нуклонів і енергія зв'язку була б пропорційна кількості пар нуклонів у ядрі, тобто A^2 . Крім того, питома енергія зв'язку нуклонів у ядрі, якщо кількість нуклонів збільшується, приблизно стала (рис. 25.7). Прикладом повного насичення ядерних сил може бути ядро атома гелію, тобто α -частинка, яка є стійким утворенням з двох протонів і двох нейтронів.

Ядерні сили докладно ще не вивчено. Закінченої теорії ядерних сил немає, але припускають, що "чистих" протонів і нейтронів у ядрі немає, є ядерна речовина, яка може бути в двох станах – мати позитивний заряд або не мати заряду. За гіпотезою, яку висловив у 1935 р. японський фізик Х. Юкава, в ядрах протони і нейтрони з величезною швидкістю ніби обмінюються частинками, що мають масу в 200–300 разів більшу, ніж електрон. Пізніше ці частинки назвали π -мезонами. За сучасними уявленнями, нуклон має таку будову: у центрі нуклона розміщене ядро-кern, радіус якого $\approx 0,3 \cdot 10^{-15}$ м. Kern оточений "хмарою", яка складається з мезонів. Носіями ядерних сил є π -мезони: позитивний π^+ , негативний π^- і нейтральний π^0 .

§ 248. Альфа-розпад. Правило зміщення

Нуклони в атомних ядрах перебувають у стані руху і взаємних перетворень, це впливає на розподіл енергії між частинками атомного ядра в часі. Найстійкішими з усіх утворень всередині ядра є утворення з двох протонів і двох нейтронів. При ймовірнісному розподілі енергії між частинками ядра можливо, що саме це утворення матиме значну частину енергії ядра і за певних умов може покинути ядро у вигляді α -частинки. Перетворення атомних ядер, яке супроводиться випускан-

ням α -частинок, називають α -розпадом. Якщо ${}^A_Z X$ – материнське ядро, то при α -розпаді воно перетворюється за схемою



де ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ – символ дочірнього ядра; ${}^4_2 \alpha$ – ядро атома гелію ${}^4_2 \text{He}$ (α -частинка); $h\nu$ – квант, що випускається ядром ${}^{A-4}_{Z-2} Y$, яке перебуває в збудженому стані.

Як видно з (25.7),

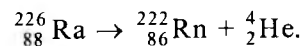
α -розпад зменшує масове число ядра на 4, а заряд ядра – на 2 елементарні позитивні заряди,

тобто хімічний елемент переміщується на дві клітинки вліво в періодичній системі елементів Менделєєва.

Це положення називають *правилом зміщення*. Воно впливає із закону збереження електричного заряду і масового числа:

сума зарядів (а також масових чисел) продуктів розпаду дорівнює заряду (масовому числу) вихідного ядра.

Проілюструємо цей закон на прикладі α -розпаду радію:



Швидкості, з якими α -частинки вилітають з ядра, становлять приблизно 10^7 м/с, що відповідають енергії порядку кількох мегаелектрон-вольт. Рухаючись у речовині, α -частинки іонізують атоми або молекули речовини, втрачаючи при цьому енергію і утворюючи на своєму шляху близько 10^5 пар іонів. Витративши свою енергію на іонізацію, α -частинка приєднує два електрони і стає нейтральним атомом гелію. Під *пробігом* α -частинки розуміють ту відстань у речовині, на якій вона іонізує. Експериментальні дані свідчать про те, що швидкості, а отже, й енергії α -частинок, які виникають внаслідок α -розпаду ядра, мають певні для даного ядра значення.

§ 249. Бета-розпад. Нейтрино

В ядрах здійснюється й інший вид перетворень, пов'язаний з перетворенням нуклонів. Як показали дослідження, радіоактивні ядра можуть викидати потік електронів. Цей вид розпаду назвали β -розпадом. Вивчення β -розпаду показало, що β -частинки (електрони), які вилітають з ядер

певного елемента, виносять різну енергію аж до значення E_{max} , але енергія частинок, які вилітають, завжди менша від різниці енергій ядер до і після β -розпаду.

Неперервність енергетичного спектра електронів при β -розпаді зображено на рис. 25.8. Як видно з рисунка, неперервна крива розподілу за енергіями числа N електронів, які покинули ядро, обривається на межі E_{max} .

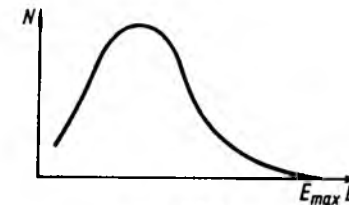


Рис. 25.8

За правилом зміщення масове число ядра при розпаді не змінюється:



Як видно з (25.8), при β -розпаді хімічний елемент переміщується на одну клітинку вправо в періодичній системі Менделєєва. Якщо масове число не змінюється, то не повинен змінюватись і сумарний спін усіх нуклонів у ядрі, але електрон, що має спін $\pm 1/2$, змінює спін ядра. Проте при β -розпаді спін ядра не змінюється. Аналізуючи дослідні дані, В. Паулі припустив, що **разом з електроном з ядра має вилітати ще одна частинка ν , яка дістала назву нейтрино.**

Вона не має заряду і маси спокою, але повинна мати спін, що дорівнює спіну електрона $\pm 1/2$. Якщо електрон і нейтрино вилітають з ядра одночасно, то їх спіни орієнтовані у взаємно протилежних напрямках, тому сумарний спін ядра не змінюється.

Гіпотеза про виникнення нейтрино пояснює і неперервність енергетичного спектра електронів при β -розпаді. Розподіл енергії між електроном і нейтрино має статистичний характер. Отже, $E_\beta + E_\nu = E_{\text{max}}$.

Таким чином, неперервний енергетичний спектр має бути обмежений з боку великих значень енергії (рис. 25.8).

Протон-нейтронна будова ядра виключає можливість вилітання з ядра електронів, оскільки їх в ядрі немає. Тому теоретичне тлумачення β -розпаду тривалий час було важким завданням ядерної фізики. Вихід із становища, що склалося, запропонував Е. Фермі.

За гіпотезою Е. Фермі, який розробив теорію β -розпаду,

в ядрі можливі взаємні перетворення нуклонів, внаслідок яких виникають електрони ${}^0_1 e$ і антинейтрино $\bar{\nu}$ -частинка, яка не має маси спокою і електричного заряду.

* Після відкриття позитрона і здійснення штучних перетворень атомних ядер, які супроводяться позитронним β^+ -розпадом, було встановлено, що нейтральною частинкою, яка бере участь у цьому розпаді, є нейтрино, а в електронному розпаді бере участь й античастинка – антинейтрино.

Такий процес зумовлений особливим типом взаємодії – *слабкою взаємодією*:



Ці перетворення супроводяться виділенням енергії, оскільки маса нейтрона більша від маси протона. Часто β -розпад супроводиться випусканням γ -випромінювання, яке виникає при переході дочірнього ядра, що утворюється при γ -розпаді, із збудженого в нормальний стан.

При проходженні β -частинок через речовину вони втрачають свою енергію на іонізацію і гальмівне випромінювання.

§ 25.0. Гамма-випромінювання. Позитрон

Гамма-випромінювання відкрив П. Віллар у 1900 р. Опромінюючи α - і β -частинками свинець, Віллар виявив залишкове випромінювання, яке проявляло слабку іонізуючу дію і не відхилялось у магнітному полі; його назвали γ -випромінюванням. Проникна здатність цього випромінювання була вища, ніж у найбільш жорсткого рентгенівського випромінювання.

Гамма-випромінювання, як і рентгенівське, – це електромагнітне випромінювання, вони відрізняються одне від одного тільки своїм походженням і енергією. Якщо рентгенівське випромінювання випускається при збудженні або віддаленні орбітальних електронів або гальмуванні швидких електронів, то γ -випромінювання виникає при ядерних перетвореннях.

У процесі γ -випромінювання виділяється енергія збудження ядра. Ядро може перейти в збуджений стан внаслідок радіоактивного розпаду або штучно спричинених ядерних перетворень. Гамма-випромінювання, яке виникає при певній ядерній реакції, утворене квантами однієї енергії або групою квантів з дискретними значеннями енергії. Найчастіше γ -випромінювання ядер має енергію в діапазоні від кількох кілоелектрон-вольт до кількох мегаелектрон-вольт.

Якщо γ -випромінювання проходить через речовину, то інтенсивність початкового пучка послаблюється. Це послаблення інтенсивності є результатом взаємодії γ -квантів з електронами і атомами речовини, через яку вони проходять. Практично найістотніші три процеси взаємодії γ -випромінювання з речовиною: фотоефект, комптонівське розсіяння і утворення пар.

Фотоефект

Фотоефектом називають такий процес взаємодії γ -кванта з речовиною, при якому γ -квант зникає, повністю передаючи свою енергію та імпульс електрону й атому. При цьому електрон викидається за межі атома. Фотоефект найбільш можливий тоді, коли енергія γ -кванта близька до значення роботи виходу електрона з речовини. Послаблення випромінювання внаслідок фотоефекту має основне значення при малих енергіях ($E_\gamma \leq 1 \text{ MeV}$).

Фотоефект можливий лише на зв'язаному і не може відбуватися на вільному електроні.

Комптонівське розсіяння

Крім фотоефекту, при якому γ -квант перестає існувати, взаємодія γ -випромінювання з середовищем може спричинити їх розсіяння, тобто їх відхилення від початкового напрямку (рис. 25.9). Якщо γ -кванти мають значну (понад 1 MeV) енергію $h\nu$, то, потрапляючи в речовину, вони можуть розсіюватись на вільних або слабкозв'язаних електронах речовини, віддаючи частину своєї енергії цим електронам і змінюючи напрям свого поширення, при цьому змінюється довжина хвилі розсіяного γ -кванта ($h\nu'$). Зміна

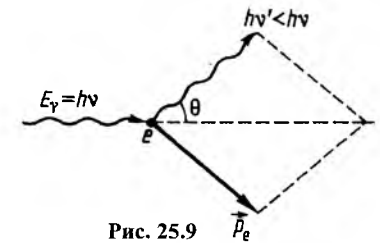


Рис. 25.9

довжини хвилі внаслідок розсіяння залежить лише від кута розсіяння θ і не залежить від довжини хвилі падаючого кванта і від роду розсіюючої речовини. Електрон, на якому розсіюється γ -квант, дістає енергію, що дорівнює різниці енергій падаючого і розсіяного квантів ($h\nu - h\nu'$).

Утворення пар

При вищих значеннях енергії γ -випромінювання спостерігається утворення пар. За сучасною теорією, падаючий γ -квант повністю поглинається в області кулонівського поля ядра, внаслідок чого виникає пара частинок: електрон ${}^0_{-1}e$ і позитрон ${}^0_{+1}e$. Можливість існування по-

зитрона передбачив П. Дірак за два роки до його відкриття. Він довів можливість утворення пари електрон–позитрон з фотона. Експериментально позитрон виявив К. Андерсон у 1932 р. в процесі вивчення складу космічного проміння за допомогою камери Вільсона, вміщеної в магнітне поле. Під час досліджень було встановлено, що в тому самому місці камери з'являються дві (пара) частинки, які відхиляються в різні боки в магнітному полі.

З цього випливало, що їх заряди різнойменні. Характер треків і кривизна шляхів доказували, що маси обох частинок однакові. Тепер з великою точністю встановлено, що позитрон за своїми властивостями подібний до електрона, але відрізняється знаком заряду.

Процес утворення пари пов'язаний із затратою енергії 0,51 MeV (енергія спокою) на кожну частинку. Отже, мінімальна енергія γ -кванта, потрібна для створення електрон-позитронної пари, $E_0 = 2m_0c^2 = 1,02$ MeV. Уся надлишкова енергія, яку має γ -квант понад 1,02 MeV, переходить у кінетичну енергію утворених частинок.

§ 251. Космічне випромінювання

У 1909–1910 рр. В. Гесс і В. Кольчерстер, досліджуючи ступінь іонізації повітря на різних висотах, встановили:

повітря біля поверхні Землі іонізується частково її радіоактивним випромінюванням, а частково – дією якихось дуже проникних променів.

Якби повітря іонізувалось лише дією радіоактивного випромінювання, то з віддаленням від поверхні Землі його інтенсивність і, як наслідок, іонізація повітря мали б зменшуватись. Але результати дослідів показали, що

на висоті близько 5000 м іонізація повітря була в три рази більша, ніж біля поверхні Землі.

З'ясувалося, що це зумовлено космічним випромінюванням, яке приходить із світового простору. Космічне випромінювання ділиться на первинне і вторинне.

Первинне, яке падає на Землю із світового простору, – це потік частинок, що рухаються із швидкостями, близькими до швидкості світла. Космічне випромінювання за своєю проникною здатністю переважає всі інші види випромінювань. Середня енергія первинних космічних частинок близько 10^{10} eV, а енергія окремих частинок досягає 10^{19} eV і більше.

Безпосередні вимірювання за допомогою іонізаційних камер, лічильників і ядерних емульсій, піднятих на повітряних кулях і ракетах, дали можливість встановити, що понад 90 % первинних частинок – це протони, решта – α -частинки та інші, ядра важчих елементів. До складу космічного випромінювання входять нейтринне і γ -випромінювання.

Відносна частка основних компонентів первинного космічного проміння

Група ядер	Зарядове число	Масове число A (усереднене)	% у загальному потоці
Протони	1	1	92,9
Ядра:			
гелію (α -частинки)	2	4	6,3
легкі	3–5	10	0,13
середні	6–9	14	0,4
важкі	≥ 10	31	0,18
надважкі	≥ 20	51	0,05

Первинне космічне випромінювання має в основному галактичне походження, а окремі частинки з енергією понад 10^{17} eV/нуклон, можливо, зароджуються поза нашою Галактикою.

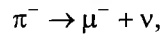
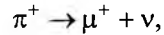
Інтенсивність космічного випромінювання не стала в часі – це пов'язано із зміною активності Сонця. Під час сонячних спалахів відхилення інтенсивності космічного проміння від середнього значення може досягати десятків і навіть сотень процентів; отже, деяка частина космічного проміння генерується Сонцем.

Первинні частинки космічного проміння стикаються з ядрами атомів у верхніх шарах атмосфери, утворюючи *вторинне випромінювання*: на висотах нижче від 20 км космічне проміння практично повністю має вторинний характер. Оскільки ядра первинного космічного проміння мають дуже велику енергію, вони породжують групи частинок, які розмножуються лавиноподібно, – каскадні ядерні зливи. Ці зливи генетично зв'язані між собою і зумовлені багаторазовими електромагнітними і ядерними взаємодіями в атмосфері.

Зливи вперше виявив у 1928 р. академік Д. В. Скобельцин, який сфотографував сліди космічних частинок у камері Вільсона. Подальшими дослідженнями було встановлено, що біля поверхні Землі космічне проміння складається з двох компонентів – м'якого і жорсткого. М'який компонент – це потік γ -квантів, електронів і позитронів. У 1938 р. К. Андерсон і С. Ніддермейер показали, що жорсткий компонент – це потік приблизно однакової кількості позитивно і негативно заряджених частинок з масою, яка дорівнює приблизно $207 m_e$, і часом життя $2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Ці частинки назвали *мюонами* (μ^+ , μ^-). У 1947 р. С. Пауелл встановив, що при взаємодії первинного космічного випромінювання з атомними ядрами виникають невідомі раніше заряджені частинки з масою $273 m_e$. Ці частинки назвали *π -мезонами* (π^+ , π^-) або *піонами*. Їх час життя у вільному стані $2,55 \cdot 10^{-8}$ с. У 1950 р. було відкрито нейтральний

π -мезон, його маса дорівнює $264,2 m_e$, час життя – менше $2,1 \cdot 10^{-16}$ с. Піони інтенсивно взаємодіють з нуклонами, тобто є *ядерно-активними частинками*.

Існування цих частинок передбачив Х. Юкава для пояснення природи ядерних сил. Маючи малий час життя, вони розпадаються за схемою



породжуючи частинки жорсткого космічного компонента. На відміну від піонів мюони не беруть участі в ядерних взаємодіях і витрачають свою енергію тільки на іонізацію, породжуючи в атмосфері каскадні зливи, тобто м'який компонент космічного випромінювання.

Радіаційні пояси Землі

Перші відомості про розподіл заряджених частинок поблизу Землі було добуто за допомогою другого радянського штучного супутника Землі. У навколосемному просторі існують області, в яких густина заряджених частинок, захоплених магнітним полем Землі, перевищує густину частинок первинного космічного випромінювання в міжпланетному просторі в сотні мільйонів разів. Ці області називають *радіаційними поясами*.

Раніше вважали, що Земля оточена двома чи трьома радіаційними поясами. Нині встановлено, що радіаційний пояс Землі – це єдине утворення. Внутрішня межа радіаційного поясу в площині екватора лежить на відстані 600 км від поверхні Землі в західній півкулі і близько 1600 км у східній. Зовнішня межа поясу в площині екватора лежить на відстані 8–10 радіусів Землі. Несиметричні розміщення радіаційного поясу Землі пояснюються тим, що рух заряджених частинок визначається структурою магнітного поля Землі. Вивчення радіаційних поясів і космічного випромінювання – джерело одержання інформації із світового простору. Космічне випромінювання має певний вплив на організм людини, що необхідно враховувати під час космічних польотів.

§ 252. Елементарні частинки

За змістом термін “елементарна” частинка означає “найпростіша”, “далі неподільна” частинка. Проте частинки, які називають елементарними, не зовсім відповідають такому визначенню. Дати тепер точне визначення елементарної частинки не можна. Це поняття дуже складне, і

ряд експериментальних фактів свідчить про те, що існує структура елементарних частинок (наприклад, нуклонів).

Історично першою експериментально виявленою елементарною частинкою є електрон. Дж. Дж. Томсон, досліджуючи властивості катодних променів, установив, що вони є потоком негативно заряджених частинок – електронів. Дата відкриття першої елементарної частинки – 29 квітня 1897 р.

У 1900 р. М. Планк показав, що світло – це потік частинок, названих *фотонами*. Фотон не має електричного заряду, і його маса спокою дорівнює нулю, тобто фотон може існувати тільки в процесі руху зі швидкістю світла.

У результаті досліджень Резерфорда з розсіювання α -частинок у процесі проходження крізь речовину в 1911 р. було відкрито *протон* – ядро атома водню. Протон має позитивний електричний заряд, який за модулем дорівнює заряду електрона, його маса в 1836 разів більша від маси електрона.

У 1928 р. П. Дірак передбачив, а К. Андерсон виявив у складі космічного проміння частинки, які назвали *позитронами*. Маса спокою позитрона збігається з масою спокою електрона, а заряд – із зарядом протона. Дж. Чедвік у 1932 р. відкрив *нейтрон*, його маса близька до маси протона: $m_n = 1838 m_e$. Електричний заряд нейтрона дорівнює нулю.

У 1931–1935 рр. П. Паулі, пояснюючи закономірності β -розпаду, припустив, що існує ще одна нейтральна елементарна частинка з масою спокою, яка дорівнює нулю, – *нейтрино*. Експериментально цю частинку виявив у 1956 р. К. Коуен в ядерному реакторі. Як було зазначено в попередньому параграфі, К. Андерсон і С. Ніддермейєр, відкрили *мюони*, С. Пауелл – *π -мезони*. З 1950 р. кількість відкритих елементарних частинок почала швидко зростати. Були відкриті *K-мезони*, їх маси лежать у межах $966–974 m_e$; *K-мезони* можуть мати позитивний, негативний і такий, що дорівнює нулю, заряди. Наступною великою групою є *гіперони* з масами від 2180 до $3278 m_e$. Останніми роками було відкрито частинки з дуже малим часом життя – *резонанси*, їх безпосередньо не спостерігали, але про їх існування роблять висновок з аналізу поведінки продуктів їх розпаду. Тепер налічується понад 200 елементарних частинок. Більшість із них нестабільна і поступово перетворюється в легші елементарні частинки.

§ 253. Частинки й античастинки

Античастинки

Після відкриття першої античастинки – позитрона – постало питання про існування античастинок і в інших частинках. Перші антипротони було добуто експериментально в 1955 р. при бомбардуванні мідної

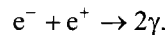
мішені протонами з енергією порядку 6 ГеВ. У 1956 р. було відкрито антинейтрон. Нині встановлено, що

кожній елементарній частинці відповідає своя античастинка з точно такою самою масою, спіном, але із зарядом протилежного знака.

Так, електрону з негативним зарядом відповідає позитрон з позитивним зарядом. Протону з позитивним зарядом відповідає антипротон з негативним зарядом. Антинейтрон відрізняється від нейтрона знаком власного магнітного моменту. Частинка і античастинка в таких незаряджених частинках, як фотон і π^0 -мезон, за фізичними властивостями нерозрізненні.

Взаємне перетворення речовини і поля

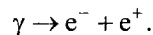
Електрон і позитрон, стикаючись, перетворюються в квант електромагнітного випромінювання з вивільненням енергії:



Це явище назвали *анігіляцією*. Анігілюють не тільки електрони і позитрони, а й будь-яка частинка від зіткнення із своєю античастинкою.

Якщо існує процес анігіляції, тобто перетворення речовини в кванти електромагнітного поля, то має існувати і зворотний процес – перетворення квантів поля в речовину.

У 1932 р. Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі встановили, що γ -квант з енергією, більшою від сумарної енергії спокою електрона і позитрона $E_\gamma > 2m_0c^2 = 1,02$ МеВ, при проходженні поблизу ядра атома може перетворитися в пару електрон–позитрон:



Явища народження електрон–позитронних пар і анігіляція показують, що

дві форми матерії (речовина і поле) можуть взаємно перетворюватися.

Процес анігіляції супроводиться величезним виділенням енергії. Так, якщо під час ядерних реакцій виділення енергії на одиницю маси в мільйони разів перевищує виділення енергії в звичайних хімічних реакціях, то в процесі анігіляції виділення енергії в мільйони разів перевищує енергію, виділену під час ядерних реакцій. Оскільки при анігіляціях вся енергія частинок, які взаємодіють, повністю перетворюється в інші форми енергії, то анігіляція є максимально інтенсивним з усіх можливих джерел енергії.

§ 254. Основні властивості елементарних частинок і їх класифікація

Типи взаємодії частинок

Елементарні частинки взаємодіють одна з одною. Залежно від типу частинки і виду процесу реалізуються чотири типи взаємодії, кожній з яких відповідає своє поле.

Сильна, або ядерна, взаємодія забезпечує зв'язок нуклонів (протонів, нейтронів) у ядрі. Найбільша відстань, на якій проявляється сильна взаємодія, збігається з радіусом ядра атома $\sim 10^{-15}$ м. Сильна взаємодія в ядрі зумовлена π -мезонним обміном між нуклонами.

Електромагнітна взаємодія буває між електрично зарядженими частинками. Вона в 137 раз слабша від сильної взаємодії. Радіус її дії не обмежений. Електромагнітна взаємодія здійснюється через електромагнітне поле. Це найбільш вивчений клас взаємодій.

Слабка взаємодія проявляється переважно під час розпаду елементарних частинок. Вона в 10^{14} разів слабша від ядерної. Прикладом прояву слабкої взаємодії є β -розпад. Слабка взаємодія, як і сильна, короткодійча.

Елементарні частинки взаємодіють між собою також і гравітаційно. *Гравітаційна взаємодія* в 10^{39} разів слабша від сильної, тому її, як правило, до уваги не беруть.

Характеристика елементарних частинок

До найважливіших характеристик, які визначають властивості елементарних частинок, належать їх маса, електричний заряд, спін і час життя.

Як видно з таблиці, залежно від спільності деяких властивостей подані тут частинки ділять на чотири основні групи: *лептони* (легкі частинки), *мезони* (середні), *баріони* (важкі); особливу групу становлять *фотони*, в яких маса спокою і електричний заряд дорівнюють нулю, а спін – одиниці.

Залежно від значення спіну всі частинки ділять на *ферміони* (частинки з півцілим спіном $s = 1/2$) і *бозони* (частинки, які мають нульовий ($s = 0$) або цілий ($s = 1$) спін). Залежно від часу життя частинки є стабільні і нестабільні.

Кварки

У 1964 р. М. Гелл-Манн і Дж. Цвейг висловили гіпотезу, за якою всі мезони і баріони побудовані з найпростіших частинок, їх назвали *кварками*. За цією гіпотезою, баріони складаються з трьох кварків: *u, d, S*,

Найважливіші характеристики

Назва частинки	Символ частинки	Символ античастинки	Маса спокою (в електронних масах)
Фотон			
Фотон	γ	γ	0
Лептони			
Електронне нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0
Мюонне нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0
Електрон	e^-	e^+	1
Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,8
Мезони			
Пі-плюс	π^+	π^-	273,2
Пі-нуль	π^0	π^0	264,2
Ка-плюс	K^+	K^-	966,6
Ка-нуль	K^0	K^0	974,8
Баріони			
Протон	p	\bar{p}	1836,1
Нейтрон	n	\bar{n}	1838,6
Ламбда-нуль	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2182,8
Сигма-плюс	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,7
Сигма-нуль	Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2331,8
Сигма-мінус	Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2340,6
Ксі-нуль	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2566,0
Ксі-мінус	Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2580,2
Омега-мінус	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3298,0

а антибаріони – з трьох антикварків. Ці кварки повинні мати півцілий спінін, їх електричний заряд має дорівнювати 1/3 або 2/3 заряду електрона. Потім було висловлено припущення про існування ще двох кварків – “зачарованого” і “красивого” – з відповідними антикварками. Комбінації кварків і антикварків дали всі відомі мезони. За сучасними уявленнями,

елементарних частинки

Заряд частинки	Спін частинки (в одиницях)	Середній час життя, с	Основний тип розпаду
Фотон			
0	1	Стабільний	–
Лептони			
0	1/2	Стабільний	–
0	1/2	„	–
-1	1/2	„	–
-1	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
Мезони			
+1	0	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
0	0	$1,9 \cdot 10^{-16}$	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
+1	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
0	0	$1,0 \cdot 10^{-10} (K_1^0)$	$K_1^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
		$6,1 \cdot 10^{-8} (K_2^0)$	$K_2^0 \rightarrow 3\pi^0$
Баріони			
+1	1/2	Стабільний	–
0	1/2	$1,0 \cdot 10^3$	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
0	1/2	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$
+1	1/2	$8 \cdot 10^{-11}$	$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$
0	1/2	$< 10^{-11}$	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$
-1	1/2	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$
0	1/2	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$
-1	1/2	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
-1	3/2	$\sim 10^{-10}$	$\Omega^- \rightarrow \xi^- + \pi^0$

кварки не мають внутрішньої структури, в цьому розумінні їх можна вважати справді елементарними частинками.

Хоча гіпотеза кварків була вдалою, оскільки вона давала можливість з єдиних позицій пояснити властивості більшості елементарних частинки, але кварків у вільному стані в космічному промінні і навколишньому се-

редовищі не виявлено, незважаючи на численні пошуки на прискорювачах високих енергій. Тепер важко говорити про те, збережеться ця гіпотеза чи на зміну їй прийде інша. Важливо те, що покладено початок створенню єдиної теорії, яка об'єднує чотири фундаментальні взаємодії.

§ 255. Ядерні реакції. Штучна радіоактивність

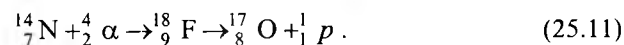
Ядерні реакції

Під ядерними реакціями розуміють штучне перетворення атомних ядер внаслідок їх взаємодії як один з одним, так і з ядерними частинками. Під час ядерних реакцій додержуються закони збереження сумарного електричного заряду, числа нуклонів, енергії, імпульсу, моменту імпульсу. Всі ядерні реакції характеризуються енергією, яка виділяється або поглинається в процесі їх перебігу. Реакції, що супроводяться виділенням енергії, називаються *екзотермічними*, а поглинанням енергії – *ендотермічними*.

Згідно з теорією, яку запропонував Бор, ядерна реакція відбувається за два етапи. На першому етапі ядро – мішень A – зливається з бомбардуючою частинкою a , утворюючи нове ядро C^* , яке буде в збудженому стані: $A + a \rightarrow C^*$. На другому етапі збуджене ядро C^* розпадається на кінцеві продукти ядерної реакції: $C^* \rightarrow b + B$. Таким чином, ядерна реакція відбувається за схемою



Одна з перших ядерних реакцій – сполучення ядер азоту з ядрами гелію (α -частинками). Цю реакцію здійснив Резерфорд у 1919 р. Бомбардуючи азот α -частинками, Резерфорд виявив виникнення протонів. При цьому ядро азоту, яке поглинуло α -частинку, утворює збуджене ядро ${}^{18}_9\text{F}$, що розпадається на кінцеві продукти реакції ${}^{17}_8\text{O}$ і ${}^1_1\text{p}$:



Протони реєструвалися спочатку методом сцинтиляції, а потім камерою Вільсона.

Ядерні реакції класифікують: 1) за енергіями частинок, які їх спричинюють (малі енергії ≈ 100 еВ середні ≈ 1 МеВ, великі ≈ 50 МеВ); 2) за видом ядер, що беруть у них участь (реакції на легких ($A < 50$), середніх ($50 < A < 100$) і важких ядрах ($A > 100$)); 3) за природою бомбардуючих частинок (реакції під дією нейтронів, квантів, заряджених частинок); для реакцій, які відбуваються під дією заряджених частинок, потрібно, щоб частинки мали енергію, достатню для подолання кулонівського поля ядра; 4) за характером ядерних перетворень.

Існування в ядрі нейтральної частинки (нейтрона), яке передбачив Резерфорд у 1920 р., підтвердили в 1932 р. Боте і Беккер при обстрілюванні ядер берилію α -частинками:



Пізніше було з'ясовано, що

нейтрон радіоактивний, період його піврозпаду $T = 12$ хв.

За допомогою реакцій було підтверджено можливість перетворення одних хімічних елементів в інші та відкрито можливість добути штучно радіоактивні елементи.

Принципової різниці між штучною і природною радіоактивністю немає, оскільки властивості ізотопу не залежать від способу його утворення й ізотоп, добутий штучно, нічим не відрізняється від такого самого природного ізотопу.

Штучна радіоактивність пов'язана з порушенням стабільності атомного ядра. *Стабільні* ядра елементів, в яких кількість протонів дорівнює кількості нейтронів.

Якщо в легких ядрах ($A < 50$) штучно створити надлишкову кількість нейтронів, то стабільність ядра порушиться, виникне β -радіоактивність. Прикладом такої реакції є перетворення стабільного ізотопу ${}^{27}_{13}\text{Al}$ від бомбардування дейтронами в радіоактивний ізотоп ${}^{28}_{13}\text{Al}$, який зазнає β -розпаду:



Якщо стабільність ядра порушити, створивши надлишкову кількість протонів у ядрі, то це призводить до зростання енергії ядра і супроводиться штучною β^+ -радіоактивністю. При цьому розпад відбувається за схемою



З урахуванням правил зміщення утворений елемент переміщується в таблиці Менделєєва на одну клітинку вліво.

§ 256. Поділ важких ядер

Відкриття в 1932 р. нейтрона і штучної радіоактивності в 1934 р. стало поворотним пунктом у дослідженні ядерних реакцій. Починаючи з 1934 р. Фермі із співробітниками опромінювали нейтронами майже всі елементи періодичної системи. Звичайно при нейтронному бомбардуванні ядро ${}^A_Z\text{X}$, захоплюючи нейтрон, переходить у збуджений стан ${}^{A+1}_Z\text{X}$, яке, випускаючи електрон, перетворюється в ядро стійкого ізотопу ${}^{A+1}_{Z+1}\text{X}$. У 1938–1939 рр. німецькі фізики О. Ган і Ф. Штрассман встановили,

що при бомбардуванні урану його ядро ділиться на два (рідко три) осколки з виділенням великої кількості енергії. Внаслідок поділу ядер урану утворились нові елементи, що належать до середньої частини періодичної системи, – барій, лантан та ін. Стало очевидно, що початкова реакція з ядрами урану ускладнюється великою кількістю якихось наступних процесів.

Експериментальні результати пояснили Л. Мейтнер і О. Фріш, які висловили припущення, що ядро урану, яке поглинуло нейтрон, ділиться на два ядра (осколки) приблизно з однаковими зарядовими і масовими числами. У нормальному стані важке ядро має більш або менш сферичну форму. Ядро, захопивши тепловий нейтрон *, переходить у збуджений стан з енергією збудження, яка дорівнює енергії і зв'язку захопленого нейтрона (5,8–7,5 МеВ). Рух нуклонів у ядрі стає інтенсивнішим, форма ядра швидко і хаотично змінюється. Воно то витягується, то стискується, тобто зазнає деформації, як краплина рідини, наприклад ртуті. Внаслідок деформації утворюється перетяжка, аналогічна перетяжці між двома частинами краплини рідини, яка роздвоюється.

Якщо кулонівські сили відштовхування між протонами менші від ядерних сил притягання, то ядро, не поділившись, випромінює квант або нейтрон і перейде в основний стан. Якщо кулонівські сили відштовхування між протонами переважатимуть над ядерними силами притягання краплини, яка роздвоюється, то ядро поділиться на дві частини. При цьому з ядра вилітають 2–3 вторинні нейтрони. Оскільки осколки позитивно заряджені, то, відштовхуючись під дією кулонівських сил, вони розлітаються з великою швидкістю. Експериментальні дані показують, що більша частина вторинних нейтронів виділяється із збуджених осколків, коли вони розлітаються.

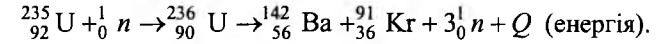
Ядра-осколки, які виникли в процесі поділу, радіоактивні, їх радіоактивність зумовлена тим, що вони мають надлишок нейтронів над протонами порівняно з ядрами стійких ізотопів. Такі ядра-осколки рядом розпадів зменшують свій надлишок нейтронів, перетворюючись у стабільні ядра.

Можливість поділу важких ядер можна пояснити на основі залежності питомої енергії зв'язку від масового числа A (див. рис. 25.7). З цієї залежності випливає, що важкі ядра мають питому енергію зв'язку, на 1 МеВ меншу, ніж ядра елементів, розміщених у середній частині таблиці Менделєєва. Процес поділу важких ядер енергетично вигідний, оскільки в акті поділу беруть участь до 200 нуклонів, тобто поділ одного ядра має супроводитись виділенням енергії приблизно 200 МеВ, причому більша частина цієї енергії (≈ 165 МеВ) припадає на кінетичну енергію осколків поділу.

Продукти поділу дуже різноманітні, їх налічується понад 200 видів. Найбільш імовірні значення мас осколків припадають на 95 і 139. Поділ

* Енергія нейтронів, які виділяються під час ядерних реакцій, лежить у межах від декількох часток електрон-вольта до 200 МеВ. Нейтрони з енергіями 0,005–0,5 еВ називають тепловими, нейтрони з $E > 1$ МеВ – швидкими.

на осколки однакової маси менш імовірний і відбувається дуже рідко. Найтипівішим прикладом реакції поділу є



Подальші дослідження показали, що під дією нейтронів можуть ділитися ядра й інших важких елементів: ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{94}^{242}\text{Pu}$, ${}_{90}^{232}\text{Th}$ тощо. Одні ядра важких елементів діляться під дією швидких нейтронів (наприклад, ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{90}^{232}\text{Th}$), інші – під дією теплових (наприклад, ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{94}^{242}\text{Pu}$)

У 1940 р. радянські фізики Г. М. Фльоров і К. О. Петржак встановили, що ядра деяких важких елементів можуть зазнавати спонтанного (мимовільного) поділу. Ймовірність цього процесу дуже мала, а період піврозпаду при цьому становить $8 \cdot 10^{15}$ років для ${}_{92}^{238}\text{U}$ і 10^{20} років для ${}_{90}^{232}\text{Th}$.

§ 257. Ланцюгова ядерна реакція

Відкриття поділу ядер урану і деяких важких елементів дало можливість практично здійснити ланцюгову ядерну реакцію. У § 256 було показано, що при поділі ядра урану, крім ядер-осколків, вилітають 2–3 нейтрони. За сприятливих умов ці нейтрони можуть влучати в інші ядра урану, спричинюючи їх поділ. При поділі 2–3 ядер урану вивільняється вже 4–9 нейтронів, які можуть спричинити поділ нових ядер урану з утворенням 8–27 нейтронів і т. д. (рис. 25.10); виникає самопід-тримуючий процес поділу, який і називають ланцюговою ядерною реакцією.

Ланцюгова реакція супроводиться значним виділенням енергії, тобто є екзотермічною. У попередньому параграфі було показано, що при поділі одного ядра урану виділяється енергія приблизно 200 МеВ. Визначимо, яка енергія вивільняється від поділу всіх ядер, що містяться в 1 кг ($2,5 \cdot 10^{24}$ ядер) урану-235:

$$E \approx 2 \cdot 10^2 \text{ МеВ} \cdot 2,5 \cdot 10^{24} = \\ = 5 \cdot 10^{26} \text{ МеВ} = 8 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$$

Ця енергія еквівалентна тій енергії, яку дістають від згоряння приблизно 1800 т бензину або 2500 т кам'яного вугілля. Величезне значення вивільненої енергії спонукало вчених та інженерів шукати шляхи використання ланцюгової ядерної енергії в практичних (як мирних, так і воєнних) цілях. Практичне здійснення ланцюгових ядерних реакцій – не таке просте завдання, як здається на перший погляд.

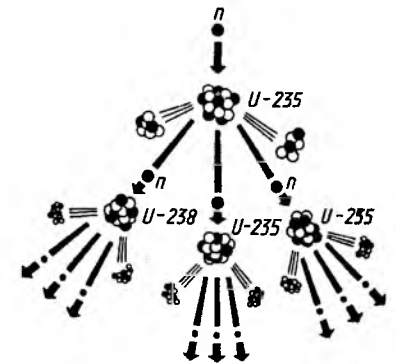


Рис. 25.10

Справа в тому, що природний уран в основному складається з двох нуклідів: 99,3 % $^{238}_{92}\text{U}$ і 0,7 % $^{235}_{92}\text{U}$. Теоретичні і експериментальні дані показують, що нейтрони, які вивільнюються в процесі поділу ядер урану, спричинюють поділ лише ядер ізотопу урану-236, ядрами урану-238 вони лише поглинаються, не спричинюючи їх поділу, тобто ядра урану-238 не беруть участі в розвиненні ланцюгової реакції. Це є причиною того, що в природному урані ланцюгових реакцій немає. Отже, для утворення ланцюгової ядерної реакції необхідно розв'язати задачу – поділити природний уран на два його ізотопи. На сьогодні цю складну й трудомістку задачу розв'язано.

Як саме практично можна здійснити ланцюгову реакцію? Якщо всі вторинні нейтрони, які утворюються в процесі поділу, беруть участь у наступних актах поділу, то кількість нейтронів зростає в геометричній прогресії; отже, найважливішою характеристикою розвинення ланцюгової ядерної реакції є *коефіцієнт розмноження нейтронів*

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}, \quad (25.15)$$

де N_i – кількість нейтронів, які спричинюють поділ на одному з етапів реакції; N_{i-1} – кількість нейтронів, які спричинюють поділ ядер на попередньому етапі.

Коефіцієнт розмноження визначає також кількість поділів ядер, спричинена одним поділом попередньої ланки реакції. Якщо $k < 1$, то реакція швидко затухає. Якщо $k = 1$, то ланцюговий процес відбувається із сталою інтенсивністю, яку називають *критичною*. Систему з $k > 1$ називають *надкритичною*; у цьому разі ланцюговий процес розвивається лавинно і призводить до ядерного вибуху.

§ 258. Керована ланцюгова реакція. Ядерний реактор

Ядерний реактор

Установку, в якій здійснюється керований ланцюговий процес поділу ядер важких елементів, називають *ядерним реактором*. Перший ядерний реактор було побудовано в Чиказькому університеті в 1942 р. під керівництвом Е. Фермі.

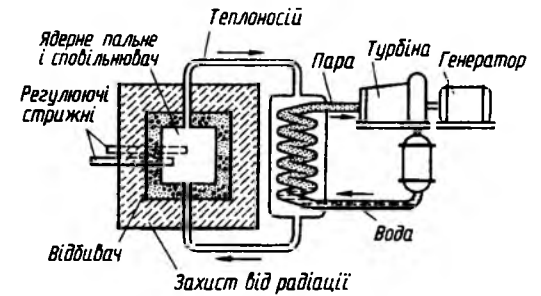
Розглянемо умови роботи ядерного реактора (рис. 25.11), в якому як паливе використовують природний уран, збагачений до 5 % ізотопом урану-235. Оскільки розвинення ланцюгової реакції можливе тільки під дією теплових нейтронів на ядрах урану-235, то одночасно зі збільшенням його концентрації необхідно створити умови і для сповільнення

вторинних нейтронів до теплових швидкостей. Для цього використовують спеціальну речовину, яку називають *сповільнювачем*. Ядра речовини сповільнювача мають в основному сповільнювати, але не поглинати нейтрони. Такою речовиною є важка вода D_2O .

Проте добування її у великих кількостях пов'язане з певними труднощами. У звичайній воді на 6000 молекул H_2O є лише одна молекула D_2O , тому в реакторах використовують такі сповільнювачі, як звичайна вода або графіт.

Активна зона реактора, в якій відбувається самопідтримуюча ланцюгова реакція, – це графітовий циліндр.

Щоб зменшити витікання нейтронів, активну зону оточено шаром відбивача, роль якого виконують стінки графітового циліндра. Ядерне паливе (уран) вводять в активну зону, як правило, у вигляді стрижнів, між якими розміщений сповільнювач нейтронів. У процесі ланцюгової реакції температура в активній зоні досягає 800–900 К. Для відведення теплоти через активну зону реактора по трубах пропускають теплоносій, наприклад звичайну воду або рідкий металічний натрій. Керують ланцюговою реакцією за допомогою регулюючих стрижнів, виготовлених з бору або кадмію, які добре поглинають теплові нейтрони. Ланцюгова реакція, яка розвивається, призводить до того, що кількість ядер, які діляться, неперервно зростає, тобто збільшується потужність реактора. Щоб ланцюговий процес не набув лавинного характеру, потрібно, щоб коефіцієнт розмноження нейтронів весь час дорівнював одиниці; цього досягають за допомогою регулюючих стрижнів. Якщо регулюючі стрижні будуть вийняті з активної зони, то $k > 1$, а коли вони повністю знаходяться в зоні, то $k < 1$. За допомогою стрижнів у будь-який момент часу можна припинити розвиток ланцюгової реакції.

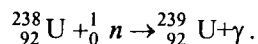


Критична маса

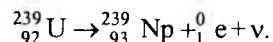
Самопідтримуюча ланцюгова реакція може відбуватися в активній зоні ($k > 1$) тоді, коли об'єм її не менший від деякого критичного значення. Мінімальний об'єм активної зони, при якому можливе здійснення ланцюгової реакції, називають *критичним об'ємом*. Масу подільної речовини, внесеної в критичний об'єм, називають *критичною*. Залежно від будови установок і типу пального критична маса може змінюватися від кількох сотень грамів до кількох десятків тонн ядерного пального.

Відтворення ядерного пального

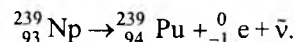
У реакторі, який працює на природному урані, частина вторинних нейтронів захоплюється ядром урану-238, перетворюючись в уран-239:



Ізотоп урану-239 радіоактивний з періодом піврозпаду 23,5 хв. Внаслідок β -розпаду він перетворюється в ізотоп нептунію:



У свою чергу, зазнаючи β -розпад, ядро нептунію перетворюється в ядро плутонію-239:



Нуклід плутонію-239 має період піврозпаду $T = 24$ тис. років і за своєю здатністю до поділу не поступається урану-235. Його можна використати в ядерних реакторах як паливо. Отже, витрачання урану-235 супроводиться утворенням не менш цінного ядерного пального – плутонію-239.

При поділі одного ядра урану-235 в середньому вивільняється 2,5 нейтрона. На підтримання ланцюгової реакції витрачається один нейтрон; отже, 1,5 нейтрона йде на утворення ядер плутонію. Таким чином, у процесі поділу ядер урану-235 реактор одночасно відтворює ядерне паливо в кількості, яка перевищує витрачену.

Захист від радіації

Під час ланцюгової ядерної реакції утворюються радіоактивні ядра-осколки, які є джерелами нейтронів, β - і γ -випромінювання. Отже, урановий реактор є джерелом різних випромінювань, особливо небезпечні з них нейтрони і γ -випромінювання, оскільки вони мають велику проникну здатність. Обслуговуючий персонал від опромінення захищають, як правило, шаром води завтовшки порядку 1 м, шаром бетону до 3 м і товстим шаром чавуну.

Тепер створено різні типи реакторів, які відрізняються один від одного енергіями нейтронів, що спричиняють поділ ядерного пального (реактор на теплових нейтронах, реактор на швидких нейтронах), характером подільної речовини (на природному урані, збагаченому урані, на чистому подільному продукті), призначенням (для наукових досліджень, виробництва плутонію, вироблення електроенергії).

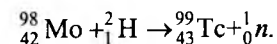
Атомну бомбу можна розглядати як реактор, в якому відбувається некерований ланцюговий процес поділу ($k > 1$). Як ядерне паливо для неї використовують в основному уран-235 або плутоній-239. Ланцюговий процес, що призводить до вибуху, можливий тільки при певних критичних розмірах або критичній масі ядерного пального. Критична маса для урану-235 і плутонію-239 становить до 10–20 кг.

До вибуху ядерний заряд поділено звичайно на дві частини, маса кожної з них менша від критичної, тому ланцюгова ядерна реакція не відбувається. Як тільки частини ядерного заряду, що є півкулями радіусом 4–6 см, з'єднуються разом, їх маса стає більшою від критичної, миттю починається некерований ланцюговий ядерний процес – ядерний вибух. Ядерне паливо з'єднують за допомогою звичайної вибухової речовини (димного пороху). Ядерний вибух супроводиться випусканням γ -випромінювання й нейтронів, різким підвищенням температури і тиску. Основними факторами ураження є ударна хвиля, яка поширюється від центра вибуху в усі боки з надзвуковою швидкістю, і радіоактивне випромінювання, яке заражує навколишню місцевість.

§ 259. Добування радіоактивних ізотопів та їх застосування

Дослідження штучної радіоактивності, проведені Ірен і Фредеріком Жоліо-Кюрі, Е. Фермі, відкрили можливість створення штучних радіоактивних елементів. Промислове виробництво радіоактивних ізотопів стало можливим після пуску першого радянського атомного реактора в 1946 р.

Першим елементом, створеним штучно, був технецій ${}_{43}^{99}\text{Tc}$. Його добуто в 1937 р. внаслідок бомбардування молібдену дейтерієм:



Тільки в 1961 р. його сліди було виявлено в земних мінералах. Відкриття технецію стало початком заповнення клітинок 43, 61, 85, 87 періодичної системи Менделєєва, які раніше були порожні. На сьогодні за допомогою ядерних реакцій і штучної радіоактивності добуто ізотопи з номерами від 93 до 105 (див. періодичну систему Менделєєва).

Застосування штучних радіоактивних ізотопів ґрунтується на великій проникній та іонізуючій здатності радіоактивного випромінювання, яке виникає внаслідок радіоактивного розпаду.

Радіоактивні ізотопи і ядерні випромінювання дедалі ширше застосовують у наукових дослідженнях, промисловості, сільському господарстві і медицині.

Ізотопи і випромінювання мають численні галузі застосування. Вони дають можливість визначати якість виливків і зварних швів, витрату і швидкість руху рідин, газів і сипких матеріалів, а також фіксувати рівень заповнення закритих місткостей. За їх допомогою визначають місця течії в підземних трубопроводах, якість змішування різних матеріалів, товщину і надійність лакових покриттів.

Ізотопи використовують для вивчення міграції риби і якості добрив, розвитку живого організму і руху мулу в гирлах річок. Включені в металеві підшипники або поршневі кільця двигунів, вони дають можливість визначати динаміку їх спрацювання.

На основі використання ядерних випромінювань побудовано прилади, які автоматично вимірюють товщину і густину різних середовищ, тиск газу, в'язкість рідин і цілий ряд інших параметрів, потрібних для регулювання технологічних процесів. Завдяки безконтактності роботи, точності й надійності вимірювань прилади з джерелами випромінювань широко використовують як датчики систем автоматичного регулювання.

Іонізуючі випромінювання застосовують у різних галузях промисловості для видалення електростатичних зарядів, які утворюються на робочих органах машин, заготовках і готовій продукції в паперовій, текстильній, гумовій та інших галузях промисловості.

За допомогою потужних джерел випромінювання виникла можливість стерилізувати в промисловому масштабі медикаменти, деякі ліки і медичне устаткування. Розроблено методи застосування випромінювань для консервування харчових продуктів, прискорення хімічних реакцій, виготовлення нових хімічних сполук, зміни фізико-механічних властивостей різних матеріалів та виробів з них.

Використання ізотопів і випромінювань у медицині дало можливість зробити значний крок уперед в галузі діагностики і лікування злоякісних пухлин та деяких інших захворювань.

Радіоактивні ізотопи, введені в досліджуваний об'єкт (або добуті після попереднього опромінення досліджуваного матеріалу нейтронами), дають можливість дослідити властивості речовини і хід різних процесів. Це *метод мічених атомів*, або радіоактивних індикаторів, що не має собі рівних за універсальністю, точністю, швидкістю і надійністю. Тепер майже в усіх областях знань і галузях промисловості застосовують радіоактивні індикатори. Особливо широко їх використовують у сільському господарстві, біології і медицині, а також у металургійній, хімічній і нафтовій промисловості.

Приклади застосування ізотопів у наукових дослідженнях такі численні, що їх не можна перелічити. З того часу як атомна промисловість почала випускати в достатніх кількостях різні "мічені" хімічні сполуки, дослідники найрізноманітніших спеціальностей дістали новий, дуже потужний

інструмент, який дав можливість створити нові методи ведення експериментальних робіт.

Цей далеко не повний перелік галузей застосування радіоактивних ізотопів і ядерних випромінювань показує, як глибоко впроваджується фізика атома в техніку, медицину і сільське господарство.

§ 260. Успіхи і перспективи розвитку атомної енергетики

Після пуску першої в світі атомної електростанції (АЕС) в м. Обнінську в 1954 р. було нагромаджено великий науково-технічний і виробничий досвід проектування, спорудження і експлуатації великих АЕС різного типу. Стан і обсяг робіт щодо спорудження АЕС на теплових і швидких нейтронах з різними сповільнювачами і теплоносійми, розрахованих на різну потужність, показують, що атомна енергетика стала самостійною галуззю електроенергетичного виробництва.

Висока енергомісткість ядерного пального і практично необмежена автономність дають можливість створювати атомні двигуни, які з успіхом використовують у надводних і підводних кораблях. 17 серпня 1977 р. атомний криголам "Арктика" досяг Північного полюса, здійснивши вікову мрію людства. Атомні криголами "Ленин", "Арктика", "Сибір" довели можливість цілорічної навігації в Арктиці.

Нині особлива увага приділяється створенню нових джерел енергії. До них належать паливні киснево-водневі елементи, термогенератори, сонячні батареї, МГД-генератори. Але всі ці пристрої поки що порівняно малопотужні й дорогі, тому їх можна використовувати лише як допоміжні джерела енергії, наприклад, на космічних кораблях. Розв'язання енергетичної проблеми в найближчому майбутньому належатиме термоядерним електростанціям, проте й досі не вдалося забезпечити стійкої керованої реакції синтезу. Над цією проблемою працюють найвидатніші вчені всього світу, її розв'язання дасть людству невичерпне джерело енергії.

Теоретично вчені передбачили створення ще одного джерела енергії, яке ґрунтується на анігіляції – реакції з'єднання атомів речовини і антиречовини. Якщо вдасться побудувати анігіляційний реактор, де будуть взаємодіяти, наприклад, водень і антиводень, то він вироблятиме величезний потік світлової енергії. Цю енергію за допомогою сонячних батарей можна перетворити в електричну.

Наявні тепер способи добування електроенергії дуже складні і мають малий коефіцієнт корисної дії. Величезні резерви енергетики – в зменшенні великих втрат у процесі перетворення і передавання енергії. вико-

ристання плазми для безпосереднього перетворення теплоти в електрику, застосування надпровідників різко зменшать ці втрати. Хоч переважну частину енергії дають ще теплові і гідроелектростанції, починає відігравати дедалі відчутнішу роль ядерна енергетика. Ядерна енергетика – яскравий приклад революційного перевороту, спричиненого досягненнями науки, зокрема фізики атомного ядра та елементарних частинок.

§ 261. Біологічна дія радіоактивних випромінювань

В основі біологічної дії випромінювань – процес поглинання енергії, який проявляється в іонізації і збудженні атомів та молекул.

За сучасними уявленнями іонізація – це лише перша ланка в складному ланцюгу біологічної дії радіації. Іонізація живої тканини призводить до розриву молекулярних зв'язків і зміни хімічної структури різних сполук. Зміни в хімічному складі клітини порушують її нормальне функціонування, обмін речовин і клітина гине.

Біологічний ефект або ступінь променевого ураження зростає із збільшенням поглинутої дози випромінювання, тобто кількості енергії, яку поглинає одиниця маси тканини.

Загальна реакція організму на дію випромінювання залежить від дози випромінювання, його виду, розміру опроміненої поверхні, відносної чутливості органів, які зазнали опромінення, індивідуальних особливостей організму.

При тій самій дозі біологічна дія різних типів випромінювань неоднакова через відмінності в густині іонізації (кількість іонів, які утворюються на одиниці шляху іонізуючої частинки). Чим густіша іонізація, тим значніша дія ураження.

Оцінюючи дію випромінювання на організм, треба розрізняти зовнішнє і внутрішнє опромінення. Той самий вид радіації (наприклад, α -проміння) порівняно безпечний при зовнішньому опроміненні, але може бути дуже шкідливим при локалізації радіоактивності всередині організму.

Отже, в разі зовнішнього опромінення особливу увагу слід приділяти захисту від гамма- (а також рентгенівського) випромінювання і нейтронів, які мають велику проникну здатність.

Альфа-частинки проникають у шкіру на кілька мікрометрів і затримуються роговим шаром епідермісу, що не чинить помітної шкоди.

Бета-частинки проникають у тканину на кілька міліметрів і значною мірою поглинаються шкірою і підшкірною клітковиною.

Малі дози опромінення, хоч і створюють небезпеку небажаних генетичних змін, проте можуть у ряді випадків стимулювати зростання і розвиток рослинних, а іноді і тваринних організмів.

Стійкість різних організмів проти дії іонізуючих випромінювань коливається в дуже широких межах. При цьому чим більший і складніший організм, тим легше він руйнується під дією випромінювання. Так, наприклад, бактерії в тисячі раз стійкіші проти ядерних випромінювань, ніж людина і високорозвинені тварини.

Найсприйнятливіші до променевої дії клітини, які швидко розвиваються: органи розмноження або клітини пухлин легше руйнуються, ніж нормальна м'язова тканина; зародки тварин, які розвиваються, значно чутливіші, ніж дорослі особи; пророщене насіння сприйнятливіше від насіння, яке перебуває у спокої, а вегетативні форми бактерій незрівняно чутливіші від бактеріальних спор.

Доза випромінювання

Дія випромінювання на живі організми характеризується дозою випромінювання. *Експозиційною дозою випромінювання* називають міру іонізації повітря, яка відбувається під дією даного випромінювання.

У СІ дозу випромінювання виражають у *кулонах на кілограм* (Кл/кг). Якщо сумарний заряд іонів одного знака, утворених випромінюванням в 1 кг повітря, дорівнює 1 Кл, то доза випромінювання дорівнює 1 Кл/кг.

Дія на організм випромінювань різної природи за тією самою дозою D_0 неоднакова. Тому для оцінки небезпеки випромінювання вводять коефіцієнт k відносної біологічної активності. Для рентгенівського проміння, γ -проміння та електронів $k = 1$; для повільних нейтронів $k = 5$; для швидких нейтронів і α -частинок $k = 10$ і т. д. Практично важливо знати *біологічну дозу опромінення* D_6 , яку визначають за формулою

$$D_6 = kD_0.$$

Природний фон радіації (космічне проміння, радіоактивність навколишнього середовища і тіла людини) становить за рік біологічну дозу близько $2,5 \cdot 10^{-5}$ Кл/кг. Міжнародна комісія з радіаційного захисту встановила для осіб, що працюють з випромінюванням, граничнодопустиму за рік дозу $1,3 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг. Біологічна доза в 0,15 Кл/кг, одержана за короткий час, смертельна.

Короткі висновки

- У 1896 р. А. Беккерель відкрив явище радіоактивності. Радіоактивність – спонтанне перетворення ядер нестійких ізотопів у стійкі, що супроводиться випромінюванням частинок і енергії.

- Розпад радіоактивних елементів підпорядкований закону

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Для кожного радіоактивного елемента є певний інтервал часу, протягом якого початкова кількість атомів зменшується в 2 рази. Цей інтервал часу називають періодом піврозпаду. Період піврозпаду сталий для даного ізотопу.

- У 1932 р. Д. Д. Іваненко і В. Гейзенберг незалежно один від одного запропонували протон-нейтронну модель атомного ядра, яка тепер загальноновизнана. За цією моделлю ядро складається з протонів і нейтронів, які назвали нуклонами. Загальну кількість нуклонів у ядрі називають масовим числом ядра:

$$A = N + Z.$$

Ядра, що мають однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів, називають ізотопами.

- Стійкість більшості атомних ядер означає, що між нуклонами в ядрах діють потужні сили, їх назвали ядерними. Мірою стійкості ядра є енергія зв'язку.

Вона дорівнює тій енергії, яку треба затратити, щоб розщепити ядро на окремі нуклони:

$$\Delta E_{\text{зв}} = \Delta mc^2,$$

де $\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_n]$ – дефект маси (різниця між сумою мас протонів і нейтронів, що перебувають у вільному стані, і масою ядра, складеного з цих частинок).

- Під ядерними реакціями розуміють штучні перетворення атомних ядер як при взаємодії одного з одним, так і з ядерними частинками. Під час ядерних реакцій виконуються закони збереження сумарного електричного заряду, числа нуклонів, енергії, імпульсу, моменту імпульсу. Всі ядерні реакції характеризуються енергією, яка виділяється або поглинається під час їх перебігу.
- Передбачене Резерфордом у 1920 р. існування в ядрі нейтральної частинки (нейтрона) було підтверджене в 1932 р. під час обстрілу ядер берилію альфа-частинками. Було з'ясовано, що нейтрон радіоактивний. Нейтрони, взаємодіючи з ядрами, спричиняють ядерні реакції поділу деяких важких елементів.
- Ядра урану, торію та інших важких елементів під дією теплових нейтронів здатні ділитися. При цьому на один акт поділу виділяється енергія близько 200 МеВ і випромінюють 2–3 вторинних нейтрони. Ці нейтрони дають можливість здійснювати керовану і некеровану ланцюгові реакції поділу. Керовану ланцюгову реакцію використовують у реакторах, некеровану – в атомних бомбах.
- Радіоактивні ізотопи, які утворюються в реакторах і прискорювачах, широко застосовують у науці, медицині, галузях промисловості та сільського господарства.
- У колишньому СРСР у 1954 р. пушено першу в світі атомну електростанцію. Висока енергетичність ядерного пального і практично необмежена автономність дають можливість створювати атомні двигуни, які з успіхом застосовують у надводних і підводних кораблях.

- Радіоактивні випромінювання – велика небезпека для живих організмів. Під час роботи з ними треба застосовувати спеціальні методи захисту.
- Космічне випромінювання, яке надходить із світового простору, ділиться на первинне і вторинне. Первинне випромінювання галактичного походження містить частинки з енергією, яка досягає 10^{17} еВ/нуклон. Первинні частинки, стикаючись з ядрами у верхніх шарах атмосфери, утворюють вторинне випромінювання, породжуючи каскадні атомні зливи.
- У навколосемному просторі є області, в яких густина заряджених частинок, захоплених магнітним полем Землі, перевищує густину космічного первинного випромінювання в сотні мільйонів разів. Ці області називають *радіаційними поясами*.
- Елементарними називають такі частинки, які не можна вважати сполуками інших, “простіших” частинок. Взаємодіючи з іншими частинками, вони мають поводити себе як єдине ціле. Усі елементарні частинки взаємоперетворюються між собою. Більшість з них нестабільна. Винятком є фотон, електрон, нейтрино. Усі частинки мають античастинки, які відрізняються від частинок знаком електричного заряду, напрямом спіну. Якщо частинка і античастинка стикаються, то вони анігілюють, тобто перетворюються в гамма-кванти. Можливий і зворотний процес. Пару частинок народжує фотон, який взаємодіє з полем ядра. Це є доказом взаємного перетворення речовини і поля.
- Розрізняють чотири види взаємодії елементарних частинок між собою: сильну (ядерну), електромагнітну, слабку, гравітаційну. Кожній взаємодії відповідає своє поле.
- Найважливішими характеристиками, які визначають властивості елементарних частинок, є їх маса, електричний заряд, spin, час життя.
- Тепер розроблено гіпотезу, за якою більшість елементарних частинок є комбінацією кварків і антикварків. Проте кварків у вільному стані не виявлено, незважаючи на численні пошуки. Тепер важко робити висновок про те, чи точна гіпотеза кварків. Важливо те, що закладено початок створення єдиної теорії, яка об'єднує чотири фундаментальні взаємодії.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. У чому полягає явище радіоактивності? 2. Яка природа радіоактивного випромінювання? 3. Напишіть закон радіоактивного розпаду. 4. Що називають періодом піврозпаду? 5. Яка будова і дія камери Вільсона і лічильника Гейгера? 6. У чому ефект Вавилова – Черенкова? 7. Розкажіть про модель ядра за Іваненком – Гейзенбергом. 8. Що називають масовим числом? 9. Що таке дефект маси і енергія зв'язку ядра? 10. Дайте характеристику ядерним силам. 11. Розкажіть про альфа- і бета-розпад. Сформулюйте правила зміщення. 12. Що таке космічне випромінювання? 13. Які частинки називають елементарними? 14. Розкажіть про взаємне перетворення речовини і поля. 15. Розкажіть про основні властивості елементарних частинок. 16. Що розуміють під штучною радіоактивністю? 17. Яку ядерну реакцію називають ланцюговою? 18. Що таке

критична маса? 19. Розкажіть про утворення і застосування радіоактивних ізотопів. 20. Розкажіть про перспективи розвитку атомної енергетики. 21. Яку біологічну дію чинять радіоактивні випромінювання на живий організм?

Приклади розв'язування задач

Задача 1. Обчислити дефект маси та енергію зв'язку ядра ${}^{14}_7\text{N}$.

Дано: $Z = 7$; $A = 14$.

Знайти: Δm , $E_{\text{зв}}$.

Розв'язання. Дефект маси ядра визначають за формулою (25.4)

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$$

Цю формулу доцільно перетворити так, щоб до неї входила маса $m_{\text{а}} = M_{\text{я}} + Zm_e$ нейтрального атома, дефект маси якого визначається так:

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - M_{\text{е}}$$

де m_{H} – маса нейтрального атома водню; $m_e = 0,00055 \text{ а. о. м.}$ – маса електрона.

Обчислення:

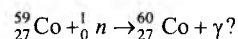
використавши табличні значення для ізотопу азоту ${}^{14}_7\text{N}$, знайдемо

$$\Delta m = [7 \cdot 1,00781 + (14 - 7) \cdot 1,00867 - 14,00304] \text{ а. о. м.} = 0,186 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Енергія зв'язку ядра

$$E_{\text{зв}} = \Delta mc^2 = 0,186 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 1,67 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 104,3 \text{ МеВ.}$$

Задача 2. Виділяється чи поглинається енергія під час ядерної реакції



Обчислити цю енергію.

Дано: $M_1({}^{59}_{27}\text{Co}) = 58,95182 \text{ а. о. м.}$; $M_2({}^{60}_{27}\text{Co}) = 59,95250 \text{ а. о. м.}$;

$m_n = 1,00893 \text{ а. о. м.}$

Знайти: ΔE_0 .

Розв'язання. Для обчислення енергії ядерної реакції $\Delta E = \Delta mc^2$ треба визначити дефект маси реакції Δm . Якщо Δm виражати в а. о. м., то

$$\Delta E = 931 \Delta m [\text{МеВ}].$$

Дефект маси

$$\Delta m = (M_1 + m_n) - M.$$

Оскільки число електронів до і після реакції зберігається, то замість значень мас ядер скористаємось значеннями мас нейтральних атомів:

$$\Delta m = [(58,95182 + 1,00893) - 59,95250] \text{ а. о. м.} = 0,00825 \text{ а. о. м.}$$

Реакція відбувається з виділенням енергії, оскільки $\Delta m > 0$.
Обчислення:

$$\Delta E = 931 \text{ МеВ/а. о. м.} \cdot 0,00825 \text{ а. о. м.} = 7,66 \text{ МеВ.}$$

Задачі для самостійного розв'язування

1. Яка енергія виділяється при утворенні 1 г гелію з протонів і нейтронів?
2. Виділяється чи поглинається енергія під час реакції ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$? Яка ця енергія?
3. У процесі термоядерної взаємодії двох нейтронів можливі реакції двох типів: з утворенням ${}^3_2\text{He}$ і утворенням ${}^3_1\text{H}$. Визначити теплові ефекти цих реакцій.
4. Якщо ядро атома ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ опромінювати α -частинкою, то утворюються новий елемент і нейтрон. Визначити: 1) який елемент утворюється внаслідок цієї реакції; 2) виділяється чи поглинається енергія під час цієї реакції?
5. Під час термоядерної реакції ${}^2_1\text{H} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H}$ виділяється енергія 6,25 МеВ. Визначити масу спокою нейтрального атома ${}^2_1\text{H}$, якщо вважати, що $m({}^2_1\text{H}) = 3,016049 \text{ а. о. м.}$; $m_n = 1,00867 \text{ а. о. м.}$
6. Обчислити дефект маси, енергію зв'язку ядра атома і його питому енергію ${}^{24}_{12}\text{Mg}$.
7. Період піврозпаду радіо дорівнює 1600 років. Чому дорівнює середній час життя ядра радіо?
8. Під час бомбардування ядер бору ${}^{11}_5\text{B}$ протонами утворюється берилій ${}^8_4\text{Be}$. Яке ядро утворюється ще в процесі цієї реакції?
9. Ізотоп бром ${}^{74}_{35}\text{Br}$ β -радіоактивний. Написати реакцію розпаду і визначити, нуклід якого елемента утворюється під час цієї реакції.
10. Маса дейтрона дорівнює 2,01356 а. о. м. Знайти енергію зв'язку.

ГЛАВА 26

ТЕРМОЯДЕРНИЙ СИНТЕЗ. ЕВОЛЮЦІЯ ЗІР

§ 262. Термоядерний синтез

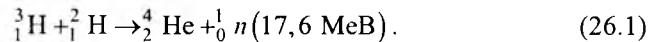
Термоядерний синтез

Як було зазначено (§ 247), ядерна енергія може вивільнятися не тільки в процесі поділу важких ядер, а й при злитті (синтезі) легких ядер у важчі. Ці реакції можуть відбуватися при температурі 10^7 К і вище.

За нормальних умов ядра не можуть зливатися тому, що позитивно заряджені ядра зазнають величезних сил кулонівського відштовхування. Під час синтезу легких ядер завдання зводиться до того, щоб зблизити ядра на такі відстані, при яких дія ядерних сил притягання перевищувала б кулонівські сили відштовхування. Щоб атомні ядра злилися, треба збільшити їх рухливість, тобто збільшити кінетичну енергію. Цього досягають, підвищуючи температуру. За рахунок одержаної теплової енергії збільшується рухливість ядер, і вони можуть підійти одне до одного на такі близькі відстані, що під дією ядерних сил зчеплення зіллються в нове, складніше ядро.

Баланс енергії

Внаслідок злиття легких ядер вивільняється енергія, оскільки нове ядро має велику питому енергію зв'язку. Якщо при поділі важкого ядра урану виділяється енергія порядку 1 MeV на нуклон, то при синтезі дейтерію і тритію утворюється ядро гелію:



Ядро дейтерію має енергію зв'язку 2,2 MeV, ядро тритію – 8,5 MeV, а гелію – 28,3 MeV; отже, в процесі реакції виділяється енергія $28,3 \text{ MeV} - (2,2 + 8,5) \text{ MeV} = 17,6 \text{ MeV}$, що в перерахунку на один нуклон дає $17,6/5 \approx 3,52 \text{ MeV}$, тобто майже в чотири рази перевищує ефект реакції поділу. Оскільки реакція злиття легких атомних ядер у важчі відбувається при дуже високих температурах (10^7 K і вище), то такі реакції називали *термоядерними*.

Наведену вище реакцію (26.1) злиття ядер дейтерію і тритію покладемо в основу створення водневої бомби. Запалом у такій бомбі є атомна бомба, під час вибуху якої виникає температура порядку 10^7 K , достатня для перебігу реакції синтезу (яка в цьому разі є некерованою).

§ 263. Проблема термоядерної енергетики

Некеровані термоядерні реакції відбуваються під час вибухів водневих бомб, внаслідок чого вивільняється величезна кількість ядерної енергії. Оволодіти керованою термоядерною реакцією – означає добути найбагатше і найдешевше джерело енергії. Розв'язання проблеми керованої термоядерної реакції позбавить людство від турбот про джерела енергії; у цьому разі ядерним паливом буде вода морів і океанів. Але цю енергію можна добути лише після того, як будуть розв'язані проблеми нагрів-

вання до величезних температур безлічі легких ядер і утримання їх у такому стані протягом помітних проміжків часу. Над проблемою оволодіння керованими термоядерними реакціями працюють у різних напрямках практично в усіх розвинутих країнах світу.

Для керування реакцією синтезу водневих ядер і створення керованих термоядерних реакторів опрацьовують методи створення дуже великих температур у водневій плазмі. Останнім часом за допомогою потужного лазерного випромінювання, сфокусованого в малому обсязі середовища, вдалося добути надвисокі температури ($\approx 10^8 \text{ K}$) і спричинити термоядерну реакцію.

Основна складність добування керованої реакції в тому, щоб забезпечити повну ізоляцію плазми від стінок установки, в якій вона розміщена. Якщо плазма стикається із стінками установки, вона перестає існувати. Отже, плазма має бути оточена вакуумом. Щоб ізолювати її від стінок установки, застосовують *магнітну теплоізоляцію*. Найперспективнішою термоядерною установкою є “Токамак” (тороїд, камера, магніт). Принцип дії цієї установки описано в гл. 14.

На закінчення зазначимо, що температура, густина плазми і час її утримання, досягнуті тепер, поки що не досить великі для здійснення синтезу безлічі легких ядер. Тепер на установці “Токамак-15” в Інституті атомної енергії ім. І. В. Курчатова добуто плазму з температурою близько 10^6 K і часом її утримання близько 80 мс.

§ 264. Будова Сонця і зір

Сонце – це не тільки джерело життя на Землі, а й найближча до нас зоря, вивчення будови якої дасть можливість зробити висновок про процеси, які відбуваються на його побратимах – зорях.

В основному Сонце складається з тих самих хімічних елементів, що й Земля.

Серед цих елементів понад 80 % – атоми водню і 18 % – атоми гелію. *Термоядерні реакції* – основне джерело сонячної енергії – відбуваються в ядрі Сонця (рис. 26.1). Радіус ядра становить приблизно 1/3 радіуса Сонця, температура ядра перевищує 10 МК ($10\,000\,000 \text{ K}$), і воно перебуває в плазмовому стані. До ядра прилягає область *променистого перенесення енергії*, що має товщину порядку 1/3 радіуса Сонця. Вище розміщена *конвективна зона*, вона сягає приблизно на 200 тис. км. Температура кон-

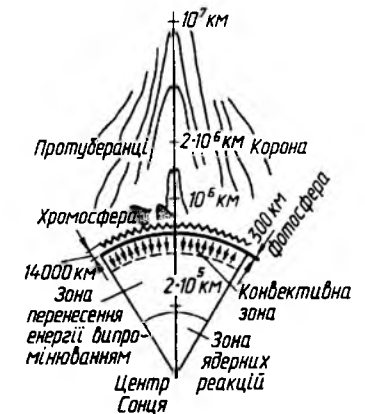


Рис. 26.1

вективної зони значно нижча. Ця зона переходить у зовнішні шари Сонця – *атмосферу*. Сонячна атмосфера складається з кількох різних шарів. Найглибший з них – *фотосфера*. Товщина фотосфери порядку 200–300 км.

У сонячній атмосфері над фотосферою температура підвищується і в хромосфері Сонця – шарі розжарених газів завтовшки 10–20 тис. км – досягає кількох тисяч кельвінів, а в короні – найбільш розрідженій, зовнішній оболонці Сонця – понад 1 МК.

Хромосферу і сонячну корону можна спостерігати під час повного сонячного затемнення. Хоча найбільш зовнішні шари сонячної атмосфери мають температуру 1 МК, їх випромінювання становить мізерну частку загальної енергії, яку випромінює Сонце. Час від часу в сонячній атмосфері утворюються активні області – сонячні плями, які спостерігаються у фотосфері. З одинадцятирічним періодом число плям і площі, які вони займають, змінюються. Періодичність сонячної активності, очевидно, пов'язана із складними взаємодіями іонізованої речовини Сонця і його магнітного поля. Енергія, яку випромінює Сонце, в основному визначається випромінюванням фотосфери, що має температуру порядку 6000 К, тому цю температуру приписують Сонцю в цілому.

Сонце – одна з численних зір Всесвіту.

Вивчаючи Сонце, ми пізнаємо процеси, які відбуваються в інших зорях.

§ 265. Енергія Сонця і зір

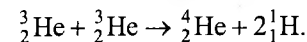
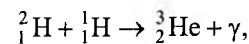
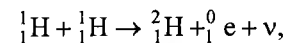
Фізичну природу зір ще не добре вивчено, щоб можна було певно говорити про те, як виникають зорі, як виникло Сонце і яка доля зір.

Цілком можливо, що з часом у деяких місцях простору міжзор'яний пил і газ згущуються в тіла великих розмірів. Наступне стискання таких тіл призводить до їх розігрівання і світіння, до перетворення в зорі. Коли температура всередині них підніметься досить високо, там має розпочатись перетворення водню у важчі хімічні елементи, що супроводиться тривалим і величезним виділенням енергії. У такому стані зорі можуть перебувати принаймні десятки мільярдів років (як, наприклад, наше Сонце).

Ядра зір як природний термоядерний реактор

Реакції синтезу відбуваються в надрах зір, у тому числі і нашого Сонця. Сонце і сонцеподібні зорі складаються в основному з водню до 80 % і гелію до 20 %. Температура в їх надрах досягає 10^7 – 10^8 К. При такій температурі всі атоми повністю іонізовані і є плазмою. Сонце і зорі – це ніби величезні самопідтримуючі термоядерні реактори. Най-

імовірніша термоядерна реакція, що відбувається в надрах Сонця при $T = 1 - 2 \cdot 10^7$ К, така:

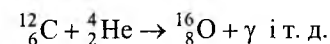
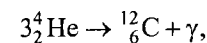


Цей ланцюжок термоядерних реакцій, внаслідок якого чотири ядра водню ${}^1_1\text{H}$ перетворюються в одне ядро гелію ${}^4_2\text{He}$, називають *протон-протонним циклом*. Середня тривалість останньої реакції, яка завершує цикл, близько 1 млн років, а енергетичний ефект її – близько 13 МеВ. У цілому енергетичний ефект протон-протонного циклу становить 27 МеВ.

Для зір яскравіших, ніж Сонце, характерний *вуглецевий цикл*.

Підсумком вуглецевого циклу як протон-протонного є перетворення чотирьох ядер водню в одне ядро гелію. Кількість ядер вуглецю, які беруть участь у реакції, не змінюється; вони виконують роль каталізатора. У цьому циклі в проміжних реакціях з вуглецю утворюється азот. Азот є побічним продуктом реакції перетворення водню в гелій.

Після вигорання водню в центрі зорі при температурі $(1 \dots 2) \cdot 10^8$ К розпочинається *горіння гелію*:



Основні продукти горіння – вуглець і кисень, і в зорі утворюється *вуглецево-кисневє ядро*.

При температурах $T = 5 \cdot 10^8 \dots 10^9$ К загоряються вуглець і кисень, а протони і нейтрони, які утворюються в процесі горіння, беруть участь у різних реакціях з ядрами, породжуючи елементи в інтервалі атомної ваги $16 \leq A \leq 28$.

Основний продукт горіння вуглецю і кисню – *кремній*.

При температурах $T > 2 \cdot 10^9$ К в тепловому випромінюванні виникає багато квантів з енергією, яка достатня для відщеплення альфа-частинок від кремнію, сірки, магнію тощо. Альфа-частинки можуть приєднуватись до важчих ядер, утворюючи елементи аж до заліза, нікелю, цинку.

Походження елементів з $Z > 30$ пов'язують з процесами захоплення нейтронів. До них належать елементи аж до вісмуту.

Елементи, важчі від гелію, утворюються вже в нашу епоху. Елементи, важчі від заліза, синтезуються у вибухових процесах (у спалахах надно-

вих зір). При цьому газ викидається в навколишній простір і витрачається на формування зір наступних поколінь і формування інших небесних тіл.

Якщо на ранній стадії еволюції речовина складалася тільки з водню і гелію, то в процесі еволюції міжзоряне середовище збагачується на важкі елементи і вони вже в готовому вигляді входять до складу зір, які народжуються. Отже,

у Всесвіті відбувається процес необоротності розвитку матеріального світу.

§ 266. Еволюція зір

Зорі випромінюють світло за рахунок термоядерних реакцій, що відбуваються в центральній області зорі. Розрахунки моделей зір показують, що головною термоядерною реакцією є перетворення чотирьох ядер водню в ядра гелію (*протон-протонний цикл*; див. § 265), при цьому вигоряє водень, світність і радіус зорі збільшуються, а температура знижується. Температура в центральній області зір великих мас вища, тому такі зорі еволюціонують швидше. У них вигоряє водень, і вони перетворюються в червоні гіганти.

Після вигорання водню ядро, яке тепер уже складається з гелію, стискається, при цьому температура підвищується до 10 млн К або й більше і розпочинається нова термоядерна реакція – утворення атомів вуглецю з трьох атомів гелію. Ця реакція супроводиться втратою маси і виділенням енергії.

Остаточна доля зорі залежить від її маси. Якщо маса зорі менша від 1,2 маси Сонця, то вона закінчує свою еволюцію як білий карлик. Якщо маса зорі лежить між 1, 2 і 3 масами Сонця, то вона перетворюється в нейтронну зорю. На кінцевій стадії її розвитку відбувається потужне скидання оболонки, тобто спалах наднової зорі. Якщо маса зорі перевищує три сонячні маси, то внаслідок процесу гравітаційного стискання радіус зорі стає таким малим, що гравітаційне поле зорі починає втягувати в себе всю навколишню матерію. Ці зорі все поглинають, але нічого не випромінюють. Такі зорі називають чорними дірками. Розрахунки показують, що якби Земля перетворилась у чорну дірку, то її радіус дорівнював би 0,9 см. Оскільки чорні дірки не випромінюють і їх розміри дуже малі, то виявити їх можна лише побічно, а саме за реєстрацією короткохвильового, ультрафіолетового або рентгенівського випромінювання, яке супроводить втягування міжзоряної матерії в чорну дірку.

Швидкість еволюції залежить від відношення швидкості виділення енергії до маси зорі, яка приблизно пропорційна квадрату маси.

Зорі-гіганти розвиваються за кілька мільйонів років, зорі типу Сонця – за 8–11 млрд років, червоні карлики – за 10^{10} – 10^{11} років.

Короткі висновки

- Великий енергетичний ефект можна дістати від синтезу легких елементів. Для реакції синтезу ядер треба нагрівати речовину до дуже високих температур. Тому ці реакції називають термоядерними. Оволодіти керуванням термоядерними реакціями (КТС) – означає можливість мати найбагатше і найдешевше джерело енергії.
- Термоядерні реакції відбуваються в надрах Сонця і зір і є джерелом енергії, яка компенсує їх випромінювання. Сонце і зорі – це гігантські самопідтримуючі термоядерні реактори, в яких відбуваються реакції. Результатом цих реакцій є утворення не тільки легких, але й важких елементів.
- Еволюція зір залежить від їх маси. Швидкість еволюції залежить від відношення швидкості виділення енергії до маси зорі. Зорі-гіганти розвиваються за кілька мільйонів років, зорі типу Сонця – за 8–11 млрд років, червоні карлики – за 10^{10} – 10^{11} років.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Які реакції називають термоядерними? 2. Розкажіть про баланс енергії при синтезі дейтерію і тритію. 3. У чому полягає проблема термоядерної енергетики? 4. Розкажіть про будову Сонця. 5. Які термоядерні реакції відбуваються в надрах Сонця і зір? 6. Як розвиваються зорі?

РОЗДІЛ 8

УЗАГАЛЬНЕНІ ВІДОМОСТІ З АСТРОНОМІЇ

Астрономія – наука про будову і розвиток космічних тіл, їхніх систем і Всесвіту в цілому. Основні розділи астрономії: астрометрія, астрофізика, зоряна астрономія, радіоастрономія, небесна механіка, космогонія і космологія.

Астрометрія – розділ астрономії, що вивчає взаємне розташування небесних світил; *астрофізика* – фізичний стан і хімічний склад небесних тіл і міжзоряного середовища, а також процеси, що відбуваються в них; *зоряна астрономія* – будову і розвиток Галактики та зоряних систем, що входять до неї; *радіоастрономія* – космічні об'єкти на основі спостереження випромінювання або поглинання ними радіохвиль, а також за допомогою радіолокації; *небесна механіка* – рух небесних тіл під дією гравітаційного поля, а також опору середовища, реактивних та інших сил; *космогонія* – походження космічних тіл та їхніх систем; *космологія* – будову і розвиток Всесвіту.

Астрономія – найдавніша з усіх наук – виникла і розвивалась на основі практичних потреб суспільства. Вона допомагає встановити, як виникли далекі від нас світи, яка їх будова, що було з нами в минулому і що відбудеться в майбутньому.

Дані астрономії покладені в основу революційної фізичної теорії – теорії відносності.

Вивчення космосу дало можливість зробити багато відкриттів – були виявлені невідомі на Землі стани речовини, нові джерела енергії.

Астрономія в усі часи була наукою практичною і в наш час також. Одним з важливих завдань астрономії є визначення точного часу. Використовуючи методи астрономії і виконуючи найскладніші комплекси астрономо-геодезичних робіт, складають географічні карти, обчислюють висоту припливів і відпливів на узбережжях кожної години доби, визначають напрями і швидкості повітряних течій.

На Землю і її атмосферу значною мірою впливає Сонце. Полярні сніга, магнітні бурі і багато інших явищ залежать від сонячного випромінювання, тому дуже важливо вивчати процеси, які відбуваються на Сонці і в його атмосфері.

Методи, які застосовують в астрономії, використовуються у галузях промисловості та сільського господарства, наприклад, спектральний аналіз – у медицині для визначення кисню в крові, в хімії – для визна-

чення складу полімерів і газів. Багато інших питань, що мають практичне значення, можуть бути розв'язані і розв'язуються за допомогою астрономії.

ГЛАВА 27

БУДОВА І РОЗВИТОК ВСЕСВІТУ

§ 267. Наша зоряна система – Галактика

Спостерігаючи зоряне небо навіть неозброєним оком, можна спостерігати групи зір, які назвали *зоряними скупченнями*. Зоряні скупчення поділено на два типи: *розсіяні* і *кульові*.

Розсіяні зоряні скупчення – розподілені в просторі без певної закономірності і складаються з десятків і сотень зір; *кульові* – характеризуються кульовою формою розподілу в просторі і налічують десятки тисяч зір.

Типовим представником розсіяного зоряного скупчення є *Плеяди*, які в народі називають *Волосожаром*. Розсіяні зоряні скупчення мають розміри в межах від одного до 10–15 пк ($1 \text{ пк} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ м}$). Відстань до найближчих розсіяних зоряних скупчень становить кілька тисяч світлових років, їх можна спостерігати в площині Молочного Шляху.

Молочний Шлях – світла срібляста смужка, яку видно на безхмарному зоряному небі. Яскравіші і більш близькі зорі розміщені густіше з наближенням до середньої лінії Молочного Шляху, яку називають *галактичним екватором*.

Площина галактичного екватора – площина симетрії нашої зоряної системи.

Дослідження показали, що вся сукупність зір Молочного Шляху утворює єдину зоряну систему, яку називають Галактикою. Розміри Галактики величезні. Галактика має складну структуру; значна частина її зір утворює дуже сплюснуту систему; зорі й зоряні скупчення зустрічаються також на великій віддалі від головної площини Галактики і утворюють сферичну систему. У середині Галактики міститься *ядро* – гігантське кульове скупчення зір. Ядро Галактики видно із Землі в напрямі сузір'я Стрільця у вигляді яскравої ділянки Молочного Шляху. Від нас до ядра Галактики 30 тис. світлових років, а від одного до другого краю Галактики – майже 100 тис. світлових років. Усі зорі обертаються навколо центра Галак-

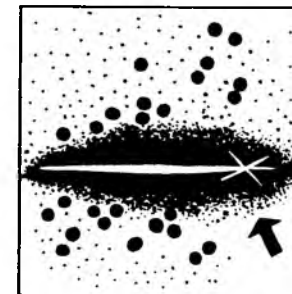


Рис. 27.1

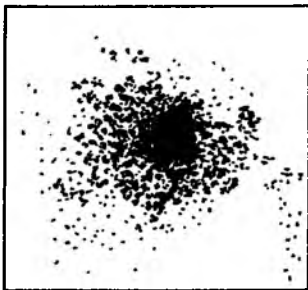


Рис. 27.2

тики. Період обертання Сонячної систем навколо ядра Галактики становить приблизно 200 млн років при швидкості руху близько 220 км/с. Усього в складі нашої Галактики понад 100 млрд зір, однією з яких є Сонце. На рис. 27.1 подано схему нашої Галактики, місцезнаходження Сонячної системи показано стрілкою з хрестиком.

Одне з найближчих до нас зоряних скупчень розміщене в сузір'ї Геркулеса (рис. 27.2).

Кульові скупчення утворюють у нашій Галактиці сферичну систему з яскраво вираженою концентрацією зір до центру Галактики. Діаметри кульових зоряних скупчень становлять десятки парсек, а кількість зір, що входять до них, – десятки і сотні тисяч.

§ 268. Інші галактики. Нескінченність Всесвіту

Галактики

Встановлено, що, крім нашої Галактики, є безліч подібних до неї зоряних систем, які називають *галактиками*.

Порівнюючи нашу Галактику з іншими галактиками, було визначено: **наша Галактика, як і галактики в Андромеді і в Трикутнику, має спіральну будову.**

Крім спіральних є еліптичні (зокрема, кульові) галактики, сочевицеподібні, голкоподібні, неправильні. За розмірами наша Галактика менша, ніж галактики в Андромеді. Водночас є галактики, менші за розмірами від нашої, наприклад Великі і Малі Магелланові Хмари, які є супутниками нашої Галактики і розміщені на відстані близько 120 тис. світлових років від неї. Всі галактики обертаються навколо своїх осей, як і наша Галактика.

Радіогалактики

Особливо цікаві галактики, які є потужними дискретними джерелами радіовипромінювання, їх називають *радіогалактиками*. На думку В. А. Амбарцумяна, радіогалактика виникає внаслідок процесу поділу початкової маси на дві галактики, які віддаляються одна від одної. Стадія поділу – перехід матерії з густішого в менш густий стан – спричинюється вибуховими процесами і супроводиться інтенсивним радіовипромінюванням. Вважають, що

радіогалактика – стадія, через яку проходить кожна галактика в ранній період свого розвитку.

Найбільш відома радіогалактика Лебідь А.

Квазари

Це потужні позагалактичні джерела електромагнітного випромінювання. Випромінювання квазарів у $10^3 - 10^4$ разів перевищує випромінювання всіх зір галактики. Одна з основних властивостей квазарів – змінність їх випромінювання в радіо-, ІЧ- і оптичному діапазонах. Фізична природа активності квазарів ще до кінця не розкрита. За гіпотезами, потужне випромінювання квазарів може бути зумовлене процесами зіткнення зір, спалахами наднових зір, перетворенням у випромінювання енергії магнітних полів обертового масивного магнітоплазмового тіла. Особливий інтерес квазари становлять як далекі об'єкти, що беруть участь у космологічному розширенні Метагалактики. Вивчення квазарів може кинути світло на ранні стадії еволюції Всесвіту.

Метагалактика

У сузір'ї Діви розміщене величезне скупчення галактик, діаметр цього скупчення близько 100 млн світлових років, а маса дорівнює приблизно квадрильйону сонячних мас. Таке скупчення галактик назвали *Надгалактикою*. Всі доступні області спостереження Всесвіту входять до складу більш грандіозної системи, ніж Надгалактика; її називають *Метагалактикою*, межі якої поки що неприступні для спостереження в найпотужніші сучасні телескопи. Але й Метагалактика – лише мізерна частина нескінченного Всесвіту.

Нескінченність Всесвіту

Всесвіт – це безмежний світ, нескінченний у просторі і в часі, який являє собою всю різноманітність форм існування матерії.

Всесвіт ніколи не мав початку і ніколи не матиме кінця, він завжди існував і буде існувати. Усе це стосується Всесвіту в цілому, точніше кажучи – матерії, з якої він складається. Окремі його частини, наприклад Земля, Сонячна система, зорі і навіть зоряні системи – галактики, постійно деінде виникають, зароджуються, здійснюють довгий шлях розвитку і, нарешті, припиняють своє існування в цьому вигляді для того, щоб мате-

рія, яка їх утворила, набула нової форми. Сама матерія, постійно змінюючи свою форму, не знищується ніколи: вона вічна, і вічний її рух. На зміну світам, які віджили, утворюються нові, на яких з часом також виникає життя, яке через поступове ускладнення відтворює своє найвище виявлення – розумних мислячих істот.

З розвитком науки і техніки розширюються межі дослідження Всесвіту, відкриваються більш далекі від нас світи і підтверджується вчення про нескінченність Всесвіту.

§ 269. Поняття про космологію

Розділ астрономії, який вивчає властивості Всесвіту як єдиного цілого, називають *космологією*. Сучасна космологія базується на працях А. Ейнштейна, О. О. Фрідмана і Е. Хаббла і спирається на два основних спостережуваних явища.

Перше полягає в тому, що

галактики і їх скупчення рівномірно розподілені у Всесвіті.

Друге явище –

лінії спектрів усіх галактик (крім деяких найближчих) зміщені в червоний бік.

Якщо це явище розглядати як ефект Доплера, то можна зробити висновки, що всі галактики віддаляються від нас із швидкістю

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (27.1)$$

Хаббл установив, що відношення $\Delta\lambda/\lambda$, яке визначають за спектром Галактики, пропорційне відстані R до Галактики, тобто галактики віддаляються зі швидкостями, пропорційними відстаням до них:

$$v = HR, \quad (27.2)$$

де H – стала Хаббла, яка характеризує швидкість розбігання галактик. Тепер вважають, що $H = 50 \dots 80 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$.

Співвідношення (27.2) називають *законом Хаббла*. Його можна трактувати як підтвердження розширення спостережуваної області Всесвіту – Метагалактики. Оскільки галактики мають додатні швидкості, пропорційні їх відстаням, то з цього випливає, що в минулому всі галактики вилетіли одночасно, але з різними швидкостями з деякого порівняно малого об'єму. Очевидно, це відбулося внаслідок вибухового процесу.

Додатковим доведенням правильності гіпотези “початкового вибуху” було відкриття в 1965 р. так званого реліктового випромінювання. Мож-

ливість існування цього випромінювання була передбачена американським фізиком-теоретиком С. Гамовим ще в 1949 р. Дослідження показали, що інтенсивність цього випромінювання є майже точною сталою для всіх напрямів, а розподіл за довжинами хвиль відповідає випромінюванню абсолютно чорного тіла, яке має температуру 3 К. Це випромінювання не пов'язане, очевидно, з жодними об'єктами Всесвіту, які існують тепер, а відображає розподіл матерії у Всесвіті на початковій стадії її розвитку. Коли припустити, що “початковий вибух” стався 15–20 млрд років тому і внаслідок розширення простору Всесвіту його температура почала різко зменшуватись, то розрахунки ведуть саме до значення 3 К. Така гіпотеза *гарячого Всесвіту*.

§ 270. Розвиток Всесвіту

Виходячи з гіпотези гарячого Всесвіту, мав би існувати особливий початковий *сингулярний* (невимовний) *стан*, коли густина речовини була формально нескінченно великою (10^{93} г/см^3). Цей момент умовно вважають за нуль часу. В умовах великої густини і дуже високої температури ($T > 10^{13} \text{ К}$) поблизу сингулярності не могли існувати не тільки молекули або атоми, а й атомні ядра, існувала лише рівноважна суміш елементарних частинок, включаючи фотони і нейтрино.

Оскільки Всесвіт спочатку розширюється з великою швидкістю, то очевидно, що висока густина і температура могли існувати дуже короткий час. На момент часу приблизно 10^{-4} с густина досягає приблизно 10^{14} г/см^3 , а на момент часу приблизно $0,01 \text{ с}$ густина зменшується до 10^{10} г/см^3 . На цей час у Всесвіті мали б існувати фотони, електрони, позитрони, нейтрино і антинейтрино, а також невелика кількість протонів і нейтронів. Внаслідок наступних перетворень на момент часу приблизно 3 хв з нуклонів утворюється суміш легких ядер (2/3 водню і 1/3 гелію), всі інші хімічні елементи синтезуються з цієї дозорної речовини набагато пізніше внаслідок термоядерних реакцій у надрах зір (див. § 266).

Нуклони й електрони рекомбінували в атомі протягом приблизно 10^6 років, після чого речовина Всесвіту стає прозорою для решти фотонів, які тепер спостерігаються у вигляді реліктового випромінювання.

Викладена вище космологічна картина ще дуже приблизна і недостатньо обґрунтована, але вона дає можливість з єдиного погляду зрозуміти множини абсолютно різних фактів і цілеспрямованіше планувати нові астрономічні дослідження.

Короткі висновки

- Астрономія – наука, яка вивчає рух, будову і розвиток небесних тіл і їх систем. Нагромаджені нею знання застосовують для практичних потреб людства.
- Молочний Шлях – це видима на небі срібляста смуга, а наша Галактика – це просторова зоряна система. Більшість її зір ми бачимо в смузі Молочного Шляху, але ними вона не вичерпується. До Галактики входять зорі всіх сузір'їв.
- Світ галактик також різноманітний, як і світ зір. Особливий інтерес становлять: радіогалактики – стадії, через які проходить кожна галактика в ранній період свого розвитку, квазари – зореподібні джерела радіовипромінювання.
- Всесвіт – безмежний світ, нескінченний у просторі і в часі, являє собою всю різноманітність форм існування матерії.
- Реальний Всесвіт досить добре описується моделлю розширюваного Всесвіту.
Розширення Всесвіту свідчить про те, що раніше галактики були в середньому ближче одна до одної, ніж тепер, а близько 10–15 млрд років тому середня густина матерії у Всесвіті, очевидно, була такою високою, що речовина в ньому не могла існувати у формі зір і галактик. Був густий газ, який швидко розширювався; він складався в основному з водню і гелію. З цього газу потім і утворилися галактики і зорі.
- Доведенням гіпотези гарячого Всесвіту було відкриття в 1965 р. реліктового випромінювання.

Запитання для самоконтролю і повторення

1. Що вивчає астрономія? 2. Що називають Галактичним екватором?
 3. Яку будову має наша Галактика? 4. Як виникають радіогалактики?
 5. Що таке квазари? 6. Як Ви розумієте нескінченність Всесвіту? 7. Що вивчає космологія? 8. Сформулюйте закон Хаббла. 9. Розкажіть про гіпотезу гарячого Всесвіту. 10. Що таке реліктове випромінювання?
-

Висновок

Сучасна наукова картина світу

Пізнання світу людиною – діалектично складний і суперечливий процес, творчий за своїм характером.

Як було зазначено у вступі, до 1873 р. панувала механічна картина світу, яку замінила релятивістська фізична картина.

Першим кроком на шляху побудови нової фізичної картини світу була гіпотеза М. Планка, сформульована в 1913 р.: атоми випромінюють світло дискретними порціями, квантами. Потім А. Ейнштейн висловив припущення, що світло не тільки випромінюється, а й поширюється, а також поглинається речовиною дискретними порціями, квантами.

Наступним кроком була модель атома водню, яку запропонував у 1913 р. Н. Бор. Цю модель побудували на основі поєднання класичних уявлень з квантовими постулатами.

Нарешті в 1924 р. Л. де Бройль сформулював загальний принцип, важливий для побудови нової фізичної теорії, принцип корпускулярно-хвильового дуалізму. Зв'язок корпускулярних і хвильових властивостей визначається формулою $\lambda = h / p$. По суті, це була спроба синтезувати дві фізичні картини світу: ньютонівську (корпускулярну) і максвеллівську (польову – хвильову). Остаточна нова фізична теорія, яку назвали квантовою, набрала закінченої форми завдяки працям Е. Шредингера.

Спочатку квантова механіка створювалась як теорія електронних оболонок атомів. Дальшого прогресу було досягнуто поєднанням принципу квантування з принципами теорії відносності. Завдяки цьому поєднанню і вдалося вивести рівняння, яке найправдивіше відображає властивості електрона, зокрема специфічну квантову характеристику, спин. Тільки з урахуванням спін-принципу Паулі, який забороняє двом електронам перебувати в атомі в тому самому стані, були розкриті закономірності будови електронних оболонок атомів і пояснено періодичний закон Менделєєва.

Протягом ряду десятиріч фізики вважали своїм головним завданням проникнення в структуру матерії. Дослідження електронної оболонки атома, а на цій основі і властивостей твердого тіла стало епохальним для фізики ХХ ст. Проникнення в структуру атомного ядра, а потім і в структуру ряду типів частинок стало продовженням наукового штурму загальних принципів структурної організації матерії. Отже, нам треба узагальнити наявні відомості з погляду сучасної фізики на структурні форми матерії, закономірності їх взаємодії, ґрунтуючись на невичерпаності матерії і можливості її пізнання, тобто простежити за діалектичним розвитком

матеріального світу. З точки зору сучасної фізики узагальнювати ці відомості розпочнемо з елементарних частинок, оскільки на ранній стадії розвитку Всесвіту саме вони утворились першими. На сьогодні відомо кілька сотень (порядку 400) елементарних частинок, причому стабільними є лише фотони, нейтрино, електрони та їх античастинки і деякою мірою протони. Решта частинок не є стабільною. Численними дослідженнями було встановлено, що елементарними частинками, які не проявляють внутрішньої структури, на сьогодні можна вважати лише фотони і лептони.

Наявність багатьох елементарних частинок наводить на думку, що не всі вони найпростіші. У 1964 р. незалежно один від одного М. Гелл-Ман і Дж. Цвейг висунули гіпотезу, за якою більшість відомих елементарних частинок побудовані з так званих фундаментальних – “первинних” – частинок – кварків. Досліди на розсіяння нейтрино і електронів надвисоких енергій на нуклонах підтвердили кваркову структуру протонів і нейтронів. Але “розщепити” нуклони на кварки не вдалося. На жаль, кварків у вільному стані не виявлено.

Міркування про елементарні частинки нарешті ведуть нас до будови атомів і молекул, оскільки саме з них побудований весь навколишній світ і ми самі. Атом зумовлює індивідуальність будь-якого хімічного елемента. До ядра атома входять протони і нейтрони. Електронні оболонки атомів зв’язують їх у молекулу. Ядра атомів важких елементів можуть спонтанно перетворюватись в ядра легших атомів. Цей процес може відбуватися і в зворотному напрямі. З ядер атомів легких елементів можуть утворюватися ядра атомів важких елементів. Це відбувається під час термоядерних реакцій, які тривають, наприклад, у надрах зір.

Початкове завдання фізики елементарних частинок полягало в тому, щоб знайти елементарні структурні одиниці матерії.

Розвиток уявлень про еволюцію Всесвіту з надгустого стану підказував іншу постановку питання: що, коли фундаментальні структурні одиниці матерії виникли в процесі розширення Всесвіту, в складній динаміці так званого великого вибуху? Багата різноманітність елементарних частинок, що виникають під час взаємодій при високих енергіях, практично не існує в природних взаємодіях при малих енергіях. Проте така різноманітність могла існувати на початку великого вибуху і, можливо, при тому стані Всесвіту, який було названо сингулярністю, тобто стані надгустого стиску і величезних температур. І, очевидно, від нього ведуть свій початок сьогоднішні стабільні елементарні частинки, які є будівельним матеріалом Всесвіту в теперішньому його стані.

Особливістю елементарних частинок є їх взаємоперетворюваність, якій, за сучасними даними, відповідають чотири типи фізичних взаємодій: слабка, сильна (ядерна), електромагнітна, гравітаційна. Кожному типу взаємодій відповідає своє поле, і кванти цього поля, тобто взаємодії, є

обмінними. Інакше кажучи, частинки в процесі взаємодії обмінюються між собою квантами відповідних полів. Цю якість було покладено в основу можливості пояснення різних видів взаємодії елементарних частинок як різних прояви єдиної взаємодії. Тепер створено єдину теорію слабких електромагнітних взаємодій. Робиться спроба створити єдину теорію трьох видів взаємодій у мікросвіті: слабку, сильну, електромагнітну, так зване “велике об’єднання”. Сміливіші мрії вчених пов’язані з пошуками можливого супероб’єднання, яке включало б і гравітаційне. У цьому разі в єдину теорію структури матерії поряд з кварками, лептонами та іншими елементарними частинками ввійшли б і гравітони.

Отже, вивчення властивостей мікрочастинок та їх взаємодій допомагає зрозуміти еволюцію Всесвіту, починаючи з моменту її розширення до наших днів.

З точки зору сучасної фізики всю багатоманітність видів матерії можна звести до існування двох основних її видів: речовини і поля.

Фізичні поля мають властивість пов’язувати елементарні частинки в атоми, молекули, мікротіла, планети тощо.

Усяка зміна, яка відбувається в навколишньому світі, є рухом матерії. Джерелом руху є чотири типи фізичних взаємодій. Під час руху частинка має і хвильові властивості.

Отже, на даному етапі розвитку фізика стверджує, що корпускулярно-хвильовий дуалізм властивий усім формам матерії. Таким чином,

у світі нічого іншого не існує, крім рухомої матерії, яка існує вічно. Пізнання світу – процес нескінченний. Елементарне і складне в будові речовини – поняття відносні, і призначення людини в тому, щоб дослідити і зрозуміти свій Всесвіт.

Довідковий матеріал

1. Основні фізичні сталі (округлені значення)

Фізична стала	Позначення	Числове значення
Нормальне прискорення вільно падаючих тіл	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравітаційна стала	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^3$
Стала Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярна газова стала	R	$8,31 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$
Стала Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$
Молярний об'єм ідеального газу (об'єм 1 моля за нормальних умов)	V_m	$0,0224 \text{ м}^3 / \text{моль}$
Заряд електрона	e	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Стала Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл} / \text{моль}$
Швидкість світла у вакуумі	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Стала Стефана – Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Стала Віна	C	$2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Стала Планка	h	$6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Стала Рідберга	R	$1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Радіус Бора	r_B	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Довжина хвилі комптонівського випромінювання електрона	λ	$2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Стала іонізації атома водню (енергія іонізації)	J_0	$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 13,6 \text{ еВ}$
Атомна одиниця маси	а. о. м.	$1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Коефіцієнт пропорційності між енергією (МеВ) і масою (а. о. м.)	k	$9 \cdot 10^{16} \text{ Дж} / \text{кг} = 931,44 \text{ МеВ} (\text{а. о. м.})$

2. Астрономічні величини.

середній радіус Землі – $6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$;
 середня густина Землі – 5500 кг/м^3 ;
 маса Землі – $5,96 \cdot 10^{24} \text{ кг}$;
 радіус Сонця – $6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$;
 середня густина Сонця – 1400 кг/м^3 ;
 маса Сонця – $1,97 \cdot 10^{30} \text{ кг}$;
 радіус Місяця – $1,74 \cdot 10^6 \text{ м}$;

маса Місяця – $7,3 \cdot 10^{22} \text{ кг}$;
 середня віддаль між центрами Землі і Місяця – $3,84 \cdot 10^8 \text{ м}$;
 середня віддаль між центрами Сонця і Землі – $1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$;
 період обертання Місяця навколо Землі – 27 діб 7 год 43 хв.

3. Густина рідин, 10^3 кг/м^3 :

вода (при $4 \text{ }^\circ\text{C}$) – 1; гліцерин – 1,26; гас – 0,8;
 масло – 0,9; ртуть – 13,6; спирт – 0,8.

4. Густина газів за нормальних умов, кг/м^3 :

азот – 1,25; аргон – 1,78; водень – 0,09; повітря – 1,29;
 гелій – 0,18; кисень – 1,43.

5. Поверхневий натяг рідин (при $20 \text{ }^\circ\text{C}$), Н/м .

вода – 0,072; гліцерин – 0,066; спирт – 0,022.

6. Густина (ρ), модуль поздовжньої пружності E (модулі Юнга), температурний коефіцієнт лінійного розширення α (середні значення)

Речовина	$\rho \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	$E \cdot 10^{10}, \text{ Н/м}^2$	$\alpha \cdot 10^{-6}, \text{ К}^{-1}$
Алюміній	2,7	7,0	24
Вольфрам	19,15	41,1	4,3
Залізо (сталь)	7,85	22,0	11,9
Константан	8,9	21,0	17,0
Лід	0,92	0,28	–
Мідь	8,8	12,98	16,7
Нікель	8,8	20,4	13,4
Ніхром	8,4	–	–
Фарфор	2,3	–	3

7. Питома теплота плавлення, 10^{-4} Дж/кг :

лід – 33,5; свинець – 2,3; мідь – 21,3.

8. Питома теплота пароутворення, 10^{-5} Дж/кг :

вода – 22,5; ефір – 6,68.

9. *Питома теплоємність, 10^{-2} Дж/(кг · К):*

вода – 41,9; лід – 21,0; свинець – 1,26;
ніхром – 22,0; мідь – 3,8.

10. *Питомий опір, 10^{-8} Ом · м:*

вольфрам – 5,5; залізо – 9,8; ніхром – 110,0;
мідь – 1,7; срібло – 1,6; нікелін – 40,0.

11. *Діелектрична проникність (відносна):*

парафін – 2,0; слюда – 6,0; вода – 81,0;
трансформаторне масло – 2,2; скло – 7,0; спирт – 26,0.

12. *Температурний коефіцієнт опору провідників, 10^{-3} · К⁻¹:*

мідь – 4,2; вольфрам – 5,2.

13. *Показник заломлення:*

алмаз – 2,42; вода – 1,33; лід – 1,31;
скло – 1,52; кварц – 1,55; сірковуглець – 1,63.

14. *Маса m_0 і енергія E_0 спокою деяких елементарних частинок*

Частинка	m_0		E_0	
	а. о. м.	10^{-27} кг	МеВ	10^{-10} Дж
Електрон	$5,486 \cdot 10^{-4}$	0,00091	0,511	0,00081
Протон	1,00728	1,6724	938,23	1,50
Нейтрон	1,00867	1,6748	939,53	1,51
Дейтрон	2,01355	3,3325	1875,5	3,00
α -частинка	4,0047	6,6444	3726,2	5,96

15. *Робота виходу електронів з металу, еВ:*

алюміній – 3,7; вольфрам – 4,5; літій – 2,3;
мідь – 4,3; платина – 6,3; цезій – 1,8; цинк – 4,0.

Відповіді до задач для самостійного розв'язування

Глава 1

2. 0,2 с; 0,02 с. 3. $2,6 \cdot 10^9$ м; $1 \cdot 10^{15}$ м.
5. 12 м/с. 7. На схід. 8. 2 м/с^2 . 9. 80 с.
10. Одночасно. 11. 19,6 м; 39,2 м/с.
12. 150 м. 14. 6,4 с; 6 с; 6,8 с. 15. 2.
17. 45° . 18. $7,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. 19. 463 м/с.
20. 4,2 об/с. 21. 4,5 м. 22. 7,8 км/с;
9,1 м/с². 23. $-0,1 \text{ рад/с}^2$.

Глава 2

4. 0,3 м. 6. $6,4 \cdot 10^{-23}$ кг · м/с. 7. 2,6 кг · м/с.
8. 3,6 Н. 9. 4,9 Н; 5,9 Н; 3,9 Н. 11. $4,9 \text{ м/с}^2$;
 $1,5 \text{ Н}$. 12. $0,1 \text{ м/с}^2$. 13. 45 кг. 15. 15 м/с;
750 кН. 17. 1 м/с^2 ; 4,9 Н. 18. 156,5 кН.
19. 39 кН. 20. 2,4 м/с. 21. 250 м. 22. 10; 11.
23. $3,6 \cdot 10^{22}$ Н. 24. $3,46 \cdot 10^8$ м. 25. 9,65 м/с².
27. $2 \cdot 10^{30}$ кг.

Глава 3

1. $1 \cdot 10^3$ кг. 2. 392 Вт. 3. 3 кДж. 4. 235 кВт.
5. 5 м/с. 6. 4 см. 7. 5 м/с. 8. 24 м/с.
9. 6 м/с. 10. Ні. 11. 5 кг. 12. 981 Дж.
13. 10 кг; 500 Дж. 14. 10 м/с; 1,66 кН.
15. 3,96 кН. 16. 5 м. 17. 8 см. 18. 10 м.
19. $8 \cdot 10^3$ м/с.

Глава 4

1. $3 \cdot 10^{-26}$ кг. 2. $9,3 \cdot 10^{-26}$ кг; $7,3 \times$
 $\times 10^{-26}$ кг. 3. $4,02 \cdot 10^{23}$. 4. $8 \cdot 10^{-3}$;
 $4,8 \cdot 10^{21}$. 5. $32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. 6. $3,3 \cdot 10^2$ К.
7. 10^5 Па. 8. $2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. 9. $7,2 \times$
 $\times 10^{22}$. 10. 77,46 м/с; 71,4 м/с; 63,26 м/с.
11. $7,12 \cdot 10^{-7}$ м. 12. $6,5 \cdot 10^{-2}$ м.

Глава 5

1. 588 Дж. 2. 20 Дж. 3. 30 °С. 4. 60 °С.
5. 2,5 л. 6. ≈ 190 л; ≈ 130 л. 7. 512,5 Дж.
10. 891 К.

Глава 6

1. а) ≈ 887 Па; 1330 Па; б) 4961 Па; пере-
насичена; 997,5 Па; насичена. 2. 1995 Па.
3. 1457 кДж. 4. 86 г. 5. 5 °С. 6. ≈ 265 км.
7. Не випадає. 8. 8 К.

Глава 7

1. $\approx 0,017$ Дж. 2. 0,072 Н/м. 3. $0,6 \times$
 $\times 10^{-4}$ Дж. 4. 288 Па. 5. 0,03 Н/м.
6. 22 Н/м. 7. 0,03 м.

Глава 8

1. 292 Дж. 2. 177 м. 3. 52 Н; $2,6 \times$
 $\times 10^{-2}$ Дж. 4. $2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$. 5. $155 \cdot 10^{-6}$ Н/м.
6. 676 Н. 7. 600 °С. 8. $\approx 63,75 \text{ м}^3$. 10. 52 °С.
11. 0,79 г/см³.

Глава 9

1. $1,53 \cdot 10^7$ Дж. 2. $5 \cdot 10^5$ Дж. 3. $\approx 0,21$ кг.
4. 3,6 кг. 5. 0,12 кг.

Глава 10

1. $8,2 \cdot 10^{-8}$ Н; $2,19 \cdot 10^6$ м/с; $6 \cdot 10^{11}$ Н/Кл.
2. $6,1 \cdot 10^{-8}$ Кл; $7,88 \cdot 10^{-15}$ Н. 3. $-0,95 \times$
 $\times 10^{-7}$ Кл. 4. $4,75 \cdot 10^{-4}$ Кл. 5. $2 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.
6. $2,2 \cdot 10^{-2}$ Дж. 7. $4,1 \cdot 10^7$ м/с; $7,8 \cdot 10^{-16}$ Дж.
8. 500 В; 0,72 м; 0,24 м. 9. 285 В. 10. $4,5 \times$
 $\times 10^{-5}$ Дж; $2,4 \cdot 10^3$ В; $1,8 \cdot 10^3$ В. 11. Збіль-
шується в чотири рази. 12. $1,2 \cdot 10^{-6}$ Дж.
13. $3,3 \cdot 10^5$ В/м. 14. 0,706 Дж. 15. $0,94 \times$
 $\times 10^{-2}$ Н; 0,628 Дж/м³. 16. $486 \cdot 10^{-6}$ Кл;
 $682 \cdot 10^{-6}$ Кл; 97,2 В.

Глава 11

1. 2 мкА. 2. 30 Кл. 3. 1,98 В. 4. 14 Ом.
5. 0,5 А. 6. 0,84 А; 0,17 А; 0,67 А.
7. 5 Ом. 8. 10 хв; 40 хв. 9. 1600 Вт.
10. ≈ 76 %.

Глава 12

1. 3,7 В. 2. 6,3 еВ. 3. 0,011 В. 4. 500 К.
5. $6,4 \cdot 10^{-6}$ В/К.

Глава 13

1. 1118 мг. 2. 20 А. 3. 80 А/м². 4. 1 с.

Глава 16

1. 76,4 А/м; 57,3 А/м. 2. 0,06 м від меншого; 0,49 м від меншого. 3. 35,2 А/м.
4. $1,08 \cdot 10^{-4}$ Тл. 5. $3,39 \cdot 10^{-2}$ Тл. 6. $2,66 \times 10^{-3}$ м. 7. $2,99 \cdot 10^4$ В. 8. $3,17 \cdot 10^6$ м/с.
9. 0,126 В/А.

Глава 17

1. 0,9 В. 2. $4,01 \cdot 10^{-4}$ А. 3. 5,29 м/с.
4. 0,632 Дж. 5. В 416 разів.

Глава 18

1. 10,5 м. 2. 6. 3. 12,7 мГн. 4. $1,2 \cdot 10^{-3}$ Дж.
5. $1,15 \cdot 10^{-4}$ Дж. 6. $0,76 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. 7. $1,3 \times 10^{-5}$ с. 8. 1,256 А. 9. 25 В. 10. $\approx 7,5$ В.
11. ≈ 94 %. 12. 20 Ом. 13. 30 В; 60 В;
180 В; 1200 В.

Глава 20

1. 32 лк; 25,6 лк; $25 \cdot 10^3$ лм; $2 \cdot 10^3$ кд.
2. 17 лк; 16 лк. 3. $5 \cdot 10^4$ лк. 4. 0,2 м.
5. 1000 лм.

Глава 21

1. $\approx 1,5$ м. 2. 39°. 3. 56°; 34°. 4. 42°;
24°. 5. Немає. 6. $\approx 1,4$. 7. 0,128 мкм.
8. 0,345 мкм. 9. $\lambda/3$; темний. 10. 14 мм.
11. $0,5 \cdot 10^{-5}$ м. 12. 26°; 47° 24'. 13. ± 4 .
14. $1,92 \cdot 10^{-6}$ м; 1 і 2. 15. 49° 37'.
16. 48° 50'.

Глава 22

1. $2,82 \cdot 10^8$ м/с; 0,67. 2. $2,3 \cdot 10^8$ м/с.
3. $1,83 \cdot 10^{-7}$ с. 4. $2,9 \cdot 10^8$ м/с; $5,96 \times 10^{-10}$ Дж;
4,46 $\cdot 10^{10}$ Дж. 5. $2,3 \cdot 10^{-13}$ Дж.
6. $\angle 177,5$; $2,7 \cdot 10^{10}$ Дж; $17,78 \cdot 10^{14}$ Дж.
7. $2,68 \cdot 10^{-22}$ кгм/с; $1,15 \cdot 10^{-13}$ Дж;
 $3,37 \cdot 10^{-14}$ Дж. 8. $13,49 \cdot 10^6$ м/с; $\approx 1,5 \times 10^{-10}$ Дж;
 $15,2 \cdot 10^{-14}$ Дж. 9. ≈ 300 %.
10. $2,91 \cdot 10^8$ м/с; ≈ 90 раз.

Глава 23

1. 365,4 К. 2. 4 %. 3. ≈ 330 К. 4. 0,3.
5. $2,44 \cdot 10^3$ К. 6. 1,35 кВт/м². 7. Збільшилась на ≈ 500 К. 8. 2 еВ; $1,25 \cdot 10^4$ еВ.
9. $4,4 \cdot 10^{-36}$ кг; $8,8 \cdot 10^{-32}$ кг; $1,8 \cdot 10^{-30}$ кг.
10. 0,0024 нм. 11. $6,05 \cdot 10^5$ м/с. 12. $4,7 \times 10^{14}$ Гц.
13. 3,1 В. 14. $755 \cdot 10^{23}$ м⁻² с⁻¹.
15. 9 Н/м².

Глава 24

1. $1,5 \cdot 10^{-16}$ с. 2. $0,76 \cdot 10^6$ м/с. 3. 973×10^{-10} м.
4. 0,039 нм. 5. 0,095 нм. 6. $6,62 \cdot 10^{-22}$ нм. 7. 25; 1/25. 8. $2 \cdot 10^6$ м/с;
 $\approx 10^{23}$ м/с².

Глава 25

1. $6,84 \cdot 10^{11}$ Дж. 2. 10,98 МеВ. 3. $5,36 \times 10^{-13}$ Дж;
 $9,04 \cdot 10^{-13}$ Дж. 4. Кремній, виділяється: 154,3 МеВ.
5. $3,347 \cdot 10^{-27}$ кг. 6. 0,206 а. о. м.; 307; $4 \cdot 10^{-13}$ Дж;
 $12,8 \cdot 10^{-13}$ Дж/нуклон. 7. 2240 років.
8. ${}^4_2\text{He}$. 9. ${}^{74}_{31}\text{Se}$. 10. 2,217 меВ.

Предметний покажчик

Абсорбція 189
Акумулятори 333
Альфа-частинка 555, 573, 584
Ампер 8
Амперметр 311
Амплітуда 401
Анігіляція 592
Анізотропія 233
Антинейтрино 585
Антинейтрон 592
Антипротон 592
Античастинки 591, 592
Атом 151
Атоми мічені 604
Афелій 19

База 358
Баріони 593
Бетатрон 376
Бозони 593

Вага тіла 97
Взаємодія гравітаційна 6, 593
– електромагнітна 6, 593
– міжмолекулярна 155
– сильна 6, 593
– слабка 6, 593
Вебер 371
Вектор магнітної індукції 363
Випромінювання індукване 566
– реліктове 622
– рентгенівське 501
– теплове 530
Вібратор Герца 439
Відносність відстаней 518
– одночасності 515
– проміжків часу 519
Вологість абсолютна 212
– відносна 212

Газ ідеальний 161
Гальванопластика 331
Гальваностегія 331
Гамма-випромінювання 586

Генератор квантовий 566
– струму 420
Гігрометр 213
Гідросфера 215
Гіпотеза Ампера 361
– де Бройля 560
– Планка 535
– Фермі 585
Гістерезис 381
Голографія 485
Градус 169
Границя міцності 240
Ґрати дифракційні 483
– кристалічні 351

Дефект маси 581
Динаміка релятивістська 523
Диполь 438
Дисоціація електролітична 327
Дисперсія світла 493
Дифракція світла 480
Дифузія 154
Діамагнетика 378
Діод ламповий 345
– напівпровідниковий 358
Дірка 354
Довжина вільного пробігу 317
– хвилі 438
Домен 379
Дослід Девіссона 560, 561
– Джермера 560, 561
– Майкельсона 454
– Резерфорда 555
– Ремера 453
– Штерна 159
Дуга електрична 341

Еквівалент електрохімічний 329
– хімічний 329
Екліптика 18
Електроємність 284
Електроліз 328
Електропровідність питома 301
Емітер 358

Енергія 123
– внутрішня 183
– ідеального газу 184
– електричного поля 272
– зв'язку ядра 581
– кінетична 124
– магнітного поля 395
– повна механічна 130
– потенціальна 126
– Сонця 614
Ефект Вавилова–Черенкова 577
– Джоуля–Томсона 210
– Доплера 521

Закон Ампера 368
– Біо–Савара–Лапласа 366
– Бойля–Мариотта 170
– Брюстера 491
– відбивання світла 468
– всесвітнього тяжіння 90
– Гей–Люссака 170
– Гаука 239
– Джоуля–Ленца 309, 319
– додавання швидкостей
– релятивістський 522
– електромагнітної індукції 388
– заломлення світла 469
– збереження електричного заряду 265
– зміщення Віна 534
– Кірхгофа 533
– Кулона 266
– Мозлі 503
– Ома 300, 304, 417
– радіоактивного розпаду 573
– Стефана–Больцмана 533
– Стокса 230
– Столстова 538
– термодинаміки другий 195
– – перший 189
– Фарадея другий 329
– – перший 328
– Хаббла 622
– Шарля 171
Закони освітленості 460
– фотоефекту 538, 539
Залежність маси від швидкості 523
Заряд електричний 171
– електрона 171
– елементарний 171
Зодіак 17
Зрідження газів 211

Ідеальний газ 161
Ізобара 170
Ізопроецес 169
Ізотерма 170
Ізотопи 579
Ізохора 171
Імпульс 79
Індуктивність 415
Індукція електромагнітна 387
– електростатична 283
Інтерференція світла 473
– хвиль 473
Інтерферометр 479

Калориметр 188
Камера Вільсона 575
Кандела 458
Квазари 621
Кварки 593
Кельвін 8
Кількість речовини 152
– теплоти 187
Кільця Ньютона 478
Когерентність 473
Коефіцієнт корисної дії теплових двигунів 194
– лінійного розширення 242
– об'ємного розширення 243
– опору температурний 302
– потужності 418
– розмноження нейтронів 600
– трансформації 423
Коливання вимушені 411
– вільні 405
– гармонічні 402
– електромагнітні 405
– згасаючі 407
Комптонівське розсіяння 587
Конденсатор 285
Космічне випромінювання 588
– – вторинне 589
– – первинне 589
Кристалічні тіла 233
Критичний стан 209
Кулон 267
Кут Брюстера 491
– відбивання 468
– заломлення 469
– падіння 468
– повного відбивання 472
– тілесний 456

Лазери 567, 568
Лампа електронна 345
Лептони 584
Лінії магнітної індукції 364
– силові електричного поля 269
Лічильник Черенкова 578
Люкс 459
Люмен 458
Люмінесценція 534

Магнітна індукція 363
Магнітосфера 376
Маса 76
– молекулярна 153
Мезони 593, 594, 595
Метеорити 260
Модель атома планетарна 555
Модуль Юнга 239
Модуляція 442
Молекула, розміри 151
Моль 8
Монокристали 234
Монохроматор 499
Мюони 589

Напруга 304
– лінійна 426
– механічна, нормальна 239
– фазна 426
Напруженість електричного поля 268
– магнітного поля 365
Нейтрино 591
Нейтрон 591
Нуклони 579
Нуль Кельвіна 171

Ом 301
Опір ємнісний 415
– індуктивний 416
Орбіта 17
Осцилятор гармонічний 405

Пара електрон-позитронна 587
Парамагнетика 379
Пара насичена 207
Парсек 21
Перетворення Галілея 512
– Лоренца 517
Перигелій 19
Період 54
Плазма 159, 342

Плутоній 602
Поверхні еквіпотенціальні 275
Поділ урану 598
Позитрон 587
Полікристали 234
Поляризація дипольна 279
– електронна 279
– іонна 279
Поляризованість 279
Полярні роїди 493
Постулати Бора 556, 557
Потенціал 273
Потік магнітний 371
Потужність 122
– змінного струму 418
– постійного струму 310
Правило зміщення 584
– Кірхгофа друге 306
– – перше 305
– Ленца 388
– лівої руки 373
Принцип відносності Галілея 511
– Гюйгенса 466
– Гюйгенса–Френеля 481
– заборони Паулі 565
Принцип комбінаційний Рітца 554
– суперпозиції 473
Прискорення 37
– миттєве 38
– середнє 39
Провідність власна 355
– домішкова 355
Проміння інфрачервоне 440, 441
– ультрафіолетове 440, 441
Психрометр 213

Радіоактивність природна 572
– штучна 596
– радіоастрономія 446
Радіоприймач Попова 441
Реакції ланцюгові 599
– термоядерні 612
Резонанс 412
Рівні енергетичні 352
Рівняння Ейнштейна для зовнішнього ефекту 540
– Менделєєва – Клапейрона 174
– теплового балансу 188
Рідина 223
Різниця потенціалів 274
Робота електричного струму 310

Розчинність 259
 Рух броунівський 154

Самоіндукція 392
 Світловий потік 455
 Світловод 472
 Сила 73
 – Ампера 372
 –коерцитивна 381
 –Лоренца 373
 – поверхневого натягу 225
 – пружності 101
 –світла 457
 –струму 298, 299
 – тертя 99
 Синтез термоядерний 614
 Система відліку 510
 – інерціальна 511
 – сонячна 18
 – термодинамічна 182
 Спектри 495, 496
 Спектрограф 499
 Спектрометр 499
 Сповільнення часу 520
 Стала Авогадро 153
 – Больцмана 175
 – грат 224
 – електрична 267
 – Лошмідта 153
 – магнітна 366
 – молярна універсальна газова 174
 – Планка 536
 – Рідберга 559
 – Фарадея 329
 Струм індукційний 387
 – насичення 338
 Сублімація 206

Температура 167
 – кипіння 217
 – критична 209
 – плавлення 250
 – термодинамічна 172
 Теорема Остроградського-Гаусса
 для електричного поля 270
 – для магнітного поля 371
 Теорія відносності спеціальна 510–529
 – молекулярна кінетична 149, 150
 – світла електромагнітна 452
 – квантова 536
 Теплоємність речовини питома 187

Термістор 356
 Термометр 168
 Тесла 364
 Тетрод 345
 Тиск газу 167
 – молекулярний 223
 – світла 544
 Точка потрійна 258
 – роси 213
 Транзистор 358
 Трансформатор 422
 Триод 346
 Трубка рентгенівська 502

Фаза коливань 402
 Фарада 284
 Ферміони 593
 Феромагнетики 379
 Формула Бальмера 553
 – Томсона 406
 Фотофект 587
 Фотометрія 456
 Фотон 536
 Фотострум 538
 – насичення 538
 Фраунгоферові лінії 500

Характеристика вольт-амперна 346
 Хвилі де Бройля 560
 – електромагнітні 437

Цикл Карно 194
 Циклотрон 375

Час власний 520
 Частинки елементарні 590
 Частота коливань 401
 – циклічна 401

Швидкість 31
 – коливання 403
 – миттєва 33
 – світла 454
 – середня 32

Явище Зеебека 322
 – Пельтьє 323
 Ядерна модель атома 555
 Ядерний реактор 600
 Ядро атома 557

Зміст

Передмова	3
Вступ	4
Задачі для самостійного розв'язування	22
Розділ 1. МЕХАНІКА	23
Глава 1	
Кінематика	24
§ 1. Механічний рух	24
§ 2. Переміщення. Шлях	28
§ 3. Швидкість	31
§ 4. Рівномірний прямолінійний рух	35
§ 5. Прискорення	37
§ 6. Рівнозмінний прямолінійний рух	41
§ 7. Вільне падіння	47
§ 8. Рух тіла, кинутого під кутом до горизонту	50
§ 9. Рівномірний рух колом	54
§ 10. Рівнозмінний рух колом	59
Задачі для самостійного розв'язування	69
Глава 2	
Закони механіки Ньютона	71
§ 11. Перший закон Ньютона	71
§ 12. Сила	73
§ 13. Маса	76
§ 14. Імпульс	79
§ 15. Другий закон Ньютона	81
§ 16. Основний закон класичної динаміки	85
§ 17. Третій закон Ньютона	86
§ 18. Закон всесвітнього тяжіння	87
§ 19. Гравітаційне поле	93
§ 20. Сила тяжіння. Вага	96
§ 21. Способи вимірювання маси тіла	98
§ 22. Сили в механіці	99
Задачі для самостійного розв'язування	110
Глава 3	
Закони збереження у механіці	112
§ 23. Закон збереження імпульсу	112

§ 24. Реактивний рух.....	115
§ 25. Робота сили.....	116
§ 26. Робота потенціальних сил.....	119
§ 27. Потужність.....	122
§ 28. Енергія.....	123
§ 29. Кінетична енергія.....	124
§ 30. Потенціальна енергія.....	126
§ 31. Закон збереження механічної енергії.....	130
§ 32. Закони збереження – фундаментальні закони природи.....	132
§ 33. Симетрія і закони збереження.....	133
§ 34. Застосування законів збереження.....	134
Задачі для самостійного розв’язування.....	147

Розділ 2. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ І ТЕРМОДИНАМІКИ..... 149

Глава 4

Основи молекулярно-кінетичної теорії. Ідеальний газ.....	149
§ 35. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії.....	149
§ 36. Розміри і маса молекул та атомів.....	151
§ 37. Броунівський рух. Дифузія.....	153
§ 38. Сили й енергія міжмолекулярної взаємодії.....	155
§ 39. Про будову газоподібних, рідких і твердих тіл.....	157
§ 40. Швидкості руху молекул та їх вимірювання.....	159
§ 41. Ідеальний газ. Тиск газу.....	161
§ 42. Середня довжина вільного пробігу молекул у газі.....	163
§ 43. Поняття про вакуум. Міжзоряний газ.....	165
§ 44. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів.....	165
§ 45. Температура та її вимірювання.....	167
§ 46. Газові закони.....	169
§ 47. Абсолютний нуль температури. Термодинамічна шкала температур.....	171
§ 48. Рівняння стану ідеального газу. Молярна газова стала.....	172
§ 49. Температура – міра середньої кінетичної енергії хаотичного руху молекул.....	175
§ 50. Рівняння Клапейрона – Менделєєва.....	177
Задачі для самостійного розв’язування.....	181

Глава 5

Основи термодинаміки.....	182
§ 51. Основні поняття й означення.....	182
§ 52. Внутрішня енергія системи.....	183
§ 53. Внутрішня енергія ідеального газу.....	184
§ 54. Робота і теплота як форми передавання енергії.....	185
§ 55. Теплоємність. Питома теплоємність. Рівняння теплового балансу.....	187
§ 56. Перший закон термодинаміки.....	189
§ 57. Адіабатний процес.....	192
§ 58. Принцип дії теплової машини. Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна.....	193
§ 59. Другий закон термодинаміки.....	195

§ 60. Термодинамічна шкала температур.....	196
§ 61. Холодильні машини.....	197
§ 62. Теплові двигуни. Охорона природи.....	197
Задачі для самостійного розв’язування.....	205

Глава 6

Властивості пари.....	206
§ 63. Випаровування і конденсація.....	206
§ 64. Насичена пара і її властивості. Критичний стан речовини.....	207
§ 65. Зміна температури при розширенні газів. Ефект Джоуля – Томсона.....	209
§ 66. Зрідження газів і використання утвореної рідини в техніці.....	211
§ 67. Абсолютна і відносна вологість повітря. Точка роси.....	212
§ 68. Взаємодія атмосфери і гідросфери.....	214
§ 69. Кипіння. Залежність температури кипіння від тиску.....	216
§ 70. Перегріта пара та її використання в техніці.....	218
§ 71. Поняття про атмосферу планет.....	219
Задачі для самостійного розв’язування.....	222

Глава 7

Властивості рідин.....	223
§ 72. Характеристика рідкого стану речовини.....	223
§ 73. Поверхневий натяг. Енергія поверхневого шару.....	224
§ 74. Явища на межі рідини з твердим тілом. Капілярні явища.....	226
§ 75. Внутрішнє тертя в рідині. В’язкість.....	229
Задачі для самостійного розв’язування.....	233

Глава 8

Властивості твердих тіл.....	233
§ 76. Характеристика твердого стану речовини.....	233
§ 77. Типи кристалічних ґрат. Дефекти і домішки в кристалах.....	235
§ 78. Полімери.....	237
§ 79. Пружні властивості твердих тіл. Закон Гука.....	238
§ 80. Пружність, міцність, пластичність, крихкість.....	240
§ 81. Теплове розширення твердих тіл і рідин.....	242
§ 82. Особливості теплового розширення води.....	244
§ 83. Значення теплового розширення тіл у природі і техніці.....	245
Задачі для самостійного розв’язування.....	249

Глава 9

Фазові переходи на Землі і в космосі.....	250
§ 84. Плавлення і кристалізація.....	250
§ 85. Зміна об’єму і густини речовини під час плавлення і кристалізації.....	252
§ 86. Поняття фази речовини.....	252
§ 87. Внутрішня будова Землі і планет.....	253
§ 88. Сублімація. Сублімація поверхневого шару ядер комет при їх зближенні з Сонцем.....	256
§ 89. Діаграма фазових переходів. Потрійна точка.....	258
§ 90. Розчини і сплави.....	259
§ 91. Метеорити.....	260
Задачі для самостійного розв’язування.....	262

Глава 10

Електричне поле	264
§ 92. Електричні заряди. Закон збереження заряду	264
§ 93. Закон Кулона	265
§ 94. Електричне поле. Напруженість поля	267
§ 95. Принцип суперпозиції полів	270
§ 96. Робота сил електростатичного поля	271
§ 97. Потенціал. Різниця потенціалів. Еквіпотенціальні поверхні	273
§ 98. Зв'язок між напруженістю і різницею потенціалів електричного поля.....	276
§ 99. Діелектрики в електричному полі. Поляризація діелектриків	277
§ 100. Електричне зміщення	281
§ 101. Пізоелектричний ефект	282
§ 102. Провідники в електричному полі	282
§ 103. Електроємність. Конденсатори. З'єднання конденсаторів у батарею.....	284
§ 104. Енергія зарядженого конденсатора	287
§ 105. Енергія електричного поля	288
Задачі для самостійного розв'язування	296

Глава 11

Закони постійного струму	297
§ 106. Умови, необхідні для виникнення і підтримання електричного струму	297
§ 107. Сила і густина струму	298
§ 108. Закон Ома для ділянки кола без ЕРС	300
§ 109. Залежність електричного опору від матеріалу, довжини і площі поперечного перерізу провідника	301
§ 110. Залежність електричного опору провідників від температури	301
§ 111. Електрорушійна сила джерела струму	302
§ 112. Закон Ома для повного кола	304
§ 113. Правила Кірхгофа. З'єднання провідників	305
§ 114. З'єднання джерел електричної енергії в батарею	308
§ 115. Закон Джоуля – Ленца	309
§ 116. Робота і потужність електричного струму	310
§ 117. Теплова дія струму.....	311
Задачі для самостійного розв'язування	316

Глава 12

Електричний струм у металах	317
§ 118. Класична електронна теорія електропровідності металів	317
§ 119. Недоліки класичної електронної теорії	320
§ 120. Робота виходу	321
§ 121. Термоелектричні явища. Термоелектрорушійна сила	322
§ 122. Контактна різниця потенціалів	324
Задачі для самостійного розв'язування	326

Глава 13

Електричний струм в електролітах	326
§ 123. Електролітична дисоціація. Електроліз	326
§ 124. Закони Фарадея	328

§ 125. Застосування електролізу в техніці	330
§ 126. Перетворення хімічної енергії в електричну	331
§ 127. Гальванічні елементи	332
§ 128. Поляризація елементів і її усунення	332
§ 129. Акумулятори.....	333
Задачі для самостійного розв'язування	336

Глава 14

Електричний струм у газах і вакуумі	337
§ 130. Несамостійний і самостійний газові розряди	337
§ 131. Типи самостійних розрядів	339
§ 132. Поняття про плазму	342
§ 133. Електричний струм у вакуумі	344
§ 134. Електронні пучки. Електронно-променева трубка	347

Глава 15

Електричний струм у напівпровідниках	349
§ 135. Електронна структура твердих тіл	349
§ 136. Енергетичні рівні та енергетичні зони	352
§ 137. Електропровідність напівпровідників та її залежність від температури й освітленості	354
§ 138. Напівпровідникові прилади	356

Глава 16

Магнітне поле	360
§ 139. Магнітне поле	360
§ 140. Вектор індукції магнітного поля	363
§ 141. Напруженість магнітного поля. Закон Біо – Савара – Лапласа	365
§ 142. Дія магнітного поля на прямолінійний провідник із струмом. Закон Ампера	368
§ 143. Взаємодія струмів	369
§ 144. Магнітний потік	371
§ 145. Робота щодо переміщення провідника із струмом у магнітному полі	372
§ 146. Дія магнітного поля на рухомий заряд. Сила Лоренца	372
§ 147. Визначення питомого заряду. Прискорювачі заряджених частинок.....	374
§ 148. Магнітосфера Землі та її взаємодія з сонячним вітром	377
§ 149. Магнітні властивості речовини	377
§ 150. Природа діа-, пара-, і феромагнетизму	378
§ 151. Крива намагнічення	380
Задачі для самостійного розв'язування.....	385

Глава 17

Електромагнітна індукція	386
§ 152. Електромагнітна індукція	386
§ 153. Вихрове електричне поле	389
§ 154. Вихрові струми	390
§ 155. Значення магнітних полів для явищ, які відбуваються на Сонці	391
§ 156. Самоіндукція	392
§ 157. Енергія магнітного поля	394
Задачі для самостійного розв'язування	399

Розділ 4. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ	400
Глава 18	
Електромагнітні коливання	400
§ 158. Коливальний рух	400
§ 159. Гармонічні коливання	402
§ 160. Вільні електромагнітні коливання. Перетворення енергії в коливальному контурі	405
§ 161. Згасаючі електромагнітні коливання	407
§ 162. Автоколивання. Генератор незгасаючих коливачь	409
§ 163. Вимушені електромагнітні коливання	411
§ 164. Змінний струм. Генератор змінного струму	413
§ 165. Ємнісний та індуктивний опори змінного струму.....	414
§ 166. Закон Ома для електричного кола змінного струму	416
§ 167. Робота і потужність змінного струму	418
§ 168. Генератори струму	420
§ 169. Трансформатори	422
§ 170. Струми високої частоти	424
§ 171. Поняття про трифазний струм	424
§ 172. З'єднання обмоток трифазного генератора зіркою і трикутником	426
§ 173. Добування, передавання і розподіл електроенергії в галузях промисловості та сільського господарства	427
§ 174. Електрифікація країни	429
Задачі для самостійного розв'язування.....	434
Глава 19	
Електромагнітні хвилі	435
§ 175. Електромагнітне поле як особливий вид матерії	435
§ 176. Електромагнітні хвилі	436
§ 177. Вібратор Герца. Відкритий коливальний контур	439
§ 178. Винайдення радіо О. С. Поповим. Поняття про радіозв'язок	441
§ 179. Застосування електромагнітних хвиль	445
Розділ 5. ОПТИКА	449
Глава 20	
Природа світла	449
§ 180. Коротка історія розвитку уявлень про природу світла	449
§ 181. Електромагнітна природа світла	451
§ 182. Швидкість поширення світла	453
§ 183. Джерела світла	454
§ 184. Світловий потік. Сила світла	455
§ 185. Спектральна чутливість ока	458
§ 186. Освітленість. Закони освітленості	459
§ 187. Світність зір. Абсолютна зоряна величина	461
Задачі для самостійного розв'язування.....	466
Глава 21	
Хвильові властивості світла	466
§ 188. Основи хвильової теорії. Принцип Гюйгенса	466

§ 189. Закони відбивання і заломлення світла	467
§ 190. Повне відбивання	471
§ 191. Інтерференція світла. Когерентність світлових променів	473
§ 192. Інтерференція в тонких плівках	475
§ 193. Смуги однакової товщини. Кільця Ньютонa	477
§ 194. Використання інтерференції в науці і техніці	478
§ 195. Дифракція світла	480
§ 196. Дифракція на щілині в паралельних променях	481
§ 197. Дифракційні ґрати	483
§ 198. Поняття про голографію	485
§ 199. Поляризація поперечних хвиль	487
§ 200. Подвійне променезаломлення. Поляроїди	489
§ 201. Подвійне променезаломлення. Поляроїди	491
§ 202. Дисперсія світла	493
§ 203. Призматичний і дифракційний спектри	495
§ 204. Спектри випромінювання. Спектри поглинання	496
§ 205. Ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання	497
§ 206. Прилади для добування і дослідження спектра	499
§ 207. Спектри Сонця і зір	500
§ 208. Поняття про спектральний аналіз	500
§ 209. Рентгенівське випромінювання. Його природа і властивості	501
Задачі для самостійного розв'язування.....	508

Розділ 6. ОСНОВИ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ 510

Глава 22	
Основи спеціальної теорії відносності	510
§ 210. Принцип відносності у фізиці	510
§ 211. Перетворення Галілея	511
§ 212. Експериментальні основи спеціальної теорії відносності	512
§ 213. Постулати Ейнштейна	514
§ 214. Відносність одночасності	515
§ 215. Перетворення Лоренца	517
§ 216. Висновки з перетворень Лоренца	518
§ 217. Релятивістський закон додавання швидкостей	521
§ 218. Поняття релятивістської динаміки – маса, імпульс	523
§ 219. Закон взаємозв'язку маси й енергії. Зв'язок між імпульсом та енергією тіла	524
Задачі для самостійного розв'язування.....	528

Розділ 7. ЕЛЕМЕНТИ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ 530

Глава 23	
Квантова оптика	530
§ 220. Теплове випромінювання, його характеристики. Закон Кірхгофа.....	530
§ 221. Закон Стефана – Больцмана. Закон Віна	533
§ 222. Люмінесценція	534
§ 223. Квантова гіпотеза Планка. Фотони	535
§ 224. Зовнішній фотоелектричний ефект	537

§ 225. Внутрішній фотоелемент	540
§ 226. Типи фотоелементів	541
§ 227. Тиск світла	544
§ 228. Хімічна дія світла	546
§ 229. Поняття про корпускулярно-хвильову природу світла	547
Задачі для самостійного розв'язування	551

Глава 24

Будова атома	552
§ 230. Розвиток поглядів на будову речовини	552
§ 231. Закономірності в атомних спектрах водню	553
§ 232. Ядерна модель атома. Досліди Резерфорда	555
§ 233. Теорія будови атома за Бором	556
§ 234. Гіпотеза де Бройля. Хвильові властивості частинок	559
§ 235. Поняття про квантову механіку	561
§ 236. Квантові числа	563
§ 237. Принцип Паулі. Періодична система елементів Менделєєва	565
§ 238. Поняття про квантові генератори	566
§ 239. Деякі застосування лазерів	568
Задачі для самостійного розв'язування	571

Глава 25

Фізика атомного ядра	572
§ 240. Природна радіоактивність	572
§ 241. Закон радіоактивного розпаду	573
§ 242. Способи спостереження і реєстрації заряджених частинок	575
§ 243. Ефект Вавилова – Черенкова	577
§ 244. Відкриття нейтрона	578
§ 245. Будова атомного ядра	579
§ 246. Дефект маси, енергія зв'язку і стійкість атомних ядер	580
§ 247. Ядерні сили	582
§ 248. Альфа-розпад. Правило зміщення	583
§ 249. Бета-розпад. Нейтрино	584
§ 250. Гамма-випромінювання. Позитрон	586
§ 251. Космічне випромінювання	588
§ 252. Елементарні частинки	590
§ 253. Частинки й античастинки	591
§ 254. Основні властивості елементарних частинок і їх класифікація	593
§ 255. Ядерні реакції. Штучна радіоактивність	596
§ 256. Поділ важких ядер	597
§ 257. Ланцюгова ядерна реакція	599
§ 258. Керована ланцюгова реакція. Ядерний реактор	600
§ 259. Добування радіоактивних ізотопів та їх застосування	603
§ 260. Успіхи і перспективи розвитку атомної енергетики	605
§ 261. Біологічна дія радіоактивних випромінювань	606
Задачі для самостійного розв'язування	611

Глава 26

Термоядерний синтез. Еволюція зір	611
§ 262. Термоядерний синтез	611
§ 263. Проблема термоядерної енергетики	612
§ 264. Будова Сонця і зір	613
§ 265. Енергія Сонця і зір	614
§ 266. Еволюція зір	616

Розділ 8. УЗАГАЛЬНЕНІ ВІДОМОСТІ З АСТРОНОМІЇ

Глава 27

Будова і розвиток Всесвіту	619
§ 267. Наша зоряна система – Галактика	619
§ 268. Інші галактики. Нескінченність Всесвіту	620
§ 269. Поняття про космологію	622
§ 270. Розвиток Всесвіту	623
Висновок	625
Довідковий матеріал	628
Відповіді до задач для самостійного розв'язування	631
Предметний покажчик	633

Навчальне видання

Дмитрієва Валентина Феофанівна

ФІЗИКА

Редактор *О. К. Артеменко*
Художнє оформлення *В. О. Гурлєва*
Художній редактор *С. В. Анненков*
Технічний редактор *К. Є. Ставрова*
Коректор *Ю. О. Щербак*
Комп'ютерна верстка *О. Д. Ткаченка*

НБ ПНУС



758322

Підписано до друку 09.10.2008. Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Друк офсетний.
Умов. друк. арк. 40,5. Обл.-вид. арк. 39,37.
Зам. № 8-533.

Видавництво "Техніка". 04053 Київ, вул. Обсерваторна, 25.
Тел.: (044) 272-10-80. Факс: (044) 272-10-88.
E-mail: technika.pub@gmail.com
Свідцтво про внесення до Державного реєстру України
суб'єктів видавничої справи ДК 357 від 12.03.2001.

Віддруковано на Білоцерківській книжковій фабриці.
09117 м. Біла Церква, вул. Леся Курбаса, 4.
Свідцтво про внесення до Державного реєстру України
суб'єктів видавничої справи ДК № 567 від 14.08.2001 р.

Дмитрієва В. Ф.

Д53

Фізика: Навч. посіб. – К.: Техніка, 2007. – 648 с.: іл.

ISBN 966-575-186-7.

Навчальний посібник містить теоретичний матеріал в обсязі курсу фізики, що вивчається студентами вищих навчальних закладів I-II рівнів акредитації, а також розбір і розв'язування типових задач. Задачі є розв'язанням і доповненням основного тексту. В кінці кожної глави подано короткі висновки та запитання для самоконтролю і повторення.

ББК 22.3я 723

**Державне спеціалізоване
видавництво "Техніка"
пропонує**

Загальний курс фізики. Збірник задач

За редакцією *І. П. Гаркуші*
Автори: *І. П. Гаркуша, І. Т. Горбачук та ін.*

Збірник містить близько 2200 задач з усіх розділів курсу, які мають широкий діапазон рівня складності. Відповіді до найскладніших задач супроводжуються вказівками та розв'язаннями. Різноманітний за змістом та рівнем складності набір задач дає змогу використовувати збірник також при вивченні загального курсу фізики у вузах з поглибленим вивченням фізики. Для студентів вищих технічних навчальних закладів і фізичних спеціальностей вищих педагогічних навчальних закладів.

**Загальний курс фізики
У трьох томах**

За редакцією *І. М. Кучерука*
Автори: *І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик*

T1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка
T2: Електрика і магнетизм
T3: Оптика. Квантова фізика

Для студентів технічних і педагогічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

Замовити і придбати книжки можна у видавництві "Техніка"
за адресою: 04053 Київ, вул. Обсерваторна, 25.
Тел. (044) 272-10-80, факс (044) 272-10-88
E-mail: technika.pub@gmail.com