

ΦΙΣΙΚΑ 10



АСНОЎНЫЯ ФОРМУЛЫ

МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА

Колькасць рэчыва	Маса малекулы	Канцэнтрацыя часціц рэчыва
$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$	$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{m}{N}$	$n = \frac{N}{V}$

Асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle \quad p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle \quad p = n k T$$

Сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул газу

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} k T$$

Ураўненне стану ідэальнага газу

ураўненне Клапейрона	ураўненне Клапейрона — Мендзялеева
$\frac{pV}{T} = \text{const}$	$pV = \frac{m}{M} RT$

Ізапрацэсы ў ідэальным газе

ізаэрмічны	ізабарны	ізахорны
$p = \frac{\text{const}}{V}$	$V = \text{const } T$	$p = \text{const } T$

Першы закон тэрмадынамікі $\Delta U = Q + A'$

ізахорны працэс	ізаэрмічны працэс	ізабарны працэс
$Q = \Delta U$	$Q = A$	$Q = \Delta U + A$

Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплага рухавіка

$$\eta_t = \frac{A_{ц}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$

ЭЛЕКТРАДЫНАМІКА

Электростатыка

Закон захавання электрычнага зараду $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$

Закон Кулона	Напружанасць электростатычнага поля	Патэнцыял электростатычнага поля
$F = k \frac{ q_1 \cdot q_2 }{\epsilon r^2}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$	$\phi = \frac{W_{п}}{q_0}$

Поле, створанае ў аднародным асяроддзі пунктавым зарадам

модуль напружанасці	патэнцыял
$E = k \frac{ q }{\epsilon r^2}$	$\phi = k \frac{q}{\epsilon r}$

Работа сіл электростатычнага поля па перамяшчэнні зараду

у аднародным электростатычным полі	паміж двума пунктамі электростатычнага поля
$A = q_0 E d$	$A_{12} = q_0 (\phi_1 - \phi_2) = q_0 U_{12}$

Электраёмістасць кандэнсатара	Электраёмістасць плоскага кандэнсатара	Энергія электростатычнага поля зараджанага кандэнсатара
$C = \frac{q}{U}$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$	$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$

Пастаянны ток

ЭРС крыніцы току	Закон Ома для поўнага электрычнага ланцуга
$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{паб}}}{q}$	$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$

Электрамагнітныя з'явы

Закон Ампера $F_A = BI \Delta l \sin \alpha$	Сіла Лорэнца $F_{Л} = q v B \sin \alpha$	
Закон электрамагнітнай індукцыі	Энергія магнітнага поля шпулі з токам	
$\mathcal{E}_{\text{інд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$	$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$	$W_m = \frac{LI^2}{2}$

ФІЗІКА

Вучэбны дапаможнік для 10 класа
ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі
з беларускай мовай навучання
(з электронным дадаткам для павышанага ўзроўню)

*Данушчана Міністэрствам адукацыі
Рэспублікі Беларусь*

Мінск
«Адукацыя і выхаванне»
2020

Праваобладатель Адукацыя і выхаванне

УДК 53 (075.3=161.3)
ББК 22.3я721
Ф 50

Аўтары: А. У. Грамыка, У. І. Зяньковіч, А. А. Луцэвіч, І. Э. Слесар

Пераклад з рускай *Г. І. Кашэўнікавай*

Рэцэнзенты: цэнтр «Фундаментальныя ўзаемадзеянні і астрафізіка» дзяржаўнай навуковай установы «Інстытут фізікі імя Б. І. Сцяпанавы Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» (доктар фізіка-матэматычных навук, дацэнт, загадчык цэнтра *Ю. А. Курачкін*); настаўнік фізікі кваліфікацыйнай катэгорыі «настаўнік-метадыст» дзяржаўнай установы адукацыі «Гімназія № 1 г. Жодзіна» *Э. М. Якубоўская*

**Электронны дадатак для павышанага ўзроўню
размешчаны на рэсурсе profil.adu.by**

ISBN 978-985-599-141-1

© Кашэўнікава Г. І., пераклад
на беларускую мову, 2020
© Афармленне. РУП «Выдавецтва
“Адукацыя і выхаванне”», 2020

Праваобладатель Адукацыя і выхаванне

Як працаваць з вучэбным дапаможнікам

У гэтым навучальным годзе вы будзеце працягваць вывучэнне цеплавых і электрамагнітных з'яў у частках «Малекулярная фізіка» і «Электрадынаміка».

Матэрыял вучэбнага дапаможніка адпавядае базаваму ўзроўню навучання і ўтрымлівае апісанне доследаў, апорныя факты і формулы, неабходныя для далейшага вывучэння фізікі, а таксама дадатковыя цікавыя звесткі.

Каб праца з дадзеным вучэбным дапаможнікам прынесла больш карысці, выкажам некалькі парад. Перш за ўсё гэта кніга, якую трэба чытаць удумліва. Прачытайце параграф ад пачатку да канца, а затым бярыцеся за яго дэталёвую прапрацоўку. Ілюстрацыі і апісанне доследаў, а таксама выкананне нескладаных заданняў пасля кожнага пункта параграфа дапамогуць вам значна лепш зразумець фізічныя з'явы, пра якія ідзе гаворка. У тэксце параграфаў сустрэнуцца азначэнні фізічных паняццяў і велічынь, формулы, законы і прыцыпы, якія трэба вывучыць, каб надалей упэўнена прымяняць іх пры рашэнні задач па фізіцы.

З прычыны вялікай колькасці задач фізіку лічаць адным з самых складаных вучэбных прадметаў. Таму практычна пасля кожнага параграфа змешчаны прыклады рашэння задач: разліковых, якасных, графічных. У падрабязным разборы гэтых задач вы знойдзеце карысныя прыёмы і метады, якія спатрэбяцца пры самастойным рашэнні.

Кожны параграф пачынаецца з кароткіх уводзін да таго, што вы будзеце вывучаць на ўроку. Сціслыя высновы ў канцы параграфаў, пададзеныя, як правіла, у выглядзе структурна-лагічных схем, дапамогуць абагульніць і лепш засвоіць вучэбны матэрыял. Тыя, хто хоча больш глыбока вывучыць фізіку, знойдуць у вучэбным дапаможніку дамашнія эксперыментальныя заданні і заданні для праектнай дзейнасці. Структурна-лагічная схема ў канцы кожнай тэмы дапаможа паўтарыць асноўныя паняцці і формулы вывучанага вучэбнага матэрыялу, а заданні — праверыць свае сілы перад кантрольнай работай.

Жадаем вам творчых поспехаў!

Аўтары

У вучэбным дапаможніку вы сустрэнеце наступныя ўмоўныя абзначэнні:



— сціслыя высновы



— кантрольныя пытанні і заданні



— адсылка да прагляду відэаролікаў



— адсылка да электроннага дадатку для павышанага ўзроўню

Як працаваць з дапоўненай рэальнасцю

Для работы з элементамі дапоўненай рэальнасці патрабуюцца прыкладанне «AIV — дапоўненая рэальнасць», хуткасны доступ у інтэрнэт, спраўная чыстая камера, добрае асвятленне. Прыкладанне павінна працаваць на прыладах пад кіраваннем iOS версіі 9.0 і вышэйшай, Android версіі 5.0 і вышэйшай; патрабаванні да аператыўнай памяці: 2 гігабайты; OpenGL 3.0. (Робота на прыладах з папярэднімі версіямі аперацыйных сістэм і больш нізкімі параметрамі аператыўнай памяці і OpenGL не гарантуецца.)

1. Устанавіце прыкладанне «AIV — дапоўненая рэальнасць» праз App Store або Google Play. (Для пошуку ўвядзіце назву «AIV — дапоўненая рэальнасць».)

2. Запусціце прыкладанне. Выберыце вучэбны дапаможнік «Фізіка. 10 клас» са спіса.

3. Запампуйце кантэнт для кнігі на свой гаджэт.

4. Адкрыце кнігу.

5. Навядзіце камеру на ілюстрацыю з сімвалам так, каб малюнак цалкам змясціўся на экране.

6. Прыкладанне аўтаматычна распазнае малюнак і ўзновіць кантэнт дапоўненай рэальнасці.

Актуальная інструкцыя па выкарыстанні прыкладання размешчана па адрасе: aiv.by/ar.





Молекулярная физика — раздзел фізікі, у якім вивучаюць уласцівасці цел і працэсы, што ў іх адбываюцца і звязаны з велізарнай колькасцю часціц, змешчаных у гэтых целах.

У аснове молекулярнай фізікі ляжыць *молекулярна-кінетычная тэорыя*, якая тлумачыць уласцівасці цел у залежнасці ад іх будовы, сіл узаемадзеяння паміж часціцамі, з якіх складаюцца целы, характару руху гэтых часціц. *Тэрмадынаміка* вивучае спосабы і формы перадачы энергіі ад аднаго цела да другога, заканамернасці ператварэння адных відаў энергіі ў другія.

На падставе законаў молекулярнай фізікі і тэрмадынамікі канструююць цеплавыя рухавікі, халадзільныя апараты, устаноўкі для звадкавання газаў (мал. 1) і іншыя тэхнічныя прылады, ствараюць новыя матэрыялы (розныя сплавы, керамікі, пластмасы, гатункі гумы, шкла, бетону, разнастайныя паўправадніковыя матэрыялы і інш.) з зададзенымі фізічнымі (механічнымі, электрычнымі, магнітнымі, аптычнымі) уласцівасцямі. Найноўшыя адкрыцці ў молекулярнай фізіцы і тэрмадынаміцы ўплываюць на развіццё хіміі і біялогіі. Напрыклад, молекулярная біялогія, якая ўзнікла на стыку навук, тлумачыць з'явы, што адбываюцца ў жывых арганізмах.

У 9-м класе пры вивучэнні механікі вы разглядалі механічную форму руху матэрыі, гэта значыць перамяшчэнне цел адносна адно аднаго і іх узаемадзеянне. Пры гэтым унутраная будова таго ці іншага цела не мела значэння.



Мал. 1



Мал. 2

У малекулярнай фізіцы і тэрмадынаміцы разглядаюць з’явы, якія адбываюцца з макраскапічнымі цэламі і абумоўлены цеплавой формай руху матэрыі. *Макраскапічнымі цэламі (сістэмамі)* у фізіцы называюць цэлы (сістэмы), якія складаюцца з вялікай колькасці часціц. Кропля вады, газ у паветраным шары, драўляная дошка, сярэбраная лыжка, наша планета (мал. 2) — усё гэта макраскапічныя цэлы.

Для апісання цеплавых з’яў, якія адбываюцца з макраскапічнымі цэламі (сістэмамі), неабходны іншыя падыходы і метады, чым тыя, што прымяняюцца ў механіцы. Рух адной малекулы, які адбываецца ў прасторы, можна апісаць з выкарыстаннем законаў дынамікі адным вектарным ураўненнем або яго праекцыямі на каардынатыныя восі. Аднак прымяніць законы Ньютана да ўсіх малекул, колькасць якіх у любым макраскапічным цэле вялізная, нерэальна. Карыстаючыся законамі дынамікі для знаходжання характарыстык макраскапічнага цэла, напрыклад паветра ў аб’ёме 1 см^3 , спатрэбілася б рашыць прыблізна $8 \cdot 10^{19}$ ураўненняў руху часціц.

Для апісання макраскапічнай сістэмы, напрыклад газу ў пасудзіне, можна выкарыстаць любы з двух метадаў — малекулярна-кінетычны (статыстычны) або тэрмадынамічны. Гэтыя метады якасна розныя, але ўзаемна дапаўняюць адзін аднаго. Першы ляжыць у аснове малекулярнай фізікі, другі — тэрмадынамікі.

Пры *малекулярна-кінетычным* апісанні выкарыстоўваюць сярэднія значэнні фізічных велічынь, якія характарызуюць паводзіны часціц, што ўтвараюць сістэму. Напрыклад, сярэдняю кінетычную энергію і сярэдняю квадратычную скорасць цеплавога (хаатычнага) руху часціц.

Пры *тэрмадынамічным* апісанні выкарыстоўваюць фізічныя велічыні, якія характарызуюць сістэму ў цэлым. Напрыклад, ціск, аб’ём, тэмпература сістэмы.

РАЗДЗЕЛ 1

АСНОВЫ МАЛЕКУЛЯРНА-КІНЕТЫЧНАЙ ТЭОРЫІ

§ 1. Асноўныя палажэнні малекулярна-кінетычнай тэорыі

Што ўяўляе з сябе ўнутраная будова любога рэчыва? Суцэльнае яно або мае дыскрэтную структуру? Чаму ўласцівасці розных рэчываў адрозніваюцца адна ад другой? Ад чаго залежаць тыя або іншыя ўласцівасці рэчыва?

Уяўленне пра тое, што ўсе целы складаюцца з драбнюткіх часціц — атамаў, з’явілася яшчэ ў глыбокай старажытнасці, і яго даволі выразна сфармулявалі старажытнагрэчаскія філосафы Ляўкіп (прыблізна 500–440 да н. э.) і Дэмакрыт (460–371 да н. э.). Аднак потым атамістычныя ўяўленні былі забытыя. Толькі ў другой палове XVII ст. англійскі вучоны Р. Бойль у кнізе «Хімік-скептык» надаў паняццю «хімічны элемент» новы сэнс, блізкі да сучаснага. Затым у XVIII–XIX стст. М. В. Ламаносаў, Д. Дальтан, А. Краніг, Л. Больцман, Д. Максвел і іншыя вучоныя распрацоўвалі і ўдасканалівалі атамістычныя ўяўленні ў якасці навуковай тэорыі, якая атрымала назву класічнай малекулярна-кінетычнай тэорыі.

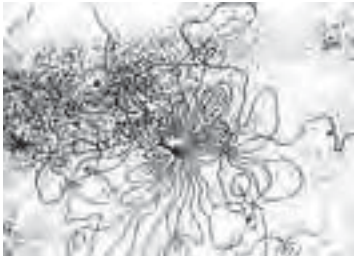
У аснову малекулярна-кінетычнай тэорыі пакладзены тры палажэнні:

1. Рэчыва мае дыскрэтную будову, гэта значыць складаецца з мікраскапічных часціц.
2. Часціцы рэчыва хаатычна рухаюцца.
3. Часціцы рэчыва ўзаемадзейнічаюць паміж сабой.

Дыскрэтная будова рэчыва. Як вы ўжо ведаеце, рэальнасць існавання малекул пацвярджаюць эксперыментальныя факты. Напрыклад, растварэнне рэчываў у вадзе і ў іншых растваральніках, механічнае драбненне рэчыва (мал. 3), сцісканне і расшырэнне



Мал. 3



Мал. 4

ўсіх цел і асабліва газаў, дыфузія, броўнаўскі рух і многае іншае.

Рэчыва мае дыскрэтную будову, гэта значыць складаецца з асобных часціц (малекул, атамаў, іонаў). Вока можа распазнаць два пункты, калі адлегласць паміж імі не меншая, чым 0,1 мм. Сучасныя аптычныя мікраскопы дазваляюць адрозніваць структуры з адлегласцю паміж элементамі прыкладна 200 нм і больш. Яны забяспечваюць магчымасць назіраць і фатаграфавальваць вельмі буйныя малекулы, якія складаюцца з соцен і нават тысяч атамаў (малекулы некаторых вітамінаў, гармонаў і бялкоў).

На малюнку 4 прыведзены фотаздымак малекулы нуклеінавай кіслаты ніткападобнай формы, агульная даўжыня якой 34 мкм.

Выкарыстанне электронных мікраскопаў дазваляе назіраць і фатаграфавальваць атамарныя структуры.

Ад тэорыі да практыкі

Адлегласць паміж цэнтрамі суседніх атамаў золата $r = 2,90 \cdot 10^{-10}$ м. Якая колькасць атамаў складае таўшчыню лісточка золата, лікавае значэнне якой $d = 0,210$ мкм?

3 гісторыі фізікі

4 сакавіка 1981 г. нямецкі вучоны Герд Бініг і швейцарскі вучоны Генрых Рорэр упершыню ў свеце назіралі асобныя атамы на паверхні крэмнію з дапамогай тунэльнага мікраскопа (мал. 5). За распрацоўку і стварэнне электроннага мікраскопа (мал. 6, а) нямецкаму вучонаму Эрнсту Руске і за вынаходства сканавальнага тунэльнага мікраскопа (мал. 6, б) Г. Бінігу і Г. Рорэру прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за 1986 г.



Мал. 5



Мал. 6

Цеплавы рух часціц рэчыва. Малекулы, атамы і іншыя часціцы, якія ўтвараюць рэчыва, знаходзяцца ў бесперапынным *цеплавым руху*.

Цеплавы рух — хаатычны рух часціц рэчыва, інтэнсіўнасць якога залежыць ад тэмпературы цела.

У 1827 г. англійскі батанік Роберт Броўн (1773–1858), назіраючы ў мікраскоп завісь кветкавага пылку ў вадзе, выявіў, што часціцы завісі бесперапынна рухаліся, прычым па вельмі мудрагелістых траекторыях. Гэты рух часціц, прызнаны эксперыментальным пацвярджэннем цеплавога руху часціц рэчыва, назвалі *броўнаўскім рухам*.

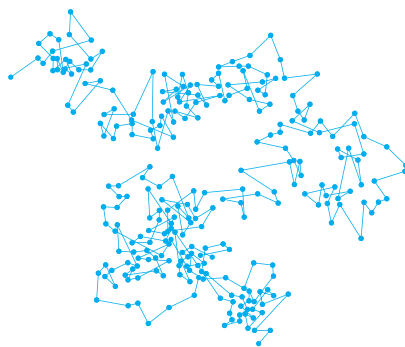
Броўнаўскі рух — хаатычны рух узважаных* у вадкасці або газе драбнюткіх *нерастваральных цвёрдых часціц памерамі прыкладна 1 мкм і менш*.

Броўнаўскія часціцы рухаюцца бесперапынна і хаатычна, а траекторыі іх руху вельмі складаныя. На малюнку 7 паказана спрошчаная траекторыя руху броўнаўскай часціцы. Пунктамі пазначаны становішчы часціцы праз аднолькавыя прамежкі часу. Траекторыя руху на працягу кожнага прамежку часу заменена адрэзкам прамой, які ўяўляе з сябе модуль рэзультуючага перамяшчэння часціцы.

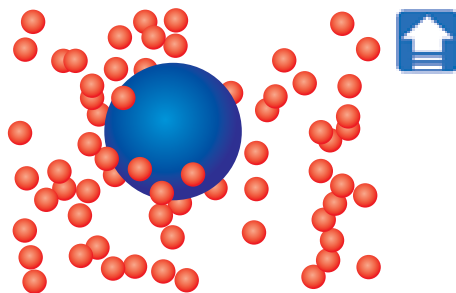
Броўнаўскі рух абумоўлены ўласцівасцямі вадкасці або газу. Ён не залежыць ад прыроды рэчыва броўнаўскай часціцы і знешніх уздзеянняў (акрамя тэмпературы). Прычынай броўнаўскага руху з’яўляецца цеплавы рух часціц асяроддзя, у якім знаходзіцца броўнаўская часціца, і адсутнасць дакладнай кампенсацыі ўдараў, якія часціца зведае з боку навакольных малекул (атамаў або іонаў) (мал. 8).

Чым меншыя памеры і маса броўнаўскай часціцы, тым лягчэй заўважыць змяненне яе імпульсу пад уздзеяннем удараў. Інтэнсіўнасць руху броўнаўскіх часціц узрастае з

* Узважаныя часціцы — гэта часціцы са шчыльнасцю рэчыва, параўнальнай са шчыльнасцю асяроддзя (вадкасці або газу), у якім яны знаходзяцца, размеркаваныя пэўным чынам па ўсім аб’ёме гэтага асяроддзя.



Мал. 7



Мал. 8

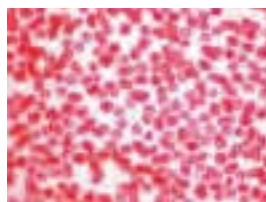
павышэннем тэмпературы і памяншэннем вязкасці асяроддзя. Броўнаўскі рух ледзь прыкметны ў гліцэрыне, а ў газах ён, наадварот, надзвычай інтэнсіўны.

Ад тэорыі да практыкі

1. Ці можна лічыць броўнаўскім хаатычны рух пылінак у паветры (мал. 9)?
2. Пры разглядзе ў мікраскоп кроплі крыві можна ўбачыць на фоне бясколернай вадкасці чырвоныя крывяныя целыцы, якія бесперапынна і хаатычна рухаюцца (мал. 10). Як можна растлумачыць гэтую з'яву?



Мал. 9



Мал. 10

3 гісторыі фізікі

Першую колькасную тэорыю броўнаўскага руху прапанаваў у 1905 г. Альберт Эйнштэйн (1879–1955). Польскі фізік Марыян Смалухоўскі (1872–1917) у 1906 г. таксама распрацаваў колькасную тэорыю броўнаўскага руху. Эксперыментальнае пацвярджэнне прапанаванай вучонымі тэорыі з'явілася заслугай французскага фізіка Жана Пярэна (1870–1942). «За доказ існавання малекул» Ж. Пярэну прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за 1926 г.

Яшчэ адным пацвярджэннем цеплавога руху часціц (малекул, атамаў або іонаў) рэчыва з'яўляецца *дыфузія* (лац. *diffusio* — распаўсюджанне, рассяяванне).

Дыфузія — працэс узаемнага пранікнення часціц аднаго з рэчываў, якія судакранаюцца, паміж часціцамі другога рэчыва з прычыны іх цеплавога руху.

Калі часціцы рэчываў пры судакрананні размеркаваны ў прасторы неаднародна, то гэта прыводзіць да самаадвольнага выраўноўвання іх канцэнтрацый.

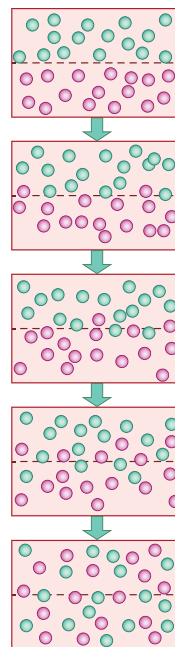
Канцэнтрацыя часціц — фізічная велічыня, лікава роўная колькасці часціц, якія змяшчаюцца ў адзінкавым аб'ёме:

$$n = \frac{N}{V}.$$

Калі ў розных частках аднаго і таго цела канцэнтрацыі часціц не супадаюць, то з прычыны іх цеплавога руху пры пастаяннай тэмпературы і адсутнасці знешніх сіл адбываецца ўпарадкаванае перамяшчэнне. Яно прыводзіць да выраўноўвання канцэнтрацый (мал. 11).

Скорасць дыфузіі залежыць ад характару руху часціц рэчыва, які вызначаецца тэмпературай і асабліва агрэгатыўным станам. У газах дыфузія адбываецца хутчэй, чым у вадкасцях, а тым больш у цвёрдых целах.

Дыфузія мае важнае значэнне ў прыродзе і тэхніцы. Дзякуючы дыфузіі ажыццяўляецца сілкаванне раслін неабходнымі рэчывамі з глебы, у жывых арганізмах адбываецца ўсмоктванне пажыўных рэчываў праз сценкі сасудаў стрававальнага тракту. Для павелічэння цвёрдасці сталёвых дэталей іх паверхневы слой дыфузна насычаюць вугляродам. Дыфузію выкарыстоўваюць у ядзерных тэхналогіях як адзін са спосабаў абагачэння ўрану.



Мал. 11

Ад тэорыі да практыкі

Што агульнага паміж броўнаўскім рухам і дыфузіяй? Чым яны адрозніваюцца?

Цікава ведаць

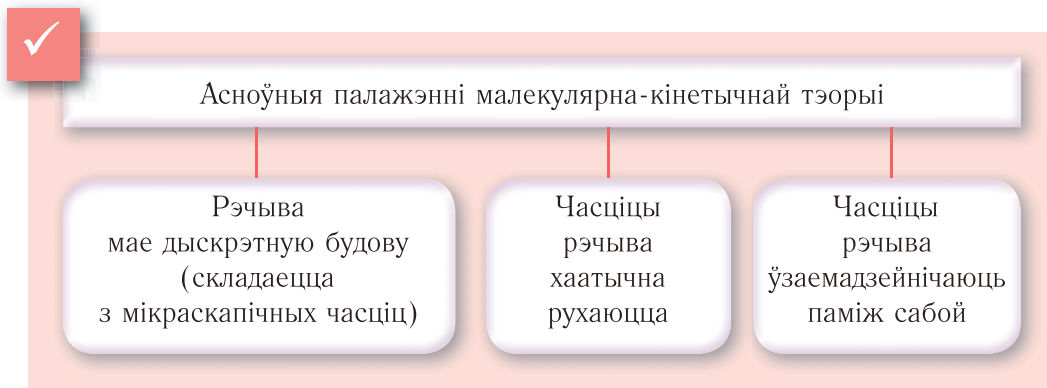
Упершыню на свае вочы пераканацца, што дыфузія адбываецца не толькі ў газах і вадкасцях, але і ў цвёрдых целах, удалося ў 1896 г. англійскаму металургу Робертсу-Аўстэну. Ён прыціснуў адзін да аднаго залаты дыск і свінцовы цыліндр і змясціў іх на 10 сутак у печ, дзе падтрымлівалася тэмпература 200 °С. Калі печ адчынілі і вынялі з яе дыск і цыліндр, высветлілася, што іх немагчыма раз'яднаць. Дыфузія прывяла да таго, што золата і свінец літаральна «прараслі» адно ў адно. У цяперашні час такая тэхналогія злучэння дэталей добра вывучана і атрымала назву дыфузійнай зваркі.

Узаемадзеянне часціц рэчыва. Факт існавання цвёрдых і вадкіх цел пацвярджае, што паміж часціцамі рэчываў, якія ўтвараюць гэтыя целы, дзейнічаюць *сілы ўзаемнага прыцяжэння*. Менавіта гэтымі сіламі часціцы (малекулы, атамы або іоны) у целах утрымліваюцца разам.

З паўсядзённага досведу вядома, што сілы ўзаемнага прыцяжэння найбольш наглядна праяўляюцца ў цвёрдых целах. Тонкі сталёвы трос дыяметрам 2 мм дастаткова трывалы, каб на ім падняць груз, маса якога 150 кг.

Тое, што газы займаюць увесь адведзены ім аб'ём, сведчыць пра зусім нязначнае праяўленне сіл узаемнага прыцяжэння паміж іх малекуламі*. Прычына ў тым, што ўсярэдненая адлегласць паміж малекуламі газаў істотна перавышае памеры саміх малекул, а таксама адлегласці паміж цэнтрамі суседніх часціц вадкасці і цвёрдых цел.

Адносна малая сціскасць вадкасцей і цвёрдых цел сведчыць пра тое, што паміж малекуламі рэчыва існуюць і *сілы ўзаемнага адштурхвання*. Сілы прыцяжэння і сілы адштурхвання дзейнічаюць адначасова. У адваротным выпадку ўстойлівых станаў вялікіх сукупнасцей малекул не магло б існаваць: часціцы рэчыва сцягваліся б у адно месца ці разліталіся ў розныя бакі.

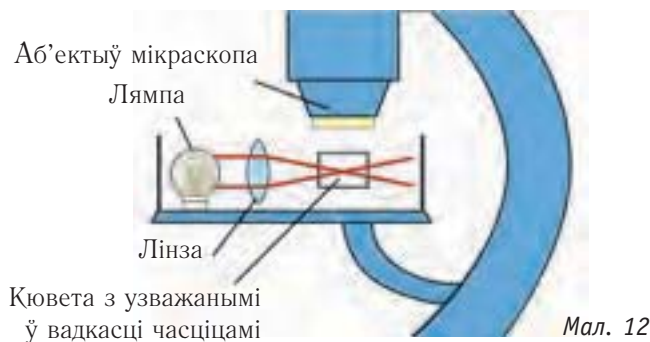


1. У адным з падручнікаў, выдадзеным у 1885 г., можна прачытаць: «Цвёрды атам... жыве ў выглядзе неверагоднай, але ўсё яшчэ неадвергнутай гіпотэзы... Аднак непараўнальна больш праўдападобная тэорыя, паводле якой матэрыя... бесперапынная, гэта значыць не складаецца з часціц з прамежкамі». Якія аргументы вы можаце прывесці аўтару гэтых радкоў, каб даказаць існаванне найдрабнейшых часціц рэчыва?

2. Уявіце, што ваш сябар скептычна ставіцца да атамаў і малекул і мяркуе, што броўнаўскі рух не з'яўляецца доказам іх існавання. Ён лічыць, што рух узважаных

* Нягледзячы на тое што не ўсе газы і вадкасці складаюцца з малекул (яны могуць складацца і з атамаў, і з іонаў), далей, гаворачы пра газы і вадкасці, мы будзем выкарыстоўваць тэрмін «малекула».

у вадкасці або газе часціц можна таксама растлумачыць рухам патокаў паветра або вадкасці, што знаходзяцца навакол іх. Якія аргументы вы можаце прывесці супраць такой інтэрпрэтацыі эксперыментальных назіранняў (мал. 12)?



3. Чаму броўнаўскі рух прыкметны толькі ў часціц з малымі памерамі ($d \leq 1$ мкм) і масай?
4. Чаму добра прыцёрты шкляны корак цяжка выняць з рыльца шклянога флакона?
5. Дапоўніце схему ў сціслых высновах, дадаўшы доследныя абгрунтаванні асноўных палажэнняў малекулярна-кінетычнай тэорыі.



§ 1-1

§ 2. Маса і памеры малекул. Колькасць рэчыва

У $1,0 \text{ см}^3$ любога газу, які знаходзіцца пры нармальных умовах (тэмпература $t_0 = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$, ціск $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$), змяшчаецца $2,7 \cdot 10^{19}$ малекул. Каб уявіць, наколькі вялікі гэты лік, дапусцім, што з адтуліны ў ампуле ўмяшчальнасцю $V = 1,0 \text{ см}^3$ кожную секунду вылятае 100 малекул. Тады для таго, каб усе малекулы вылецелі з ампулы, спатрэбіцца 8,6 млрд гадоў, гэта значыць прамажак часу, параўнальны з узростам Сусвету (12–15 млрд гадоў). Такая велізарная колькасць малекул у рэчыве сведчыць пра тое, што іх памеры вельмі малыя. Якія ж памеры і маса часціц рэчыва? Як можна вызначыць колькасць атамаў у любым макраскапічным целе?

Малекулярна-кінетычная тэорыя дае магчымасць ацаніць масу і памеры часціц, якія ўтвараюць макраскапічныя целы. Малекулы, як і атамы, не маюць выразных межаў. Калі ўявіць малекулу ў выглядзе шарыка, то яе радыус мае значэнне ад 0,1 нм у самых простых да 100 нм у складаных малекул, якія

змяшчаюць некалькіх тысяч атамаў. Напрыклад, аэзначны дыяметр малекулы вадароду складае 0,2 нм, а дыяметр малекулы вады — 0,3 нм. Пры такіх памерах колькасць часціц у рэчыве надзвычай вялікая. Напрыклад, у адным граме вады ўтрымліваецца $3,3 \cdot 10^{22}$ малекул.

Памеры і маса малекулы ўзрастаюць з павелічэннем колькасці атамаў, з якіх яна складаецца. Атамы і малекулы (акрамя шмататомных малекул арганічных рэчываў) маюць масу прыкладна 10^{-26} кг. З прычыны малых значэнняў выражаць масы атамаў і малекул у кілаграмах (кг) нязручна. Таму для вымярэння мас атамаў і малекул у хіміі і фізіцы выкарыстоўваюць *атамную адзінку масы* (а. а. м.). Атамную адзінку масы выражаюць праз масу ізатопу вугляроду $^{12}_6\text{C}$:

$$1 \text{ а. а. м.} = \frac{1}{12} m_{0\text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масу малекулы (або атама), выражаную ў атамных адзінках масы, называюць *адноснай малекулярнай масай* M_r (або *адноснай атамнай масай* A_r). Адносная малекулярная (або атамная) маса M_r паказвае, у колькі разоў маса m_0 малекулы (або атама) большая за атамную адзінку масы:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0\text{C}}}.$$

У Перыядычнай сістэме хімічных элементаў Д. І. Мендзялеева (гл. форзац 2) каля сімвалаў элементаў пазначаны і іх адносныя атамныя масы. У большасці выпадкаў пры правядзенні разлікаў значэнне адноснай атамнай масы акругляюць да цэлага ліку, выкарыстоўваючы правілы набліжаных вылічэнняў. Так, напрыклад, адносная атамная маса вадароду роўная 1, кіслароду — 16, азоту — 14.

Колькасць рэчыва, якая змяшчаецца ў макраскапічным целе, вызначаюць колькасцю часціц у ім. Прыведзеныя вышэй прыклады паказваюць, наколькі вялікі гэты лік. Таму пры разліках прынята выкарыстоўваць не абсалютную колькасць часціц рэчыва, а адносную:

$$v = \frac{N}{N_A},$$

гэта значыць *колькасць рэчыва* v вызначаюць адносінамі ліку часціц N гэтага рэчыва да пастаяннай Авагадра N_A .

Асноўнай адзінкай колькасці рэчыва ў СІ з'яўляецца моль. *1 моль* роўны колькасці рэчыва, якая змяшчае столькі часціц, колькі атамаў утрымліваецца ў

0,012 кг ізотопу вугляроду $^{12}_6\text{C}$. Значыць, у адным молі любога рэчыва знаходзіцца аднолькавая колькасць атамаў або малекул. Гэтую колькасць часціц абазначылі N_A і назвалі *пастаяннай Авагадра* ў гонар італьянскага вучонага Амедэа Авагадра (1776–1856). Пастаянная Авагадра з’яўляецца адной з фундаментальных фізічных пастаянных, яе значэнне

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

У малекулярна-кінетычнай тэорыі разам з адноснай малекулярнай (або атамнай) масай выкарыстоўваюць *малярную масу* M — масу рэчыва, узятага ў колькасці $\nu = 1$ моль. Малярную масу M вызначаюць адносінамі масы m рэчыва да яго колькасці ν :

$$M = \frac{m}{\nu}.$$

Асноўнай адзінкай малярнай масы ў СІ з’яўляецца кілаграм на моль $\left(\frac{\text{кг}}{\text{моль}}\right)$. Малярная маса рэчыва звязана з яго адноснай малекулярнай масай наступнымі суадносінамі:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Малярную масу рэчыва таксама можна вылічыць па формуле

$$M = m_0 N_A.$$

З улікам таго, што $m_0 = \frac{M}{N_A}$, атрымаем формулу для разліку колькасці малекул у дадзеным рэчыве:

$$N = \frac{m}{m_0} = \frac{m}{M} N_A.$$

Ад тэорыі да практыкі

1. У колькі разоў лік малекул вадароду, узятага ў колькасці $\nu_b = 8$ моль, большы за лік малекул азоту, колькасць рэчыва якога $\nu_a = 4$ моль?

2. Выкарыстоўваючы выраз $N = \frac{m}{M} N_A$, разлічыце колькасць малекул у адным граме вады і пераканайцеся ў правільнасці прыведзенага ў пачатку параграфа значэння.



Формула	Фізічныя велічыні, якія ўваходзяць у формулу	Адзінкі фізічных велічынь
$v = \frac{N}{N_A}$	v — колькасць рэчыва N — лік часціц рэчыва N_A — пастаянная Авагадра	моль — моль ⁻¹
$M = \frac{m}{v}$	M — малярная маса	$\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
$m_0 = \frac{M}{N_A}$	m — маса рэчыва m_0 — маса малекулы рэчыва	кг кг
$N = \frac{m}{M} N_A$	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹	



1. У якіх адзінках вымяраюць масы атамаў і малекул?
2. Што такое колькасць рэчыва? Назавіце адзінку гэтай фізічнай велічыні.
3. Што такое пастаянная Авагадра?
4. Што называюць малярнай масай рэчыва?
5. Растворыце, чаму колькасць рэчыва v , яго маса m і малярная маса M звязаны суадносінамі $v = \frac{m}{M}$.



Дамашняя лабараторыя

1. Прапануйце спосаб вызначэння прыкладнай колькасці малекул, якія выпарыліся з кожнага квадратнага сантыметра паверхні вады, налітай у шклянку, за прамежак часу $\Delta t = 1$ с.

Абсталяванне: шклянка з вадой, электронныя вагі (з як мага большай дакладнасцю вымярэння), секундамер, лінейка.

2. Прапануйце спосаб вызначэння колькасці часціц у кавалачку крэйды (CaCO_3).

Абсталяванне: кавалачак крэйды, электронныя вагі.

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Вызначце малярную масу і масу адной малекулы сульфату медзі(II) CuSO_4 .

Рашэнне. Каб вылічыць малярную масу M любога рэчыва, неабходна па хімічнай формуле знайсці адносную малекулярную масу M_r гэтага рэчыва і атрыманае значэнне памножыць на $10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. Паколькі хімічная формула сульфату медзі(II) мае выгляд CuSO_4 , то

$$M_r = 64 + 32 + 16 \cdot 4 = 1,6 \cdot 10^2.$$

$$\text{Тады малярная маса } M = 1,6 \cdot 10^2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 0,16 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Для вызначэння масы малекулы CuSO_4 выкарыстаем формулу $m_0 = \frac{M}{N_A}^*$:

$$m_0 = \frac{0,16 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 0,027 \cdot 10^{-23} \text{ кг} = 2,7 \cdot 10^{-25} \text{ кг}.$$

$$\text{Адказ: } M = 0,16 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}, m_0 = 2,7 \cdot 10^{-25} \text{ кг}.$$

Прыклад 2. Вызначце колькасць рэчыва і колькасць атамаў, якія змяшчаюцца ў жалезным бруску аб'ёмам $V = 100 \text{ см}^3$. Шчыльнасць жалеза $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

$$\begin{aligned} \text{Дадзена:} \\ V &= 100 \text{ см}^3 = \\ &= 1,00 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \\ \rho &= 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v &= ? \\ N &= ? \end{aligned}$$

Рашэнне. Колькасць рэчыва можна вызначыць, выкарыстаўшы формулу $v = \frac{m}{M}$, дзе m — маса жалезна-

га бруска, а $M = 56 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ — малярная маса жа-

леза. Паколькі $m = \rho V$, то $v = \frac{\rho V}{M}$.

$$v = \frac{7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 1,00 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3}{56 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 14 \text{ моль}.$$

Колькасць атамаў у дадзеным жалезным бруску $N = vN_A$.

$$N = 14 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 8,4 \cdot 10^{24}.$$

$$\text{Адказ: } v = 14 \text{ моль}, N = 8,4 \cdot 10^{24}.$$

* Пры рашэнні задач пастаянную Авагадра прыняць роўнай $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Практыкаванне 1

1. Вызначце малярныя масы і масы малекул: а) вады H_2O ; б) вуглякіслага газу CO_2 ; в) аміяку NH_3 ; г) азотнай кіслаты HNO_3 .

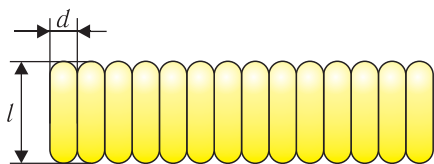
2. У шклянку наліта вада H_2O масай $m = 0,20$ кг. Вызначце колькасць рэчыва і колькасць малекул вады ў шклянцы.

3. Вызначце масу $N = 4,5 \cdot 10^{22}$ малекул серавадароду H_2S .

4. Параўнайце колькасць часціц рэчыва ў алюмініевым і медным кубіках аднолькавага аб'ёму. Шчыльнасць алюмінію $\rho_a = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, шчыльнасць медзі $\rho_m = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

5. У сярэбранай пласцінцы $N = 1,0 \cdot 10^{24}$ атамаў. Вызначце аб'ём пласцінкі, калі шчыльнасць серабра $\rho = 10,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

6. Англіійскі фізік Джон Уільям Стрэт, лорд Рэлей (1842–1919), прапанаваў такі спосаб ацэнкі памераў малекул: на паверхню вады ў шырокай пасудзіне ён капнуў кроплю аліўкавага алею аб'ёмам $V = 8,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$ і шчыльнасцю $\rho = 9,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Кропля расцялася, утварыўшы плёнку плошчай $S = 0,55 \text{ м}^2$.



Мал. 13

Вызначце па гэтых даных масу і дыяметр малекулы аліўкавага алею, палічыўшы таўшчыню плёнкі роўнай даўжыні цыліндрычных па форме малекул алею (мал. 13). Малярную масу аліўкавага алею палічыце роўнай $M = 0,28 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

7. Вада ў адкрытай пасудзіне выпарылася за прамежак часу $\Delta t = 6,0$ сутак. Вызначце масу вады, якая знаходзілася ў пасудзіне, калі з яе паверхні кожную секунду вылятала ў сярэднім $\langle N_1 \rangle = 5,0 \cdot 10^{18}$ малекул.



§ 3. Макра- і мікрапараметры. Ідэальны газ.

Асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу

Найбольш простым з усіх агрэгатных станаў рэчыва з'яўляецца газападобны. Таму вывучэнне ўласцівасцей рэчываў пачынаюць з газаў. Газ (грэч. chaos — хаос) — такі агрэгатны стан рэчыва, калі часціцы,

што яго складаюць, амаль свабодна і хаатычна рухаюцца паміж сутыкненнямі, падчас якіх адбываецца рэзкае змяненне іх скорасці. Тэрмін «газ» прапанаваў на пачатку XVII ст. нідэрландскі хімік Ян Батыст ван Гельмант (1579–1644).

Макра- і мікрапараметры. Пры вывучэнні механікі ў 9-м класе вы пазнаёміліся з паняццем «стан механічнай сістэмы цел». Параметрамі гэтага стану з’яўляюцца каардынаты, скорасці або імпульсы цел. У цеплавых працэсах асноўнымі фізічнымі велічынямі, якія характарызуюць стан макраскапічных цел без уліку іх малекулярнай будовы, з’яўляюцца ціск p , аб’ём V і тэмпература T . Гэтыя фізічныя велічыні называюць *макраскапічнымі параметрамі* стану. Да *мікраскапічных параметраў* стану цел адносяць індывідуальныя характарыстыкі малекул: масу асобнай малекулы m_0 , скорасць \vec{v} , імпульс \vec{p} і кінетычную энергію E_k яе цеплавога руху.

Адна з галоўных задач малекулярна-кінетычнай тэорыі заключаецца ў вызначэнні сувязі паміж макраскапічнымі і мікраскапічнымі параметрамі.

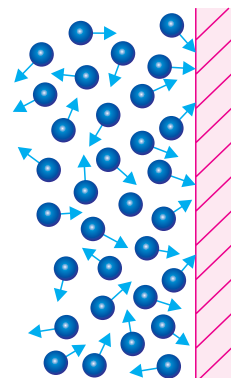
Ідэальны газ. Для тэарэтычнага тлумачэння ўласцівасцей газаў выкарыстоўваюць іх спрошчаную мадэль — ідэальны газ.

Ідэальны газ — мадэль газу, якая адпавядае наступным умовам: 1) малекулы газу можна лічыць матэрыяльнымі пунктамі, якія хаатычна рухаюцца; 2) сілы ўзаемадзеяння паміж малекуламі ідэальнага газу практычна адсутнічаюць (патэнцыяльная энергія іх узаемадзеяння роўная нулю); сілы дзейнічаюць толькі падчас сутыкненняў малекул, прычым гэта сілы адштурхвання.

Паводзіны малекул ідэальнага газу можна апісаць, выкарыстаўшы законы Ньютана і ўлічыўшы, што паміж сутыкненнямі малекулы рухаюцца практычна раўнамерна і прамалінейна.

Мадэль ідэальнага газу можна прымяняць у абмежаваным дыяпазоне тэмператур і пры дастаткова малым ціску. Так, напрыклад, уласцівасці вадароду і гелію пры нармальным атмасферным ціску і пакаёвай тэмпературы блізкія да ўласцівасцей ідэальнага газу.

Вывучаючы фізіку ў 7-м класе, вы даведаліся, што ціск газу на сценкі пасудзіны, у якой ён знаходзіцца, як і на любое цела, змешчанае ўнутр пасудзіны, абумоўлены ўдарамі часціц, якія ўтвараюць газ (мал. 14). З прычыны



Мал. 14



хаатычнасці іх руху ўсярэднены па часе ціск газу ў любой частцы пасудзіны аднолькавы, і яго можна вызначыць па формуле

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle. \quad (3.1)$$

Выраз (3.1) называюць *асноўным ураўненнем малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу*. Гэтае ўраўненне дазваляе разлічыць макраскапічны параметр ціск p ідэальнага газу праз масу m_0 малекулы, канцэнтрацыю n малекул і сярэднюю квадратичную скорасць іх цеплавога руху, вызначаную па формуле $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$. Формула (3.1) звязвае паміж сабой макра- і мікраскапічныя параметры сістэмы «ідэальны газ».



Залежнасць ціску газу ад сярэдняга значэння квадрата скорасці $\langle v^2 \rangle$ цеплавога руху яго малекул абумоўлена тым, што з павелічэннем скорасці, першае, узрастае імпульс малекулы, а значыць, і сіла ўдару аб сценку. Па-другое, узрастае колькасць удараў, бо малекулы часцей сутыкаюцца са сценамі.

Ад тэорыі да практыкі

У герметычна закрытай пасудзіне знаходзіцца ідэальны газ. Калі частку газу праз клапан выпусціць з пасудзіны, то як змяняцца: а) ціск газу; б) шчыльнасць газу; в) колькасць рэчыва ў пасудзіне?

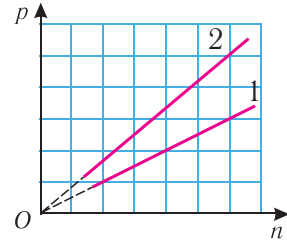
Абазначым праз $\langle E_{\text{к}} \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$ сярэдняю кінетычную энергію паступальнага руху малекул. Тады асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі прыме выгляд:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_{\text{к}} \rangle. \quad (3.2)$$

З выразу (3.2) вынікае, што ціск ідэальнага газу залежыць ад сярэдняй кінетычнай энергіі паступальнага руху яго малекул і іх канцэнтрацыі.

Ад тэорыі да практыкі

На малюнку 15 прыведзены графікі залежнасці ціску ад канцэнтрацыі для двух ідэальных газаў, тэмпературы якіх розныя. У колькі разоў адрозніваюцца сярэднія кінетычныя энергіі паступальнага руху малекул гэтых газаў?



Мал. 15



Ідэальны газ — мадэль газу, якая адпавядае наступным умовам

малекулы газу можна лічыць матэрыяльнымі пунктамі, якія хаатычна рухаюцца

сілы ўзаемадзеяння малекул ідэальнага газу практычна адсутнічаюць (патэнцыяльная энергія іх узаемадзеяння роўная нулю); сілы дзейнічаюць толькі падчас сутыкненняў малекул, прычым гэта сілы адштурхвання

Асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle$$

$$\langle E_k \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$$

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$$



1. Назавіце істотныя прыкметы паняцця «ідэальны газ».
2. Які механізм узнікнення ціску газу з пункту гледжання малекулярна-кінетычнай тэорыі?
3. Ад чаго залежыць ціск ідэальнага газу?
4. У табліцы прыведзены шчыльнасці газаў пры нармальных умовах:

Газ	вадарод	кісларод	азот	хлор
Шчыльнасць газу $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	0,090	1,43	1,25	3,21

У малекул якога газу сярэдняя квадратычная скорасць паступальнага руху максімальная?

5. У дзвюх пасудзінах знаходзяцца аднолькавыя колькасці малекул ідэальнага газу. У якім выпадку ціскі газу ў пасудзінах будуць аднолькавыя?



Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Балон электрычнай лямпы напоўнены газам, шчыльнасць якога $\rho = 0,90 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Пасля ўключэння лямпы ціск газу ў ёй павялічыўся ад $p_1 = 90$ кПа да $p_2 = 150$ кПа. Вызначце, на колькі пры гэтым павялічыўся сярэдні квадрат скорасці цеплавога руху малекул газу.

Дадзена:

$$\rho = 0,90 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$p_1 = 90 \text{ кПа} = 9,0 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$p_2 = 150 \text{ кПа} = 1,50 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\Delta \langle v^2 \rangle = ?$$

Рашэнне. Пакажам, што паміж шчыльнасцю ρ газу і канцэнтрацыяй n яго часціц існуе сувязь. Шчыльнасць рэчыва газу роўная адносінам масы да адведзенага яму аб'ёму. Паколькі здабытак масы адной малекулы m_0 і колькасці N малекул роўны масе рэчыва, то:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 n.$$

Тады асноўнае ўраўненне молекулярна-кінетычнай тэорыі можна запісаць у выглядзе: $p = \frac{1}{3} \rho \langle v^2 \rangle$. Значыць, сярэдні квадрат скорасці цеплавога руху малекул газу $\langle v^2 \rangle = \frac{3p}{\rho}$. Вызначым змяненне сярэдняга квадрата скорасці цеплавога руху малекул газу пасля ўключэння лямпы:

$$\Delta \langle v^2 \rangle = \frac{3p_2}{\rho} - \frac{3p_1}{\rho} = \frac{3}{\rho} (p_2 - p_1).$$

$$\Delta \langle v^2 \rangle = \frac{3}{0,90 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \cdot (1,50 \cdot 10^5 \text{ Па} - 9,0 \cdot 10^4 \text{ Па}) = 2,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

$$\text{Адказ: } \Delta \langle v^2 \rangle = 2,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Прыклад 2. У пасудзіне ёмістасцю $V = 10$ л знаходзіцца аднаатамны газ, колькасць рэчыва якога $\nu = 2,0$ моль і ціск $p = 6,0 \cdot 10^5$ Па. Вызначце сярэдняю кінетычную энергію цеплавога руху атамаў гэтага газу.

Дадзена: $V = 10 \text{ л} =$ $= 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ $p = 6,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ $v = 2,0 \text{ моль}$	Рашэнне. З асноўнага ўраўнення малекулярна-кінетычнай тэорыі, запісанага ў выглядзе $p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$, вынікае, што $\langle E_k \rangle = \frac{3p}{2n}$. Паколькі канцэнтрацыя атамаў $n = \frac{N}{V}$, а колькасць атамаў газу
$\langle E_k \rangle = ?$	$N = vN_A, \text{ то } \langle E_k \rangle = \frac{3p}{2n} = \frac{3pV}{2N} = \frac{3pV}{2vN_A}.$
	$\langle E_k \rangle = \frac{3 \cdot 6,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3}{2 \cdot 2,0 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 7,5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$
	Адказ: $\langle E_k \rangle = 7,5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$

Практыкаванне 2

1. Вызначце канцэнтрацыю малекул кіслароду, калі сярэдняе значэнне квадрата скорасці іх цеплавога руху $\langle v^2 \rangle = 4,9 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$, а ціск газу $p = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

2. У адной з дзвюх аднолькавых пасудзін знаходзіцца кісларод, а ў другой — азот. Колькасць малекул кожнага газу і сярэднія значэнні квадратаў скорасцей іх цеплавога руху аднолькавыя. Вызначце ціск азоту, калі ціск кіслароду $p_1 = 32 \text{ кПа}$.

3. Вызначце сярэднюю кінетычную энергію паступальнага руху малекул кіслароду пры нармальных умовах, калі іх канцэнтрацыя $n = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

4. У балоне ёмістасцю $V = 4,0 \text{ л}$ знаходзіцца $N = 8,0 \cdot 10^{25}$ малекул азоту. Вызначце сярэднюю кінетычную энергію паступальнага руху малекул, калі ціск азоту $p = 2,0 \text{ МПа}$.

5. У балоне ёмістасцю $V = 2,5 \text{ м}^3$ знаходзіцца гелій масай $m = 3,0 \text{ кг}$. Вызначце сярэдняе значэнне квадрата скорасці цеплавога руху атамаў гелію, калі яго ціск $p = 100 \text{ кПа}$.

6. У колькі разоў зменіцца ціск ідэальнага аднаатамнага газу, калі сярэдняя кінетычная энергія цеплавога руху яго атамаў павялічыцца ў $\alpha = 3$ разы, а аб'ём газу паменшыцца ў $\beta = 2$ разы?



§ 4. Цеплавая раўнавага. Тэмпература — мера сярэдняй кінетычнай энергіі цеплавога руху часціц рэчыва

У паўсядзённым жыцці пад тэмпературай мы разумеем ступень нагрэтасці цела (халоднае, цёплае, гарачае). Такі падыход з'яўляецца даволі суб'ектыўным, ён залежыць не толькі ад стану разгляданага цела, але і ад нашых адчуванняў. Каб пазбегнуць суб'ектыўнай нявызначанасці, неабходна знайсці спосаб вымярэння тэмпературы.

Цеплавая раўнавага. Калі два целы судакранаюцца, то малекулы гэтых цел, узаемадзейнічаючы паміж сабой, будуць абменьвацца энергіяй. Пры гэтым малекулы з большай кінетычнай энергіяй перадаюць частку энергіі малекулам з меншай кінетычнай энергіяй. У выніку сярэдня кінетычная энергія цеплавога руху малекул аднаго цела павялічваецца, а другога — памяншаецца. Цела, якое аддае энергію, называюць больш нагрэтым, а цела, да якога энергія пераходзіць, — менш нагрэтым. Як паказваюць доследы, такі пераход энергіі працягваецца да таго часу, пакуль не ўстанавіцца пэўны стан, у якім целы могуць знаходзіцца колькі заўгодна. У гэтым стане ступень нагрэтасці цел становіцца аднолькавай і такой застаецца, а значыць, целы маюць аднолькавую тэмпературу. Гэта ўлічваецца пры вымярэнні тэмпературы цела. Тэрмометр прыціскаюць да цела, але адлік яго паказанняў робяць не адразу, а праз некаторы прамежак часу. Гэта неабходна для таго, каб паміж тэрмометрам і целам устанавілася *цеплавая раўнавага*.

Цеплавая раўнавага — стан ізаляванай фізічнай сістэмы, пры якім усе яе макраскапічныя параметры застаюцца нязменнымі з цягам часу.

Пад *ізаляванай*, або *замкнутай*, *сістэмай* разумеюць сістэму цел, якая не абменьваецца энергіяй з навакольнымі целамаі.

Адзначым, што целы фізічнай сістэмы, якая знаходзіцца ў стане цеплавой раўнавагі, могуць мець розныя значэнні шчыльнасці, канцэнтрацыі, ціску і аб'ёму. Аднак *тэмпература ўсіх цел, што складаюць такую сістэму, заўсёды аднолькавая*.

Ад тэорыі да практыкі

1. Тэмпература вады ў шклянцы $t = 18 \text{ }^\circ\text{C}$. Чаму роўная тэмпература тэрмометра, які апушчаны ў ваду?
2. Апушчаны ў шклянку з вадой лабараторны тэрмометр вынялі і паднеслі да настольнай лямпы, каб лепш разгледзець яго паказанні. Ці карэктна вызначана тэмпература вады?

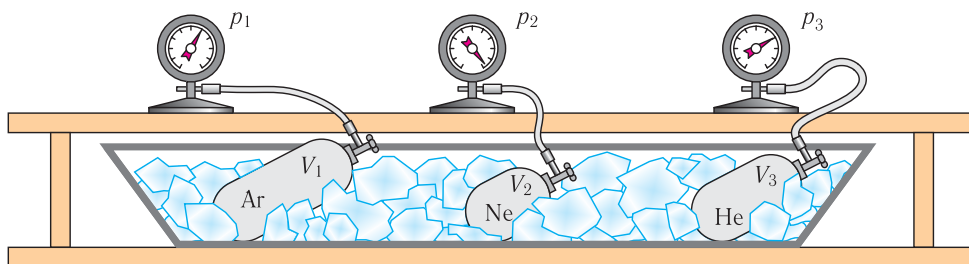
Цікава ведаць

Паняцці «градус» і «тэмпература» з'явіліся задоўга да вынаходства тэрмометра. Знакаміты старажытнарымскі лекар Гален (II ст.) лічыў, што ўсе лекі варта адрозніваць па «градусах» (ад лац. *gradus* — ступень) цеплыні, холаду, сухасці і вільготнасці. Гален вучыў, што адны лекі валодаюць ахаладжальным дзеяннем, а другія — сагрэвальным. Пры неабходнасці трэба было змешваць лекі, каб панізіць залішняе цяпло вільготнасцю, а холад — сухасцю. Ад лацінскага слова *temperature* (змешванне) пайшоў тэрмін «тэмпература».



Тэмпература і сярэдня кінетычная энергія паступальнага руху малекул газу. Вызначэнне тэмпературы павінна грунтавацца на такой фізічнай велічыні, якая характарызуе стан цел і з'яўляецца аднолькавай для любых цел, што знаходзяцца ў стане цеплавой раўнавагі. Неабходнай уласцівасцю валодае *сярэдня кінетычная энергія цеплавога руху часціц рэчыва*. Цеплавы рух часціц рэчыва істотна змяняецца пры змене яго агрэгатнага стану. Максімальна просты ён у аднаатамнага газу, атамы якога выконваюць толькі паступальны рух.

Возьмем некалькі пасудзін рознай ёмістасці, аснашчаных манометрамі для вымярэння ціску (мал. 16). Запоўніўшы іх рознымі газамі, напрыклад аргонам, неонам і геліем, змесцім спачатку ў пасудзіну з лёдам, які растае ($t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$), а затым будзем змяняць тэмпературу змесціва пасудзіны, пакуль яна не стане роўнай тэмпературы кіпення вады ($t = 100\text{ }^\circ\text{C}$).



Мал. 16

Значэнні ціску газу ў ёмістасцях могуць адрознівацца. Масы газу можна вызначыць шляхам узважвання адпампаваных і запоўненых ёмістасцей. Ведаючы масу m газу і яго малярную масу M , па формуле $N = \frac{m}{M} N_A$ можна вылічыць колькасць часціц і, значыць, вызначыць іх канцэнтрацыю $n = \frac{N}{V}$ у кожнай з ёмістасцей.

Доследным шляхам было ўстаноўлена, што ў стане цеплавой раўнавагі, нягледзячы на розныя значэнні ціску p і канцэнтрацыі n часціц, адносіны ціску да канцэнтрацыі $\frac{p}{n}$ ва ўсіх ёмістасцях аказаліся практычна аднолькавымі: $\frac{p}{n} = \Theta$. Гэтыя адносіны для разрэджаных газаў, якія адпавядаюць патрабаванням мадэлі «ідэальны газ», залежаць толькі ад тэмпературы, прычым залежнасць з'яўляецца лінейнай, гэта значыць

$$\frac{p}{n} = \Theta = k(t - t_0).$$

Тут Θ характарызуе тэмпературу газаў у энергетычных адзінках (у СІ вымяраюць у джоўлях*); k — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які залежыць ад выбару тэмпературнай шкалы. У 1899 г. нямецкі фізік-тэарэтык Макс Планк (1858–1947) прапанаваў назваць каэфіцыент k *пастаяннай Больцмана* ў гонар аўстрыйскага фізіка Людвіга Больцмана (1844–1906), аднаго з заснавальнікаў молекулярна-кинетической теории газаў:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Калі для вымярэння тэмпературы выкарыстоўваюць *абсалютную тэмпературную шкалу*, то пры вызначэнні лічбавага значэння тэмпературы па гэтай шкале мяркуюць, што:

$$\frac{p}{n} = kT, \text{ гэта значыць } T = \frac{p}{nk}. \quad (4.1)$$

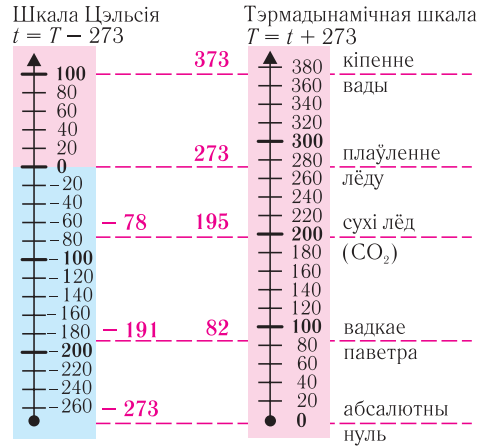
Абсалютную (тэрмадынамічную) шкалу тэмператур прапанаваў у 1848 г. вядомы англійскі фізік Уільям Томсан (1824–1907), атрымаўшы за працы ў галіне фізікі у 1892 г. тытул лорда Кельвіна. Таму гэтую шкалу звычайна называюць *шкалай Кельвіна*.

Шкала Кельвіна зусім не залежыць ад якіх бы там ні было фізічных уласцівасцей рэчываў, таму яе можна лічыць абсалютнай і ўніверсальнай.

Нулявы пункт па шкале Кельвіна адпавядае самай нізкай тэарэтычна магчымай тэмпературы (абсалютны нуль тэмпературы). Тэмпература расталага лёду па гэтай шкале $T_0 = 273,15$ К. Сувязь паміж тэмпературамі па шкале Цэльсія (t) і па шкале Кельвіна (T) мае выгляд: $T = t + 273,15$.

* Адзінка вымярэння тэмпературы джоўль нязручная. Напрыклад, тэмпература кіпення вады, выражаная ў джоўлях: $\Theta = \frac{p}{n} = 5,15 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Адзінка тэмпературы па абсалютнай шкале адзін кельвін (1 К) з'яўляецца асноўнай адзінкай тэмпературы ў СІ і супадае з адным градусам (1 °С) па шкале Цэльсія. Таму рознасць тэмператур па шкале Кельвіна і па шкале Цэльсія аднолькавая, гэта значыць $\Delta T = \Delta t$ (мал. 17).



Мал. 17

Ад тэорыі да практыкі

Выразіце па шкале Кельвіна тэмпературу цела здоровага чалавека.

З асноўнага ўраўнення малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу (3.2) вынікае: $\frac{p}{n} = \frac{2}{3} \langle E_k \rangle$. Значыць, улічваючы выраз (4.1), можна запісаць: $\frac{2}{3} \langle E_k \rangle = kT$ або

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (4.2)$$

Суадносіны (4.2) устанаўліваюць сувязь паміж абсалютнай тэмпературай T ідэальнага газу і сярэдняй кінетычнай энергіяй $\langle E_k \rangle$ паступальнага руху яго часціц. Такім чынам, з формулы (4.2) вынікае, што *сярэдня кінетычная энергія паступальнага руху часціц ідэальнага газу прапарцыянальная яго абсалютнай тэмпературы*.

Сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул газаў, якія знаходзяцца ў стане цеплавой раўнавагі, аднолькавая для розных газаў і не залежыць ад масы малекулы газу.

Гэтая выснова, якая грунтуецца на эксперыментах з разрэджанымі газамі, праўдзівая для вадкасцей і цвёрдых цел.

Ураўненне (4.2) можна запісаць наступным чынам: $\frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT$, адкуль

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

З улікам формулы (4.1) асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу набывае наступны выгляд:

$$p = nkT. \quad (4.3)$$

З ураўнення (4.3) відаць, што пры аднолькавых значэннях абсалютнай тэмпературы T і канцэнтрацыі n часціц ціск любых газаў аднолькавы, незалежна ад таго, з якіх часціц яны складаюцца.

Ад тэорыі да практыкі

1. У састаў паветра каля зямной паверхні ў невялікай колькасці ўваходзяць інертныя газы: неон ($M_{\text{Ne}} = 20 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$) і гелій ($M_{\text{He}} = 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$). Якая сярэдняя кінетычная энергія цеплага руху часціц гэтых газаў пры нармальных умовах: $p_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Па, $t_0 = 0,0$ °С? Якія даныя з умовы можна выключыць?

2. Ці супадаюць сярэднія квадратычныя скорасці малекул кіслароду і азоту ў паветры?



Цеплавая раўнавага — стан ізаляванай фізічнай сістэмы, пры якім усе яе макраскапічныя параметры застаюцца нязменнымі з цягам часу. У стане цеплай раўнавагі тэмпература розных частак фізічнай сістэмы аднолькавая

$$\frac{p}{n} = kT$$

Пастаянная Больцмана
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

$$\frac{p}{n} = \frac{2}{3} \langle E_k \rangle$$

Абсалютная тэмпература
 $T = (t + 273,15) \text{ К}$

Сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху часціц газу

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$$

$$\langle E_k \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$$

Сярэдняя квадратычная скорасць цеплага руху часціц газу

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

$$p = nkT$$



1. Якая велічыня характарызуе стан цеплавой раўнавагі?
2. Ці можна звычайным вадкасным тэрмометрам вымераць тэмпературу кроплі вады?
3. Як залежыць сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул ідэальнага газу ад тэмпературы?
4. Пры нагрыванні газу ў балоне сярэдняя квадратычная скорасць малекул павялічылася ў два разы. Як змяніўся ціск газу?
5. Што ўяўляе з сябе абсалютная шкала тэмператур? Што прынята за адзінку абсалютнай тэмпературы ў СІ? Як суадносяцца тэмпературы па шкале Цэльсія і шкале Кельвіна?
6. Як звязаны ціск ідэальнага газу з яго абсалютнай тэмпературай і канцэнтрацыяй малекул?

Дамашняя лабараторыя

У адным з кутоў пакоя распырскаяце духі ці адэкалон. Праз некаторы прамежак часу пах распаўсюдзіцца па ўсім пакоі. Выкарыстоўваючы гадзіннік з секунднай стрэлкай, вызначце сярэднюю скорасць распаўсюджвання малекул духоў (адэкалону). Як узгадніць атрыманы вынік з дастаткова вялікім значэннем сярэдняй квадратычнай скорасці паступальнага руху малекул газу?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Параўнайце сярэднія квадратычныя скорасці атамаў гелію і малекул кіслароду, калі газы знаходзяцца ў стане цеплавой раўнавагі.

$$M_1 = 4,0 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

$$M_2 = 32 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

$$T_1 = T_2 = T$$

$$\frac{\langle v_{\text{кв1}} \rangle}{\langle v_{\text{кв2}} \rangle} = ?$$

Рашэнне. Сярэдняя квадратычная скорасць цеплага руху часціц газу $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$. Паколькі

маса адной малекулы рэчыва $m_0 = \frac{M}{N_A}$, то

$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3N_A kT}{M}}$. Газы знаходзяцца ў стане цеплавой

раўнавагі, гэта значыць $T_1 = T_2 = T$, таму сярэднія квадратычныя скорасці атамаў гелію

$$\langle v_{\text{кв1}} \rangle = \sqrt{\frac{3N_A kT}{M_1}},$$

$$\text{малекул кіслароду} \quad \langle v_{\text{кв2}} \rangle = \sqrt{\frac{3N_A kT}{M_2}}.$$

$$\text{Тады} \quad \frac{\langle v_{\text{кв1}} \rangle}{\langle v_{\text{кв2}} \rangle} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{32 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}{4,0 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}} = 2\sqrt{2} = 2,8.$$

Адказ: у стане цеплавой раўнавагі сярэдняя квадратычная скорасць атамаў гелію ў 2,8 раза большая за сярэднюю квадратычную скорасць малекул кіслароду.

Прыклад 2. У балоне ёмістасцю $V = 14$ л знаходзіўся газ, абсалютная тэмпература якога $T = 290$ К. Пры расходаванні газу з балона выпусцілі $N = 1,0 \cdot 10^{22}$ малекул. Вызначце, на колькі зменшыўся ціск газу ў балоне, калі праз некаторы прамежак часу яго тэмпература павялічылася да першапачатковага значэння.

Дадзена:

$$V = 14 \text{ л} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$T = 290 \text{ К}$$

$$N = 1,0 \cdot 10^{22}$$

$$p_1 - p_2 = ?$$

Рашэнне. Пачатковы ціск газу

$$p_1 = n_1 k T = \frac{N_1}{V} k T.$$

Калі зрасходавалі частку газу і яго тэмпература павялічылася да першапачатковага значэння T , ціск газу стаў

$$p_2 = n_2 k T = \frac{N_2}{V} k T.$$

Тады змяншэнне ціску газу:

$$p_1 - p_2 = \frac{kT}{V} (N_1 - N_2) = \frac{kTN}{V}.$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 290 \text{ К} \cdot 1,0 \cdot 10^{22}}{1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3} = 2,9 \text{ кПа}.$$

Адказ: $p_1 - p_2 = 2,9$ кПа.

Практыкаванне 3

1. Тэмпература кавалка лёду па шкале Цэльсія $t = -53,0$ °С. Чаму роўная яго тэмпература па шкале Кельвіна?

2. Тэмпература газу па абсалютнай шкале: а) $T = 473$ К; б) $T = 120$ К. Чаму роўная тэмпература газу па шкале Цэльсія ў кожным выпадку?

3. Вызначце сярэднюю кінетычную энергію паступальнага руху часціц ідэальнага газу, тэмпература якога $t = 20$ °С.

4. Вызначце колькасць малекул ідэальнага газу, які знаходзіцца ў пасудзіне ёмістасцю $V = 1,4$ л, калі тэмпература газу $t = 27$ °С, а ціск $p = 3,0$ кПа.

5. Вадарод, абсалютная тэмпература якога $T = 290$ К, а маса $m = 2,0$ кг, знаходзіцца ў пасудзіне ёмістасцю $V = 2,0$ м³. Вызначце ціск вадароду.

6. Тэмпература паветра, якое знаходзіцца ў пасудзіне, $t_1 = 24,0$ °С. На колькі градусаў павялічылася тэмпература паветра, калі сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху яго малекул павялічылася ў $\alpha = 2,00$ раза?

7. Вызначце шчыльнасць азоту, ціск якога $p = 1,1 \cdot 10^5$ Па і абсалютная тэмпература $T = 298$ К.



§ 5. Ураўненне стану ідэальнага газу

Высветлім, як звязаны паміж сабой макраскапічныя параметры ідэальнага газу, якія характарызуюць яго раўнаважны стан: ціск, маса ўсяго газу, адведзены яму аб'ём і тэмпература.

Стан макраскапічнай сістэмы цалкам вызначаны, калі вядомыя яе макраскапічныя параметры — ціск p , маса m , тэмпература T і аб'ём V . Ураўненне, якое звязвае параметры дадзенага стану, называюць *ураўненнем стану сістэмы*. Змяненне параметраў стану сістэмы з цягам часу называюць *працэсам*.

Калі пры пераходзе ідэальнага газу з аднаго стану ў другі колькасць яго малекул $N = \frac{m}{M} N_A$ застаецца пастаяннай, гэта значыць маса і малярная маса газу не змяняюцца, то з ураўненняў $p = nkT$ і $n = \frac{N}{V}$ вынікае:

$$p_1 V_1 = NkT_1, \quad p_2 V_2 = NkT_2, \quad (5.1)$$

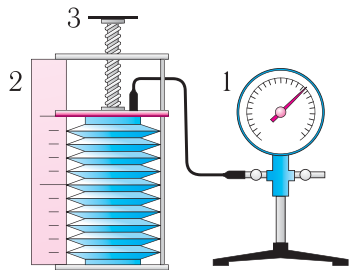
дзе k — пастаянная Больцмана; p_1, V_1, T_1 — параметры пачатковага стану газу, а p_2, V_2, T_2 — канчатковага. З суадносін (5.1) вынікае, што

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

або

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (5.2)$$

Пры нязменных масе і малярнай масе ідэальнага газу адносіны здабытку яго ціску і аб'ёму да абсалютнай тэмпературы з'яўляюцца велічынёй пастаяннай.



Мал. 18

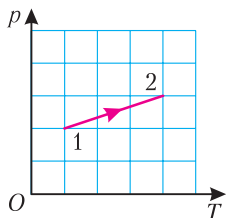
газу ў пасудзіне можна разлічыць з дапамогай лінейкі 2. Тэмпература газу ў пасудзіне роўная тэмпературы навакольнага асяроддзя, і яе можа вымераць тэрмометрам.

Вызначыўшы параметры газу p_1 , V_1 , T_1 у пачатковым стане, вылічваюць адносіны $\frac{p_1 V_1}{T_1}$. Пасля гэтага змяшчаюць пасудзіну ў гарачую ваду, тым самым змяняючы тэмпературу газу і яго ціск. Верцячы вiнт 3, змяняюць умяшчальнасць пасудзіны. Вымераўшы зноў ціск газу p_2 і тэмпературу T_2 , а таксама разлічыўшы адведзены яму аб'ём V_2 , вылічваюць адносіны $\frac{p_2 V_2}{T_2}$. Як паказваюць разлікі, ураўненне стану (5.2) выконваецца ў межах хiбнасцi эксперыменту.

Ураўненне стану (5.2) можна прымяняць для газаў пры наступных умовах:

- 1) не вельмі значныя ціскі (пакуль уласны аб'ём усіх малекул газу надзвычай малы ў параўнанні з умяшчальнасцю ёмістасці, у якой знаходзіцца газ);
- 2) не вельмі нізкія або высокія тэмпературы (пакуль абсалютнае значэнне патэнцыяльнай энергіі міжмалекулярнага ўзаемадзеяння надзвычай малое ў параўнанні з кінетычнай энергіяй цеплавога руху малекул).

Ад тэорыі да практыкі



На малюнку 19 прыведзены графік працэсу пераходу ідэальнага газу дадзенай масы са стану 1 у стан 2. Як змяніўся аб'ём газу ў выніку гэтага працэсу?

Мал. 19

Паколькі колькасць часціц $N = \frac{m}{M} N_A$, то з ураўнення (5.1) вынікае:

$$pV = kN_A \frac{m}{M} T. \quad (5.3)$$

Велічыню, роўную здабытку пастаяннай Больцмана k і пастаяннай Авагадра N_A , назвалі *ўніверсальнай газавай пастаяннай R* :

$$R = kN_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}. \quad (5.4)$$

З улікам выразу (5.4) ураўненне (5.3) прыме выгляд:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (5.5)$$

Паколькі колькасць рэчыва $\nu = \frac{m}{M}$, то формулу (5.5) можна запісаць у выглядзе:

$$pV = \nu RT.$$

Ураўненне стану ў выглядзе (5.5) упершыню было атрыманае рускім вучоным Д. І. Мендзялеевым (1834–1907) у 1874 г., таму яго называюць *ураўненнем Клапейрона — Мендзялеева*.

Адзначым, што ўраўненне Клапейрона — Мендзялеева звязвае паміж сабой макраскапічныя параметры канкрэтнага стану ідэальнага газу. Выкарыстоўваючы ўраўненне Клапейрона — Мендзялеева, можна апісаць розныя працэсы, якія адбываюцца ў ідэальным газе.

Ціск сумесі газаў. У паўсядзённым жыцці часта даводзіцца мець справу не з адным газам, які складаецца з аднолькавых малекул, а з сумессю некалькіх розных газаў, якія не ўступаюць у хімічныя рэакцыі. Напрыклад, паветра ў пакоі з'яўляецца сумессю азоту, кіслароду, інертных газаў і вадароду, а таксама некаторых іншых газаў.

З прычыны цеплавога руху часціц кожнага газу, што ўваходзіць у састаў газавай сумесі, яны раўнамерна размяркоўваюцца па ўсім аб'ёме, які займае сумесь. Сутыкненні часціц забяспечваюць у сумесі цеплавую раўнавагу.

Кожны газ уносіць свой уклад у сумарны ціск газавай сумесі, ствараючы ціск, які называюць *парцыяльным*.

Парцыяльны ціск — ціск газу, які ўваходзіць у састаў газавай сумесі, калі б ён адзін займаў увесь аб'ём, адведзены сумесі, пры той жа тэмпературы.

Сумесь ідэальных газаў лічаць ідэальным газам.



3 гісторыі фізікі

Фундаментальныя даследаванні газавых сумесей правёў англійскі вучоны Джон Дальтан (1766–1844). Ім быў сфармуляваны закон незалежнасці парцыяльнага ціску кампанентаў сумесі (1801–1802). У 1802 г. на некалькі месяцаў раней французскага вучонага Жозэфа Гей-Люсака (1778–1850) Дальтан вынайшоў закон цеплавога расшырэння газу, а таксама ўвёў паняцце атамнай вагі.



Пры пастаянных масе і малярнай масе адносіны здабытку ціску ідэальнага газу і яго аб'ёму да абсалютнай тэмпературы з'яўляюцца велічыняй пастаяннай (ураўненне стану ідэальнага газу):

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \quad pV = \frac{m}{M}RT$$

Парцыяльны ціск — ціск газу, які ўваходзіць у састаў газавай сумесі, калі ён адзін займаў увесь аб'ём, адведзены сумесі, пры той жа тэмпературы



1. Што называюць ураўненнем стану ідэальнага газу?
2. Як звязаны параметры ідэальнага газу ва ўраўненні стану?
3. Які ціск называюць парцыяльным?



Прыклад рашэння задачы

Балон з газам, ціск якога $p_1 = 2,84$ МПа, знаходзіўся ў неацпеленым памяшканні, дзе тэмпература паветра $t_1 = 7$ °С. Пасля таго як некаторая колькасць газу была зрасходавана, балон унеслі ў памяшканне, дзе тэмпература паветра $t_2 = 27$ °С. Вызначце, якая частка газу была зрасходавана, калі пасля працяглага знаходжання балона ў ацпеленым памяшканні ціск газу ў ім стаў $p_2 = 1,52$ МПа.

Дадзена:

$$p_1 = 2,84 \text{ МПа} =$$

$$= 2,84 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$T_1 = 280 \text{ К},$$

$$T_2 = 300 \text{ К}$$

$$p_2 = 1,52 \text{ МПа} =$$

$$= 1,52 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = ?$$

Рашэнне. Калі не прымаць пад увагу цеплавое расшырэнне балона, то яго ёмістасць не змяняецца. Запішам ураўненне Клапейрона — Мендзялеева для пачатковага і канчатковага станаў газу, палічыўшы яго ідэальным:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT_1, \quad p_2 V = \frac{m_2}{M} RT_2,$$

адкуль

$$m_1 = \frac{p_1 VM}{RT_1}, \quad m_2 = \frac{p_2 VM}{RT_2}.$$

Тады

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = \frac{VM \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right)}{\frac{VM p_1}{RT_1}} = 1 - \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}.$$

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = 1 - \frac{1,52 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 280 \text{ К}}{2,84 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 300 \text{ К}} = 0,50.$$

$$\text{Адказ: } \frac{m_1 - m_2}{m_1} = 0,50.$$



Практыкаванне 4

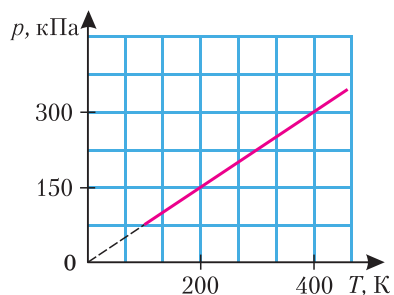
1. Вызначце колькасць рэчыва ідэальнага газу, які знаходзіцца ў пасудзіне ёмістасцю $V = 480 \text{ см}^3$ пры нармальных умовах (атмасферны ціск $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, тэмпература $t_0 = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$).

2. На малюнку 20 прыведзены графік залежнасці ціску вадароду, маса якога $m = 100 \text{ г}$, ад абсалютнай тэмпературы. Вызначце аб'ём, які займае газ.

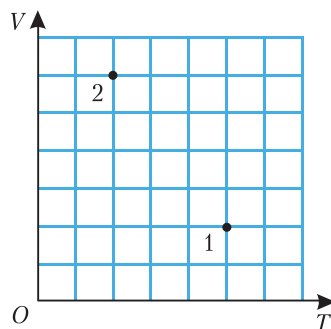
3. Балон ёмістасцю $V_1 = 15 \text{ л}$, дзе знаходзіцца газ, ціск якога $p_1 = 2,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$, злучылі з пустым балонам ёмістасцю $V_2 = 5,0 \text{ л}$. Вызначце ціск газу, які ўстанавіўся ў балонах, калі тэмпература пасля расшырэння газу праз некаторы прамежак часу стала такой, як і да расшырэння.

4. Азот, аб'ём якога $V_1 = 2,9 \text{ м}^3$, тэмпература $T_1 = 293 \text{ К}$ і ціск $p_1 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, перавялі ў вадкі стан. Вызначце аб'ём, які займае вадкі азот, калі яго шчыльнасць $\rho = 0,86 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

5. На малюнку 21 пункты 1 і 2 адпавядаюць розным станам ідэальнага газу пэўнай масы. Вызначце, у колькі разоў адрозніваюцца ціскі газу ў станах 1 і 2.



Мал. 20



Мал. 21



§ 6. Изотермичны, изобарны і изохорны працэсы

Уласцівасць газаў істотна змяняць адвезены ім аб'ём шырока выкарыстоўваюць у цеплавых рухавіках. Аналізуючы працэсы, якія адбываюцца з газам у гэтых прыладах, важна ведаць, якім законам падпарадкоўваюцца газы і якія ўмовы прымяняльнасці гэтых законаў.

Працэсы ў газе часта адбываюцца так, што змяняюцца толькі два параметры з пяці (p , V , T , m , M). Калі пры пастаянных масе і малярнай масе яшчэ адзін з макрапараметраў (p , V , T), якія ўваходзяць ва ўраўненне стану ідэальнага газу, не змяняецца, то такія працэсы называюць *ізапрацэсамі*.

Изотермічны працэс. Працэс змянення стану фізічнай сістэмы пры пастаянай тэмпературы ($T = \text{const}$) называюць *ізатэрмічным*.

Калі пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы маса і малярная маса ідэальнага газу не змяняюцца, то з ураўнення Клапейрона — Мендзялеева вынікае:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \text{const}, \text{ або } p = \frac{\nu RT}{V}, \text{ гэта значыць } p = \frac{\text{const}}{V}. \quad (6.1)$$

Ціск дадзенай масы газу пры пастаянных малярнай масе і тэмпературы адваротна прапарцыянальны яго аб'ёму.

Гэтае сцвярджанне называюць *законам Бойля — Марыёта*.

Праўдзівасць закона Бойля — Марыёта можна правесці эксперыментальна, выкарыстоўваючы прыладу, паказаную на малюнку 18 у § 5.

Калі павольна змяняць аб'ём газу, які знаходзіцца ў пасудзіне, то з прычыны цеплаабмену з навакольным асяродзем можна падтрымліваць тэмпературу газу ў пасудзіне практычна пастаянай. Пры гэтым памяншэнне аб'ёму газу пры вярчэнні вiнта 3 пацягне за сабой павелічэнне яго ціску і нязначнае павышэнне тэмпературы. І наадварот, павелічэнне аб'ёму прывядзе да памяншэння ціску і нязначнага паніжэння тэмпературы газу*.

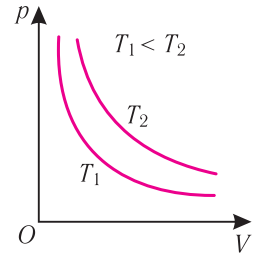
Ад тэорыі да практыкі

1. Чаму бурбалкі паветра, якія знаходзяцца ў вадкасці, паднімаючыся ўверх, павялічваюцца ў аб'ёме?

2. Калі, не адрываючыся, выпіць з пластыкавай бутэлькі газаваную ваду, то можна ўбачыць, што бутэлька дэфармуецца. Чаму?

* Нязначнае змяненне тэмпературы газу прынцыпова неабходнае для цеплаабмену з тэрмастатам — перадача цяпла магчымая толькі пры розных тэмпературах цел.

Графік ізатэрмічнага працэсу, які ажыццяўляецца ідэальным газам, у каардынатах (p , V) уяўляе з сябе гіпербалу (мал. 22). У фізіцы такую крывую называюць *ізатэрмай*. Розным значэнням тэмпературы газу адпавядаюць розныя ізатэрмы. Згодна з суадносінамі (6.1) для аднолькавых аб'ёмаў газу з аднолькавымі колькасцямі рэчыва і рознымі тэмпературамі чым большы ціск, тым вышэйшая тэмпература (мал. 22).



Мал. 22

Шматлікія доследы паказалі, што даследаваныя газы падпарадкоўваюцца закону Бойля — Марыёта тым больш дакладна, чым меншая іх шчыльнасць. Пры значным павелічэнні ціску газу гэты закон не выконваецца.

Ад тэорыі да практыкі

Пабудуйце графікі ізатэрмічнага працэсу ў каардынатах (p , T) і (V , T).

Цікава ведаць

Лёгкія размешчаны ў грудной клетцы, аб'ём якой пры дыханні перыядычна змяняецца дзякуючы рабоце міжрэберных мышц і дыяфрагмы. Калі грудная клетка пашыраецца, ціск паветра ў лёгкіх становіцца меншы, чым атмасферны, і паветра праз паветраносныя шляхі накіроўваецца ў лёгкія — адбываецца ўдых. Пры выдыху аб'ём грудной клеткі памяншаецца, што выклікае памяншэнне аб'ёму лёгкіх. Ціск паветра ў іх становіцца вышэйшы за атмасферны, і паветра з лёгкіх накіроўваецца ў знешняе асяроддзе.

Ізабарны працэс. Працэс змянення стану газу пры пастаянным ціску ($p = \text{const}$) называюць *ізабарным*.

У 1802 г. французскі вучоны Жозэф Гей-Люсак (1778—1850) разгледзеў гэты працэс для паветра, вадароду, кіслароду і азоту.

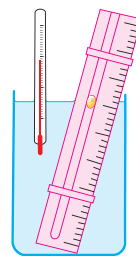
Калі пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы маса і малярная маса газу не змяняюцца, то аб'ём газу, як вынікае з ураўнення Клапейрона — Мендзялеева:

$$V = \frac{mR}{pM}T \quad \text{або} \quad V = \frac{\nu R}{p}T, \quad \text{гэта значыць} \quad V = \text{const} \cdot T. \quad (6.2)$$

Аб'ём дадзенай масы газу пры пастаянных малярнай масе і ціску прама прапарцыянальны абсалютнай тэмпературы.

Гэтае сцвярджэнне называюць *законам Гей-Люсака*.

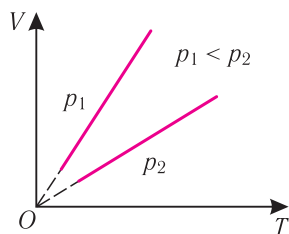
Праўдзівасць закона Гей-Люсака можна праверыць эксперыментальна, выкарыстоўваючы прыладу, паказаную на малюнку 23. Вадкасць у пасудзіне знаходзіцца ў цеплавой раўнавазе з тонкай трубкай, запоўненай паветрам, якое закрыта кропелькай алею. Пры павелічэнні тэмпературы вадкасці аб'ём паветра, што знаходзіцца ў трубцы пад кропелькай алею, узрастае і кропелька рухаецца ўверх. Пры памяншэнні тэмпературы аб'ём паветра памяншаецца — і кропелька рухаецца ўніз.



Мал. 23

Ад тэорыі да практыкі

Ці можна лічыць расшырэнне газу пры павольным нагрыванні яго ў цыліндры з рухомым поршнем ізабарным працэсам?



Мал. 24

Паколькі $V \sim T$, то ў каардынатах (V, T) графік ізабарнага працэсу для ідэальнага газу ўяўляе з сябе прамую лінію, працяг якой праходзіць праз пачатак каардынат (мал. 24). Гэтую лінію называюць *ізабарай*.

Ізабара рэальных газаў не можа быць працягнутая да нулявога значэння тэмпературы (на графіку пункцірная лінія), бо пры нізкіх тэмпературах усе газы істотна адрозніваюцца ад мадэлі «ідэальны газ» і пры далейшым паніжэнні тэмпературы ператвараюцца ў вадкасці.

У адных і тых каардынатах (V, T) можна пабудаваць некалькі ізабар, якія будуць адпавядаць розным ціскам дадзенай масы ідэальнага газу пры нязменнай малярнай масе. Аналіз суадносін (6.2) дазваляе зрабіць выснову, што большаму ціску адпавядае меншы нахіл ізабары да восі тэмператур (гл. мал. 24).

Ад тэорыі да практыкі

Пабудуйце графікі ізабарнага працэсу ў каардынатах (p, V) і (p, T) .

Ізахорны працэс. Працэс змянення стану газу пры пастаянным аб'ёме ($V = \text{const}$) называюць *ізахорным*.

Упершыню гэты працэс быў разгледжаны ў 1787 г. французскім вучоным Жакам Шарлем (1746–1823)*.

* Нягледзячы на тое што Шарль не апублікаваў вынікі сваіх даследаванняў, гісторыя фізікі аддае прыярытэт адкрыцця яму.

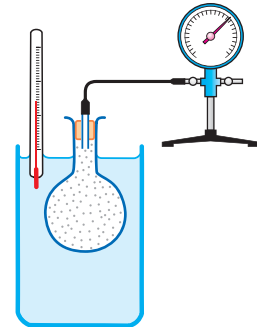
Калі пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы маса і малярная маса ідэальнага газу не змяняюцца, то ціск газу, як вынікае з ураўнення Клапейрона — Мендзялеева:

$$p = \frac{mR}{VM}T \quad \text{або} \quad p = \frac{\nu R}{V}T, \quad \text{гэта значыць} \quad p = \text{const} \cdot T. \quad (6.3)$$

Ціск дадзенай масы газу пры пастаянных малярнай масе і аб'ёме прама прапарцыянальны абсалютнай тэмпературы.

Гэтае сцвярджэнне называюць *законам Шарля*.

Праўдзівасць закона Шарля можна правесці эксперыментальна, выкарыстоўваючы прыладу, паказаную на малюнку 25. Колба з паветрам, злучаная з манометрам, знаходзіцца ў цеплавой раўнавазе з вадкасцю ў пасудзіне. Пры павелічэнні тэмпературы вадкасці ціск паветра ў колбе ўзрастае, а пры памяншэнні тэмпературы ціск паветра змяншаецца.



Мал. 25

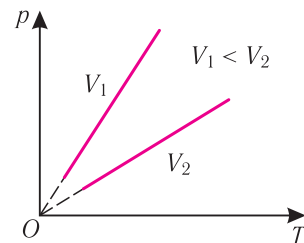
Ад тэорыі да практыкі

Ідэальны газ пэўнай масы ізахорна ахалоджваюць так, што яго тэмпература памяншаецца ад $t_1 = 327 \text{ }^\circ\text{C}$ да $t_2 = 7 \text{ }^\circ\text{C}$. У колькі разоў памяншаецца ціск газу?

У каардынатах (p, T) графік ізахорнага працэсу, які ажыццяўляецца ідэальным газам, з'яўляецца прамой лініяй, працяг якой праходзіць праз пачатак каардынат (мал. 26). Гэтую лінію называюць *ізахорай*.

Як і ў выпадку ізабарнага працэсу, ізахора рэальных газаў не можа быць працягнутая да нулявога значэння тэмпературы.

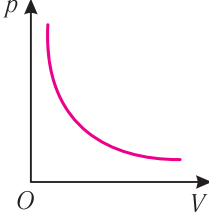
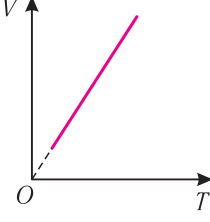
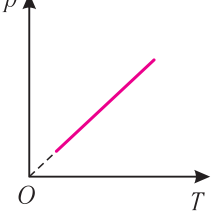
У адных і тых каардынатах (p, T) можна пабудаваць некалькі ізахор, якія адпавядаюць розным аб'ёмам дадзенай масы газу пры нязменнай малярнай масе. Аналіз суадносін (6.3) паказвае, што большаму аб'ёму адпавядае меншы нахіл ізахоры да восі тэмператур (гл. мал. 26).



Мал. 26

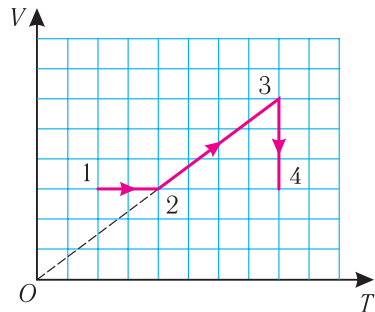
Ад тэорыі да практыкі

Пабудуйце графікі ізаходнага працэсу ў каардынатах (p, V) і (V, T) .

	Працэс змянення стану ідэальнага газу дадзенай масы пры нязменнай малярнай масе		
	ізатэрмічны	ізабарны	ізаходны
Пры пастаянным макраскапічным параметры	$T = \text{const}$	$p = \text{const}$	$V = \text{const}$
Ураўненне працэсу	$p = \frac{\text{const}}{V},$ $p_1V_1 = p_2V_2$	$V = \text{const } T,$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$p = \text{const } T,$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
Фармулёўка закона	Ціск дадзенай масы ідэальнага газу пры нязменных малярнай масе і тэмпературы адваротна прапарцыянальны яго аб'ёму	Аб'ём дадзенай масы ідэальнага газу пры нязменных малярнай масе і ціску прама прапарцыянальны яго абсалютнай тэмпературы	Ціск дадзенай масы ідэальнага газу пры нязменных малярнай масе і аб'ёме прама прапарцыянальны яго абсалютнай тэмпературы
			



1. Якая сувязь існуе паміж ціскам і аб'ёмам ідэальнага газу пры ізатэрмічным працэсе?
2. Якая сувязь існуе паміж аб'ёмам і абсалютнай тэмпературай ідэальнага газу пры ізабарным працэсе?
3. Якая сувязь існуе паміж ціскам і абсалютнай тэмпературай ідэальнага газу пры ізохорным працэсе?
4. Пры выкананні якіх умоў праўдзівы кожны з законаў для ізапрацэсаў у рэальным газе?
5. Аб'ём ідэальнага газу пэўнай масы і нязменнага хімічнага саставу ізабарна павялічылі ў $b = 1,5$ раза, а затым ціск газу ізохорна паменшылі ў $c = 3$ разы.
 - а) Як змянілася абсалютная тэмпература газу ў выніку першага працэсу?
 - б) Як змянілася абсалютная тэмпература газу ў выніку другога працэсу?
 - в) У колькі разоў пачатковая абсалютная тэмпература газу адрозніваецца ад яго канчатковай тэмпературы?
6. На малюнку 27 прыведзены графік трох працэсаў змянення стану ідэальнага газу пэўнай масы і нязменнага хімічнага саставу.
 - а) Якому працэсу адпавядае ўчастак $1 \rightarrow 2$ графіка? У колькі разоў павялічыўся ціск газу ў гэтым працэсе?
 - б) Якому працэсу адпавядае ўчастак $2 \rightarrow 3$ графіка? У колькі разоў павялічыліся аб'ём і абсалютная тэмпература газу ў гэтым працэсе?
 - в) Якому працэсу адпавядае ўчастак $3 \rightarrow 4$ графіка? Як і ў колькі разоў змяніліся аб'ём і ціск газу ў гэтым працэсе?
 - г) У колькі разоў трэба паменшыць тэмпературу газу, каб ізохорна перавесці газ са стану 4 у стан 2?

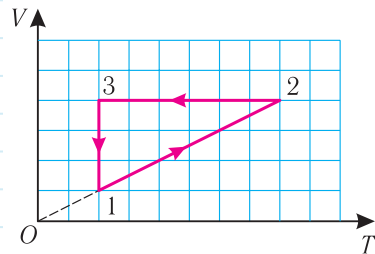


Мал. 27

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. На малюнку 28 прыведзены графік трох працэсаў змянення стану пэўнай масы ідэальнага газу. Як змяняліся параметры газу на ўчастках $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 1$? Адлюструйце гэтыя працэсы ў каардынатах (p, V) і (p, T) .

Рашэнне. На ўчастку $1 \rightarrow 2$ аб'ём газу прама прапарцыянальна абсалютнай тэмпературы. Значыць, працэс пераходу газу са



Мал. 28

стану 1 у стан 2 з'яўляецца ізабарным. З графіка вынікае, што ў стане 2 тэмпература і аб'ём газу ў 4 разы большыя, чым у стане 1. Значыць, у працэсе ізабарнага расшырэння пэўнай масы газу са стану 1 у стан 2 тэмпература і аб'ём газу павялічыліся. Гэта можна запісаць такім чынам:

$$\text{пераход } 1 \rightarrow 2: p = \text{const}, V \uparrow, T \uparrow, V_2 = 4V_1, T_2 = 4T_1 \Rightarrow \\ \text{адбываецца ізабарнае нагрыванне газу.}$$

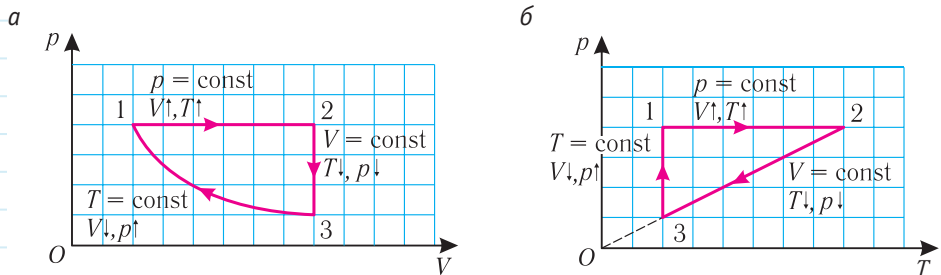
У працэсе пераходу газу са стану 2 у стан 3 застаецца пастаянным аб'ём (працэс ізохорны), а тэмпература газу памяншаецца ў 4 разы. З суадносін (6.3) вынікае, што пры ізохорным ахаладжэнні ціск газу памяншаецца прапарцыянальна яго абсалютнай тэмпературы. Таму можна запісаць:

$$\text{пераход } 2 \rightarrow 3: V = \text{const}, T \downarrow, p \downarrow, p_3 = \frac{T_3}{T_2} p_2 = \frac{1}{4} p_2 \Rightarrow \\ \text{адбываецца ізохорнае ахаладжэнне газу.}$$

Працэс пераходу газу са стану 3 у стан 1 — ізатэрмічны. Пры гэтым аб'ём газу памяншаецца ў 4 разы, што цягне за сабой, згодна з законам Бойля — Марыёта, павелічэнне ціску газу ў 4 разы:

$$\text{пераход } 3 \rightarrow 1: T = \text{const}, V \downarrow, p \uparrow \Rightarrow \\ \text{адбываецца ізатэрмічнае сцісканне газу.}$$

На падставе зробленых высноў адлюструем усе тры працэсы ў каардынатах (p, V) і (p, T) (мал. 29, а, б).



Мал. 29

Прыклад 2. Пры ізатермічным расшырэньні ідэальнага газу пэўнай масы яго аб'ём павялічыўся ад $V_1 = 2,0$ л да $V_2 = 5,0$ л, а ціск зменшыўся на $\Delta p = -15$ кПа. Вызначце першапачатковы ціск газу.

Дадзена:

$$V_1 = 2,0 \text{ л} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 5,0 \text{ л} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$\Delta p = -15 \text{ кПа} = -1,5 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

p_1 — ?

Адсюль

Рашэнне. Паколькі тэмпература і маса газу не змяняюцца, то яго пачатковы і канчатковы станы звязаны з законам Бойля — Марыёта, гэта значыць $p_1 V_1 = p_2 V_2$. З улікам таго, што $p_2 = p_1 + \Delta p$, атрымаем:

$$p_1 V_1 = (p_1 + \Delta p) V_2.$$

$$p_1 = \frac{\Delta p V_2}{V_1 - V_2}.$$

$$p_1 = \frac{-1,5 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Па} = 25 \text{ кПа}.$$

Адказ: $p_1 = 25$ кПа.



Практыкаванне 5

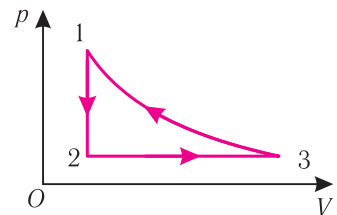
1. Пры ізабарным павелічэнні тэмпературы ідэальнага газу, які знаходзіцца ў герметычна закрытым цыліндры, на $\Delta T = 60,0$ К яго аб'ём павялічыўся ў $\beta = 1,21$ раза. Вызначце пачатковую абсалютную тэмпературу газу.

2. Адлюструйце графічна працэс ізабарнага ахаладжэння пэўнай масы ідэальнага газу ў каардынатах (p, T) ; (V, T) ; (V, p) .

3. Ідэальны газ пэўнай масы спачатку ізабарна расшырылі, а затым ізатермічна сціснулі да першапачатковага аб'ёму. Адлюструйце графічна гэты працэсы ў каардынатах (V, T) ; (p, V) .

4. На малюнку 30 прыведзены графік змянення стану пэўнай масы ідэальнага газу. (Пераход $3 \rightarrow 1$ ажыццяўляецца пры нязменнай тэмпературы.) Адлюструйце графічна гэты працэс у каардынатах (T, V) і (p, T) .

5. Пры тэмпературы $t_1 = -3,0$ °C манометр на балоне са сціснутым кіслародам паказваў ціск $p_1 = 1,8 \cdot 10^6$ Па, а пры тэмпературы $t_2 = 27$ °C — ціск $p_2 = 2,0 \cdot 10^6$ Па. Вызначце, ці была ўцечка газу з балона.



Мал. 30



Абагульненне і сістэматызацыя ведаў

АСНОЎНЫЯ ПАЛАЗЖЭННІ МАЛЕКУЛЯРНА-КІНЕТЫЧНАЙ

Рэчыва мае дыскрэтную будову
(складаецца з мікраскапічных часціц)

Часціцы рэчыва

Мікрапараметры

Маса малекулы $m_0 = \frac{M}{N_A}$,
скорасць \bar{v} малекулы,
імпульс \bar{p} малекулы,
кінетычная энергія E_k
цеплавога руху малекулы

Сярэдняя
кінетычная энергія
паступальнага
руху малекул
 $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT$

Асноўнае ўраўненне
МКТ
 $p = \frac{1}{3}nm_0\langle v^2 \rangle, p = \frac{2}{3}n\langle E_k \rangle$

Залежнасць ціску газу
ад канцэнтрацыі малекул
і тэмпературы
 $p = nkT$

ТЭОРЫІ БУДОВЫ РЭЧЫВА

хаатычна рухаюцца

Сярэдняя
квадратычная
скорасць руху
малекул газу

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Часціцы рэчыва
ўзаемадзейнічаюць паміж сабой

Макрапараметры

Ціск | Аб'ём | Тэмпература

Ураўненне стану ідэальнага газу

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

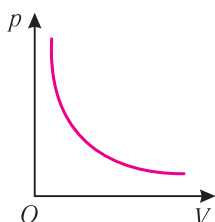
Ураўненне Клапейрона, якое звязвае
два любыя станы ідэальнага газу
пры нязменных масе і малярнай масе:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Ізатэрмічны
працэс

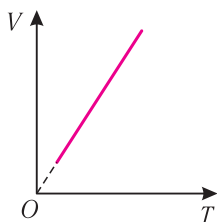
$$p = \frac{\text{const}}{V}$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Ізобарны
працэс

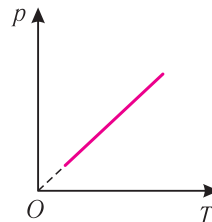
$$V = \text{const } T$$

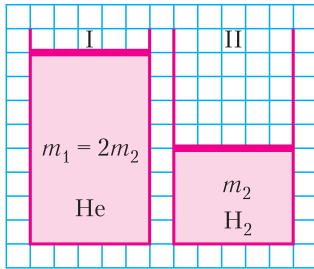
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Ізохорны
працэс

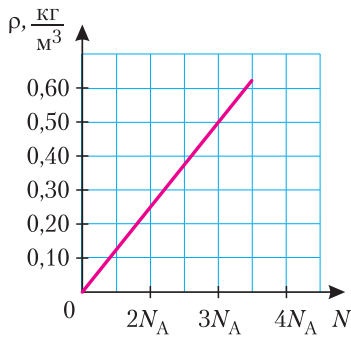
$$p = \text{const } T$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

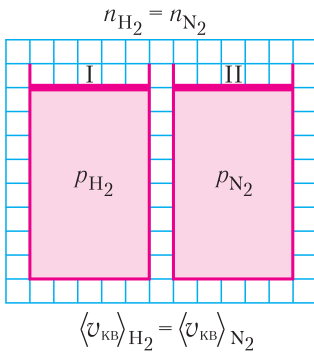




Мал. 31



Мал. 32



Мал. 33

Заданні для самакантролю

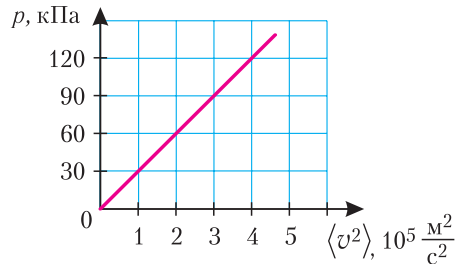
1. Вызначце адносіны канцэнтрацыі часціц у другой пасудзіне да канцэнтрацыі часціц у першай пасудзіне (мал. 31).

2. На графіку (мал. 32) паказана залежнасць шчыльнасці вадароду H_2 ад колькасці яго малекул у пасудзіне. Вызначце ўмяшчальнасць пасудзіны.

3. У пасудзіну з вадой кінулі крышталік кухоннай солі $NaCl$ масай $m = 2,0$ мг. Праз некаторы прамежак часу соль, растварыўшыся, размеркавалася раўнамерна па ўсім аб'ёме вады так, што ў кожным кубічным міліметры раствора стала $N_1 = 6,0 \cdot 10^{12}$ іонаў натрыю. Вызначце аб'ём вады ў пасудзіне.

4. Канцэнтрацыі малекул вадароду і азоту ў пасудзіне і сярэднія квадратычныя скорасці іх руху аднолькавыя (мал. 33). Вызначце, у колькі разоў ціск азоту большы за ціск вадароду.

5. На малюнку 34 прыведзены графік залежнасці ціску газу ў балоне газанапоўненай электрычнай лямпы ад сярэдняга квадрата скорасці цеплавога руху яго малекул. Вызначце шчыльнасць газу ў балоне лямпы.

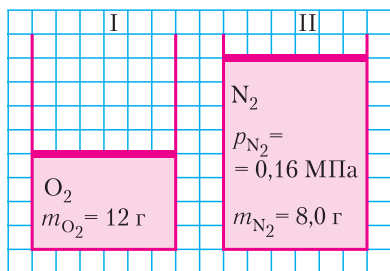


Мал. 34

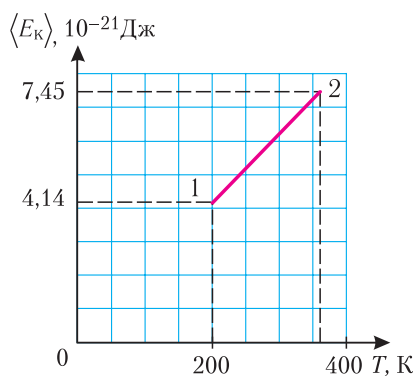
6. Сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул газу ў абедзвюх пасудзінах аднолькавая і складае $\langle E_k \rangle = 3,15 \cdot 10^{-21}$ Дж (мал. 35). Вызначце канцэнтрацыю газу ў першай пасудзіне.

7. Ціск гелію ў пасудзіне $p = 0,36$ МПа, а яго шчыльнасць $\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Вызначце сярэднюю кінетычную энергію цеплага руху атамаў гелію.

8. Пры пераходзе са стану 1 у стан 2 сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул ідэальнага газу змянялася так, як паказана на графіку (мал. 36). Вызначце тэмпературу газу ў стане 2.



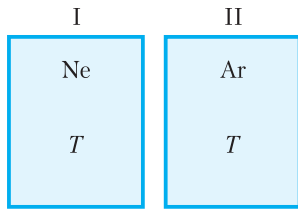
Мал. 35



Мал. 36

9. Пад поршнем у цыліндры знаходзіцца ідэальны газ. У табліцы прыведзены некаторыя параметры газу пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы. Вызначце аб'ём, які займаў газ у канчатковым стане.

Стан	Параметры газу		
	Ціск	Абсалютная тэмпература	Аб'ём
Пачатковы	p_1	T_1	$V_1 = 2 \text{ л}$
Канчатковы	$p_2 = 4p_1$	$T_2 = 2T_1$	V_2



Мал. 37

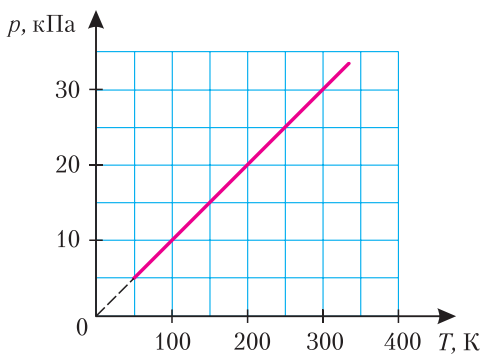
10. Вызначце адносіны $\frac{\langle v_{\text{квI}} \rangle}{\langle v_{\text{квII}} \rangle}$ сярэдніх квадратычных скорасцей цеплавога руху атамаў газаў, якія знаходзяцца ў пасудзінах (мал. 37).

11. Кінетычная энергія цеплавога руху ўсіх часціц ідэальнага аднаатамнага газу, які знаходзіцца ў герметычна закрытым балоне, $E_{\text{к}} = 12$ кДж. Вызначце ціск газу, калі ёмістасць балона $V = 20$ л.

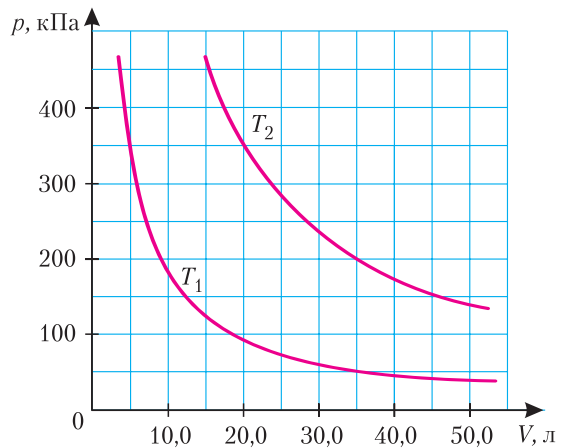
12. На малюнку 38 прыведзены графік залежнасці ціску ідэальнага газу, колькасць рэчыва якога $\nu = 10$ моль, ад абсалютнай тэмпературы. Вызначце аб'ём газу.

13. На малюнку 39 прыведзены графікі залежнасці ціску ідэальнага газу пэўнай масы ад аб'ёму пры пастаянных значэннях T_1 і T_2 абсалютнай тэмпературы. Вызначце тэмпературу T_2 газу, калі тэмпература $T_1 = 210$ К.

14. Пасля ізахорнага нагрывання ідэальнага газу пэўнай масы ад тэмпературы $T_1 = 300$ К да тэмпературы $T_2 = 420$ К і наступнага ізабарнага нагрывання газ быў пераведзены ў зыходны стан у працэсе, пры якім ціск памяншаецца прама прапарцыянальна аб'ёму. Вызначце тэмпературу ідэальнага газу пасля ізабарнага нагрывання.



Мал. 38



Мал. 39

§ 7. Будова і ўласцівасці цвёрдых цел

У пайсядзённым жыцці мы лічым цвёрдым любое цела, якое захоўвае форму і аб'ём пры адсутнасці знешніх уздзеянняў, напрыклад целы, вырабленыя з металаў, пластмасы, лёду, шкла. Цвёрдыя целы падзяляюць на дзве групы, якія адрозніваюцца па сваіх уласцівасцях: крышталічныя і аморфныя. У чым адрозненне паміж крышталічнымі цвёрдымі цэламі і аморфнымі?

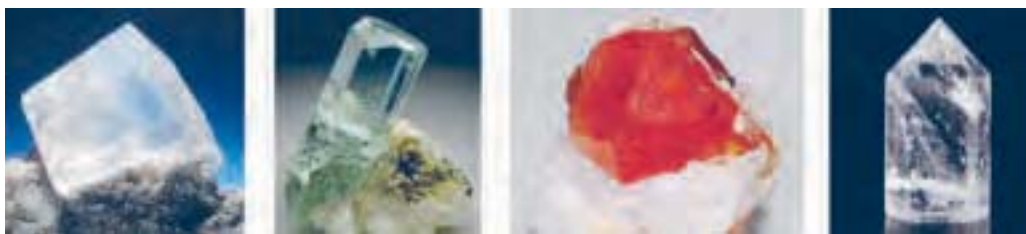
Крышталі. Да крышталічных цел адносяць мінералы, напрыклад павараную соль, медны купарвас, кварц, галын (мал. 40), горны хрусталь і металы ў цвёрдым стане.



Мал. 40

Крышталі — цвёрдыя целы, атамы, іоны або малекулы якіх выконваюць цэплавая ваганні каля пэўных, упарадкаваных у прасторы становішчаў раўнавагі.

Упарадкаванае размяшчэнне часціц цвёрдага крышталічнага цела абумоўлівае яго правільную геаметрычную форму, у выніку чаго паверхня крышталя ўтворана плоскімі гранямі (мал. 41).



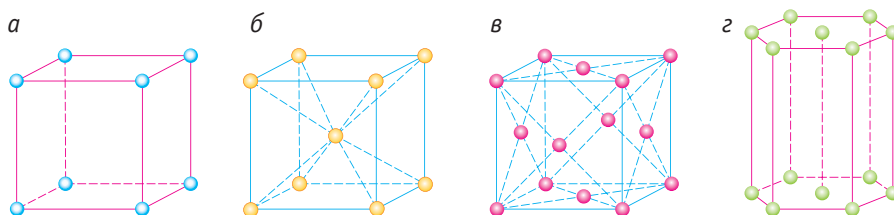
Мал. 41

Часціцы крышталя ўтрымліваюцца на пэўнай усярэдняй адлегласці адна ад адной ($\sim 0,1$ нм) сіламі міжатамнага і міжмалекулярнага ўзаемадзеянняў. Нягледзячы на цэплавая ваганні, яны ўтвараюць упарадкаваную прасторавую

структуру. Геаметрычнай выявай гэтай структуры з'яўляецца *крышталічная рашотка*. *Вузлы крышталічнай рашоткі* — гэта становішчы ўстойлівай раўнавагі, адносна якіх вагаюцца часціцы (іоны, атамы або малекулы), што ўтвараюць крышталі.

Асновай будовы крышталі з'яўляецца так званая *элементарная крышталічная ячэйка* — шматграннік найменшых памераў, паслядоўным пераносам без змены арыентацыі якога разам з часціцамі, што знаходзяцца ўнутры гэтага шматгранніка, можна пабудаваць увесь крышталі.

На малюнку 42 паказаны самыя простыя элементарныя ячэйкі: кубічныя (*a* — прымітыўная, *b* — аб'ёмна-цэнтраваная, *v* — гранецэнтраваная) і гексаганальная прызма (*z*).



Мал. 42

У крышталічных цэлах упарадкаванае размяшчэнне часціц паўтараецца ва ўсім аб'ёме крышталі, таму гавораць, што ў крышталі існуе *далёкі парадак* у размяшчэнні часціц.

Цікава ведаць

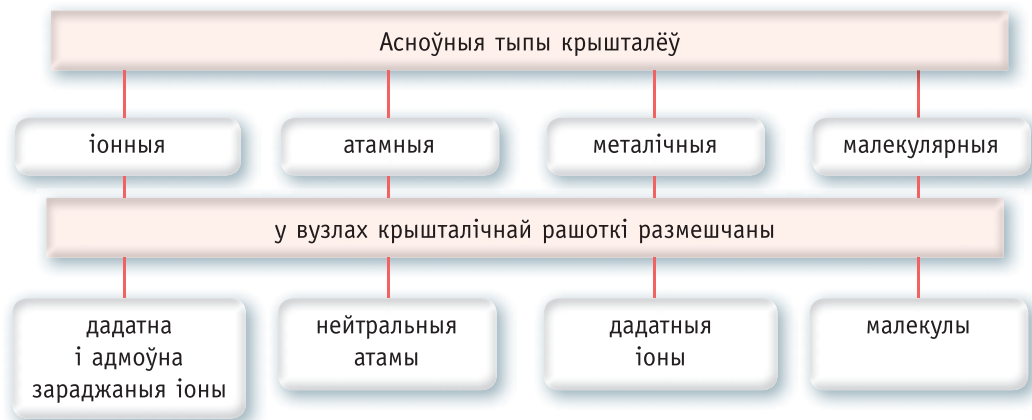
Каб зразумець, чаму ў крышталічных цэлах існуе ўпарадкаванае размяшчэнне часціц, правядзём дослед. Насыплем на ўвагнутае шкло аднолькавыя маленькія шарыкі (мал. 43, *a*) і злёгка страсянем іх некалькі разоў. Можна ўбачыць, што шарыкі размесцяцца на шкле ў строгім парадку (мал. 43, *b*). Шарыкі знаходзяцца ў самым нізкім з магчымых становішчаў, што адпавядае мінімуму іх патэнцыяльнай энергіі ў гравітацыйным полі Зямлі.

Крышталічная структура таксама звязана з мінімумам патэнцыяльнай энергіі, гэта значыць, што пры ўтварэнні крышталі часціцы самаадвольна размяшчаюцца так, каб патэнцыяльная энергія іх узаемадзеяння была мінімальнай.



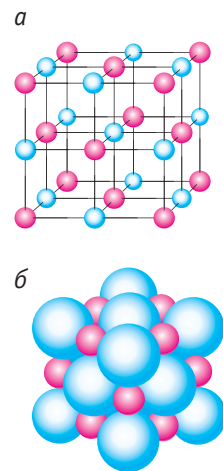
Мал. 43

Тыпы крышталёў. У залежнасці ад віду часціц, якія ўтвараюць крышталі, і ад характару сіл узаемадзеяння паміж імі адрозніваюць чатыры асноўныя тыпы крышталёў.

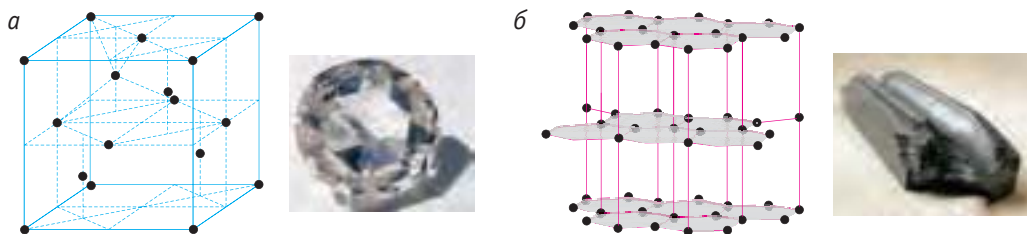


Тыповым прыкладам іоннага крышталю з’яўляецца крышталі хларыду натрыю NaCl (мал. 44, а, б). Крышталі з іоннай рашоткай тугаплаўкія і маюць высокую цвёрдасць.

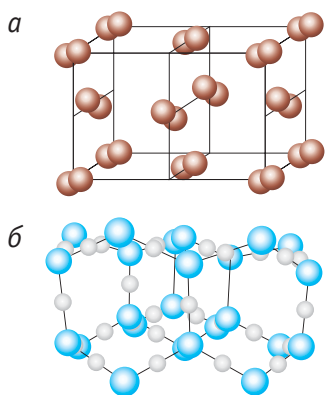
Прыклады атамных крышталёў — алмаз і графіт. Гэтыя крышталі тоесныя па хімічнай прыродзе (яны складаюцца з атамаў вугляроду), але адрозніваюцца па сваёй будове (мал. 45). У крышталічнай рашотцы алмазу кожны атам вугляроду знаходзіцца ў цэнтры тэтраэдра, вяршынямі якога з’яўляюцца чатыры найбліжэйшыя атомы, і трывала звязаны з гэтымі атамамі праз аб’яднанне валентных электронаў (мал. 45, а). Менавіта такой моцнай сувяззю і абумоўлена ўнікальная цвёрдасць алмазу. Крышталічная рашотка графіту мае слаістую структуру (мал. 45, б). Атамныя слаі графіту слаба звязаны адзін з адным, бо адлегласць



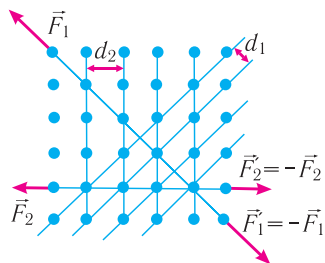
Мал. 44



Мал. 45



Мал. 46



Мал. 47

паміж імі ў некалькі разоў большая, чым адлегласць паміж суседнімі атамамі ў адным слоі. Гэтым абумоўлена тое, што слаі могуць лёгка аддзяляцца адзін ад аднаго, чым і тлумачыцца мяккасць і крохкасць графіту.

Прыкладамі крысталёў з металічнай крышталічнай рашоткай з'яўляюцца палоній Po (гл. мал. 42, а), жалеза Fe (гл. мал. 42, б), серабро Ag (гл. мал. 42, в), магній Mg (гл. мал. 42, г).

Малекулярныя крысталі ўтвараюць большасць простых рэчываў неметалаў у цвёрдым стане, напрыклад ёд I₂ (мал. 46, а), вадарод H₂, кісларод O₂, і іх злучэнні адзін з адным (лёд H₂O) (мал. 46, б), а таксама практычна ўсе цвёрдыя арганічныя рэчывы.

Монакрысталі і полікрысталі. Існуюць адзінкавыя крысталі, якія называюць монакрысталіямі. Яны могуць мець даволі значныя памеры. Сустрэкаюцца крысталі горнага хрусталоў, памеры якіх сувымерныя з ростам чалавека.

Монакрысталі — цвёрдыя целы, якія маюць ва ўсім аб'ёме адзіную крышталічную рашотку.

Характэрнай асаблівасцю монакрысталёў з'яўляецца іх *анізатрапія*, гэта значыць залежнасць фізічных уласцівасцей (механічных, цеплавых, электрычных, аптычных) ад напрамку ўнутры крышталю. Анізатрапія монакрысталёў абумоўлена адрозненнем у шчыльнасці размяшчэння часціц у крышталічнай рашотцы па розных напрамках. На малюнку 47 паказана, што адлегласці паміж атамнымі плоскасцямі ў крысталі неаднолькавыя ($d_1 < d_2$). Таму, у прыватнасці, будуць адрознівацца і сілы, неабходныя для яго разрыву ($F_1 > F_2$). Напрыклад, кавалак слюды даволі лёгка раслаіцца ў адным з напрамкаў на тонкія пласцінкі, але для таго, каб разарваць яго ў напрамку, які перпендыкулярны пласцінкам, спатрэбяцца вельмі значныя намаганні.

Цікава ведаць

Анізатрапія ўласцівая некаторым матэрыялам біялагічнага паходжання. Напрыклад, касцявым і мышачным тканкам чалавека і жывёл. Ёю валодаюць таксама драўніна і лісце, трава і інш.

Большасць крышталічных цвёрдых цел з'яўляюцца *полікрышталямі*.

Полікрышталі — цвёрдыя целы, што складаюцца з вялікай колькасці маленькіх крышталёў, якія зрасліся паміж сабой.

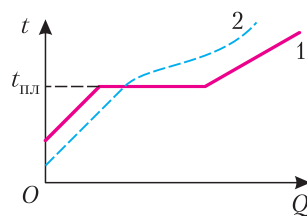
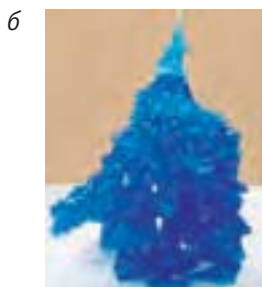
У адрозненне ад монакрышталёў полікрышталі *ізатропныя*, гэта значыць іх уласцівасці аднолькавыя па ўсіх напрамках. Гэта вынік таго, што полікрышталі складаюцца з вялікай колькасці хаатычна арыентаваных маленькіх монакрышталёў.

Вы самі можаце ў хатніх умовах вырасціць монакрышталі (мал. 48, а) і полікрышталі (мал. 48, б) міднага купарвасу (сульфату медзі(II) CuSO_4).

Крышталічныя целы маюць пэўную тэмпературу плаўлення $t_{\text{пл}}$, якая не змяняецца ў працэсе плаўлення пры пастаянным ціску. Залежнасць тэмпературы крышталічнага цела ад атрыманай ім колькасці цеплаты паказана на малюнку 49, графік 1.



Мал. 48



Мал. 49

Ад тэорыі да практыкі

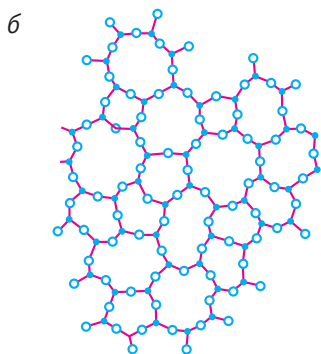
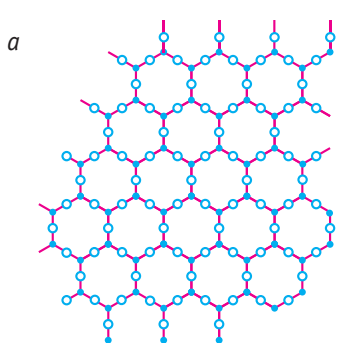
1. Чаму шар, выраблены з монакрышталя, пры награванні змяняе не толькі свой аб'ём, але і форму?

2. Ці будзе пры награванні шара, вырабленага са сталі, змяняцца не толькі аб'ём, але і форма?

Аморфныя целы. Да аморфных (ад грэч. *amorphous* — бясформенны) цел адносяць апал, абсідыян, эбаніт, сургуч (мал. 50), шкло, розныя пластыкі, смолы (вар, каніфоль, бурштын) і інш.



Мал. 50



Мал. 51



Аморфны стан — цвёрды некрышталічны стан рэчыва, які характарызуецца ізатрапіяй уласцівасцей і адсутнасцю пэўнай тэмпературы плаўлення.

Залежнасць тэмпературы аморфнага цела ад атрыманай ім колькасці цеплаты паказана на малюнку 49, графік 2. Пры павышэнні тэмпературы аморфнае рэчыва размякчаецца і паступова пераходзіць у вадкі стан. У аморфным стане адсутнічае строгі парадак у размяшчэнні атамаў і малекул. Аморфны стан — бяспарнасны стан са слаба выяўленай цяжкасцю.

Аморфныя целы называюць пераахладжанымі вадкасцямі, бо ў іх, як і ў вадкасцях, існуе толькі блізкі парадак размяшчэння часціц.

На малюнках 51 схематычна паказана будова крышталічнага кварцу (мал. 51, *a*) і аморфнага кварцу (мал. 51, *б*).

Аморфныя целы пры пэўных умовах могуць крышталізавацца. Цукар-пясок з'яўляецца крышталічным целам (мал. 52, *a*). Калі яго расплавіць, то, застываючы, ён ператвараецца ў празрысты шклопадобны ледзянец (мал. 52, *б*), які з'яўляецца аморфным целам. Праз некаторы прамежак часу ледзянец «зацукроўваецца», гэта значыць зноў робіцца крышталічным.

Пры хуткасцях ахаладжэння, якія перавышаюць мільён градусаў у секунду, удалося атрымаць аморфныя металічныя сплавы — шклопадобныя металы. Аморфны метал надзвычай цвёрды і трывалы. Яго выкарыстоўваюць у якасці рэжучага інструмента. Ён валодае высокімі магнітнымі ўласцівасцямі, таму з'яўляецца незаменным пры вырабе магнітных галолак для гука- і відэазапісу. Акрамя таго, аморфныя металы валодаюць высокай антыкарызійнай устойлівасцю.

Мал. 52

Ад тэорыі да практыкі

1. Ёсць дзве тонкія пласцінкі, пакрытыя воскам. Да пласцінак па чарзе дакрануліся гарачай спіцай. На адной пласцінцы пры плаўленні воску ўтварылася круглая пляма, а на другой — авальная. Якое з гэтых цел крышталічнае, а якое аморфнае?

2. У дзвюх пасудзінах неабходна расплавіць два цвёрдыя целы. Як, назіраючы за працэсам плаўлення, можна вызначыць, якое з гэтых цел крышталічнае, а якое аморфнае?

Цікава ведаць

Шкло валодае цякучасцю нават пры нармальных умовах, хоць і цячэ вельмі павольна. У старых будынках, дзе вокны даўно не мянялі, можна заўважыць паступовае патаўшчэнне шыбін да нізу.



1. Якія целы называюць цвёрдымі?
2. Якія асаблівасці будовы крышталічных цвёрдых цел?
3. Якія тыпы крышталёў вы ведаеце? Чым яны адрозніваюцца адзін ад аднаго?

4. У чым адрозненне паміж мона- і полікрышталіямі?
5. У чым адрозненне паміж паняццямі «анізатрапія» і «ізатрапія»?
6. Чым адрозніваюцца асноўныя фізічныя ўласцівасці крышталічных і аморфных цел?

Дамашняя лабараторыя

Правядзіце назіранне за ростам крышталёў. Для гэтага прыгатуйце насычаны раствор кухоннай солі ў пасудзіне з гарачай вадой (раствор становіцца насычаным, калі соль перастае растварацца ў вадзе і пачынае асядаць на дно). Працадзіце раствор, пераліваючы ў іншую посудзіну. У астылы раствор апусціце нітку з прывязаным да яе крышталікам солі. Другі канец ніткі замацуйце на стрыжні, які змясціце на край пасудзіны. Назірайце за ростам крышталя на працягу некалькіх дзён.

Якая форма вырашчанага вамі крышталя? Ці з'яўляецца ён полікрышталём?

§ 8. Будова і ўласцівасці вадкасцей

Фізічныя ўласцівасці розных газаў, якія знаходзяцца пры дастаткова малых шчыльнасцях і высокіх тэмпературах, амаль аднолькавыя. Уласцівасці цвёрдых цел істотна залежаць ад узаемадзеяння часціц, з якіх яны складаюцца, і таму вельмі розныя. А што абумоўлівае ўласцівасці вадкасцей і іх адрозненне ад газаў і цвёрдых цел?

Рэчыва ў вадкім агрэгатым стане займае прамежкавае становішча паміж крышталіямі і газамі, таму мае некаторыя агульныя рысы з абодвума гэтымі станамі. Напрыклад, для вадкасцей, як і для крышталічных цел, характэрная наяўнасць пэўнага аб'ёму. Разам з тым вадкасці, як і газы, прымаюць форму пасудзіны, у якой знаходзяцца, і могуць бесперапынна пераходзіць у газападобны агрэгаты стан. Аднак вадкасці маюць шэраг уласцівых толькі ім асаблівасцей, найбольш характэрная з якіх — цякучасць.

Сярэдняя адлегласць паміж малекуламі рэчыва ў вадкім стане меншая (мал. 53, а), чым у газападобным (мал. 53, б). Яна роўная прыблізна аднаму-двум дэцыметрам малекулы, гэта значыць складае каля 0,5 нм. Таму шчыльнасць вадкасці прыблізна ў 10^3 разоў перавышае шчыльнасць газу. Уласцівасці вадкасцей залежаць як ад асаблівасцей руху малекул, так і ад сіл іх узаемадзеяння.

Доследным шляхам у вадкасцях выяўлены *блізкі парадак* у размяшчэнні часціц (мал. 53, *а*). У адрозненне ад цвёрдых крышталічных цел (мал. 53, *в*) у вадкасцях упарадкаванасць у размяшчэнні малекул захоўваецца толькі сярод найбліжэйшых суседзяў (на адлегласцях, роўных некалькім дыяметрам малекулы).

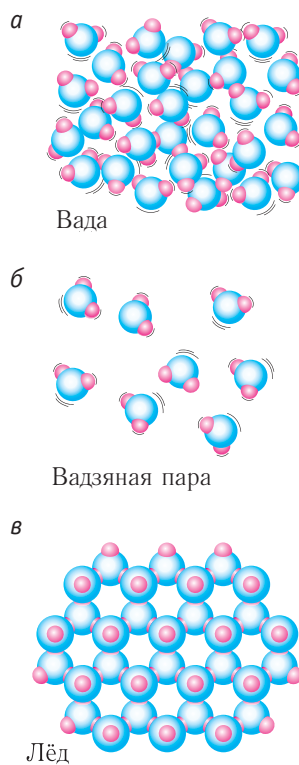
Малекулы вадкасці выконваюць бесперапынны хаатычны ваганні каля часовых становішчаў іх раўнавагі. Сярэдняя кінетычная энергія такіх ваганняў малекул вызначае тэмпературу вадкасці. Малекулы, якія атрымалі дадатковую энергію ў выніку сутыкненняў з іншымі малекуламі, могуць «пераскочыць» у новае (таксама часовае) становішча раўнавагі. Адлегласць гэтага становішча раўнавагі ад папярэдняга, як правіла, суадносіцца з памерамі саміх малекул. Такім чынам, малекулы павольна перамяшчаюцца ўнутры вадкасці, і каля пэўных месцаў знаходзяцца толькі на працягу некаторага прамежку часу Δt .

Блізкі парадак* у вадкасці пастаянна парушаецца ў выніку цеплага руху малекул і зноў утвараецца сіламі міжмалекулярнага ўзаемадзеяння. З-за адсутнасці далёкага парадку ў размяшчэнні часціц вадкасцям, за невялікім выключэннем, не ўласцівая анізатрапія, характэрная для крышталёў.

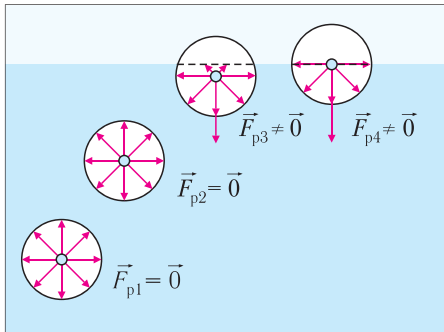
Такім чынам, уласцівасці вадкасцей абумоўлены адлегласцямі паміж малекуламі, сувымернымі з іх уласнымі памерамі, і магчымасцю малекул адносна свабодна перамяшчацца.

Адзначым, што сцвярджанне «вадкасць не мае ўласнай формы» не зусім карэктнае. Вадкасці, як і цвёрдыя целы, практычна несціскальныя, але яны цякучыя, таму іх форма залежыць ад формы адведзенай ім пасудзіны. На форму вадкасці ўплываюць знешнія сілы, напрыклад сіла цяжару сумесна з сіламі рэакцыі дна і сценак пасудзіны, у якой знаходзіцца вадкасць. Акрамя таго, дзеянне малекулярных сіл прыцяжэння прыводзіць да скарачэння свабоднай паверхні вадкасці.

* Наяўнасць у вадкасцях блізкага парадку ў размяшчэнні часціц з'яўляецца прычынай таго, што структуру вадкасцей называюць квазікрышталічнай (крышталепадобнай).



Мал. 53



Мал. 54

Малекулы, размешчаныя ў тонкім слоі паблізу паверхні, знаходзяцца ў асаблівых умовах з той прычыны, што ў паверхневым слоі вадкасці праяўляецца нескампенсаванасць малекулярных сіл прыцяжэння. На самай справе, любая малекула ўнутры вадкасці з усіх бакоў акружана суседнімі (аднолькавымі) малекуламі, дзеянне якіх узаемна кампенсуецца (мал. 54). Таму тут малекулярныя сілы прыцяжэння ўраўнаважваюцца, і рэзультуючая \vec{F}_{p1} гэтых сіл роўная нулю. Канцэнтраванасць малекул у паветры значна меншая, чым у вадкасці, таму рэзультуючая сіла прыцяжэння кожнай малекулы паверхневага слоя малекуламі газу меншая за рэзультуючую сілу прыцяжэння малекуламі вадкасці. Такім чынам, рэзультуючыя сілы прыцяжэння, якія дзейнічаюць на малекулы паверхневага слоя, накіраваны ўнутр вадкасці. Пад уздзеяннем гэтых сіл частка малекул паверхневага слоя ўцягваецца ўнутр, колькасць малекул на паверхні памяншаецца і плошча паверхні вадкасці скарачаецца да пэўнай велічыні. Мінімальную плошчу паверхні пры дадзеным аб'ёме маюць шарападобныя целы. Напрыклад, кроплі вады пры судакрананні зліваюцца ў адну, форма якой адрозніваецца ад сферычнай у выніку дзеяння сілы цяжару і сілы рэакцыі апоры.

Паверхневае нацяжэнне — прычына таго, што вада збіраецца ў кроплі (мал. 55), утвараюцца мыльныя бурбалкі (мал. 56), жук-вадамер рухаецца па паверхні вады (мал. 57), а ў стане бязважкасці любы аб'ём свабоднай вадкасці прымае сферычную форму.



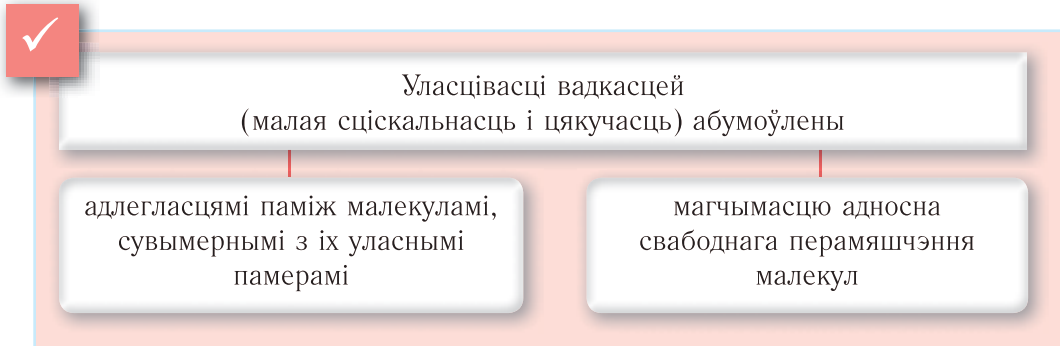
Мал. 55



Мал. 56



Мал. 57



1. Што ў будове вадкасцей абумоўлівае іх уласцівасці?
2. Якія асаблівасці руху малекул вадкасці?
3. Якія агульныя рысы і ў чым адрозненне ва ўласцівасцях вадкасцей і газаў?
4. Якія агульныя рысы і ў чым адрозненне ва ўласцівасцях вадкасцей і цвёрдых цел?
5. У вадкасцях часціцы выконваюць ваганні каля часовых становішчаў раўнавагі, узаемадзейнічаючы з суседнімі часціцамі. Праз пэўны прамежак часу часціца робіць «скачок» да іншага становішча раўнавагі. Якую ўласцівасць вадкасцей можна растлумачыць такім характарам руху іх часціц?



§ 8-1

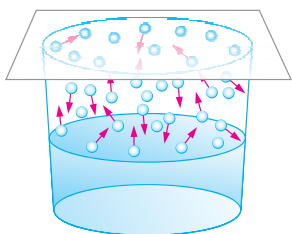
§ 8-2

§ 9. Выпарэнне і кандэнсацыя. Насычаная пара

Чаму ў шчыльна закрытай пасудзіне гарачая вада астывае павольней, чым у адкрытай? Чаму зімой на дрэвах часам з'яўляецца іней? Чым ідэальны газ адрозніваецца ад пары?

Выпарэнне і кандэнсацыя. З паўсядзённага досведу мы ведаем, што вадкасці, напрыклад вада, знаходзячыся ў адкрытых пасудзінах, з цягам часу пераходзяць у газападобны стан — выпарваюцца. Прычым хуткасць выпарэння залежыць ад роду вадкасці, яе тэмпературы, плошчы свабоднай паверхні і ад прытоку паветра. У выніку выпарэння вады з паверхні вадзяной абалонкі Зямлі (гідрасферы), з паверхні глебы і расліннага покрыва ў паветры заўсёды знаходзіцца вадзяная пара, якая можа кандэнсавацца, утвараць воблакі, вяртацца на зямлю ў выглядзе ападкаў. Працэсы выпарэння і кандэнсацыі распаўсюджаны ў прыродзе і тэхніцы, і вывучэнне іх асаблівасцей мае вялікае практычнае значэнне.

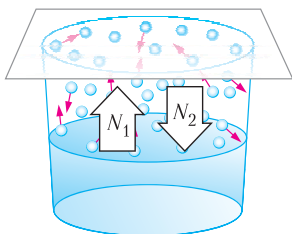
Разгледзім шчыльна закрытую пасудзіну, у якой вада займае ніжнюю частку, а астатняя прастора запоўнена парай. Малекулы ў вадзе і пары знаходзяцца ў бесперапынным руху і могуць як пераходзіць з вады ў пару, так і вяртацца з пары ў ваду. Такім чынам, у пасудзіне адначасова адбываюцца два процілеглы



Мал. 58

накіраваныя працэсы — пераход вады ў газападобны стан (*выпарэнне*) і пераход вадзяной пары ў вадкасць (*кандэнсацыя*) (мал. 58).

Пасля герметызацыі пасудзіны на працягу некаторага прамежку часу выпарэнне вадкасці пераважае над кандэнсацыяй яе пары. Калі пры гэтым з навакольнага асяроддзя да сістэмы «вадкасць — пара» не паступае энергія, то вадкасць ахалоджваецца. Гэта адбываецца ў выніку таго, што паверхневы слой вадкасці пакідаюць малекулы, якія валодаюць найбольшай скорасцю. Такія малекулы маюць і найбольшую кінетычную энергію цеплага руху, што дазваляе ім пераадолець сілы прыцяжэння, якія дзейнічаюць у паверхневым слоі вадкасці. Работа сіл прыцяжэння ўплывае такім чынам, што скорасць кожнай малекулы, якая вылятае з вадкасці, памяншаецца, а скорасць кожнай малекулы, якая ўлятае ў яе, наадварот, павялічваецца. Такое змяненне скорасці, а значыць, і кінетычнай энергіі малекул, якія перасякаюць паверхню вадкасці, дазваляе сістэме «вадкасць — пара» дасягнуць стану цеплай раўнавагі, пры якой тэмпературы вадкасці і яе пары аднолькавыя.



Мал. 59

Пры выпарэнні вадкасці ў добра закрытай посудзіне шчыльнасць пары над ёй павялічваецца, і адначасова расце колькасць малекул, што ўлятаюць назад у вадкасць. Канцэнтрацыя малекул пары ўзрастае да таго часу, пакуль колькасць N_1 малекул, якія пакідаюць вадкасць (мал. 59), не стане роўнай колькасці N_2 малекул, якія вяртаюцца ў яе за той самы прамежак часу: $N_1 = N_2$. Узровень вадкасці ў пасудзіне пры гэтым не змяняецца з цягам часу.

Паміж вадкасцю і яе парай устанаўліваецца стан *дынамічнай раўнавагі*. Ён будзе існаваць да таго часу, пакуль не зменіцца тэмпература ці аб'ём сістэмы.

Ад тэорыі да практыкі

1. Звычайна пры выпарэнні вадкасць ахалоджваецца. У якім выпадку магчыма выпарэнне вадкасці пры пастаяннай тэмпературы?
2. Калі пасудзіну з вадой шчыльна закрыць, то спачатку колькасць вады паменшыцца, а затым будзе заставацца пастаяннай. Чаму?

Насычаная пара.

Пару, якая знаходзіцца ў стане дынамічнай раўнавагі з вадкасцю, называюць **насычанай парай**.

Ціск такой пары называюць *ціскам насычанай пары*.

Насычаная пара валодае ўласцівасцямі, якія адрозніваюцца ад уласцівасцей ідэальнага газу.

Першае адрозненне заключаецца ў тым, што *ціск насычанай пары не залежыць ад яе аб'ёму пры пастаяннай тэмпературы*. Колькасць малекул, якія пераходзяць з вадкасці ў пару праз адзінкавую пляцоўку за адзінкавы прамежак часу, залежыць толькі ад саставу вадкасці і яе тэмпературы. Напрыклад, за прамежак часу $\Delta t = 1$ с са свабоднай паверхні вады, плошча якой $S = 1$ см², пры пакаёвай тэмпературы вылятае прыблізна $N = 10^{22}$ малекул.

Другая адметная ўласцівасць: пры павелічэнні тэмпературы ціск p_n насычанай пары ўзрастае значна хутчэй, чым ціск $p_{i.g}$ ідэальнага газу.

Ціск насычанай пары залежыць таксама і ад роду вадкасці. Чым меншыя сілы ўзаемадзеяння паміж малекуламі вадкасці, тым большая канцэнтрацыя малекул насычанай пары, а значыць, тым большыя яе ціск і шчыльнасць.

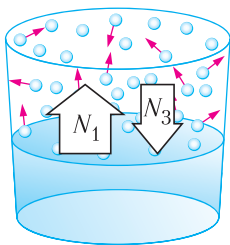
Пры змене аб'ёму насычанай пары яе маса таксама змяняецца. Таму законы ідэальнага газу для ізапрацэсаў можна прымяняць да пары толькі ў тым выпадку, калі яна далёкая ад насычэння і яе маса застаецца нязменнай. Аднак ураўненне Клапейрона — Мендзялеева $pV = \frac{m}{M}RT$ можна выкарыстоўваць для знаходжання любых параметраў (p , V , T , m , ρ) насычанай пары.

Ціск (шчыльнасць) насычанай пары пры дадзенай тэмпературы — *максімальны* ціск (шчыльнасць), які можа мець пара, што знаходзіцца ў стане дынамічнай раўнавагі з вадкасцю пры гэтай тэмпературы.

Ад тэорыі да практыкі

У пасудзіне знаходзіцца вадкасць і яе насычаная пара. Ці залежыць ціск насычанай пары ад: а) роду вадкасці; б) аб'ёму пасудзіны; в) тэмпературы вадкасці; г) плошчы свабоднай паверхні вадкасці?

Ненасычаная пара. Калі пасудзіну з вадой і яе насычанай парай адкрыць, то пара пачне выходзіць, і канцэнтрацыя яе малекул у пасудзіне паменшыцца. Гэта прывядзе да таго, што працэс выпарэння будзе пераважаць над працэсам кандэнсацыі (мал. 60), і ўзровень вадкасці ў пасудзіне панізіцца. Пры



Мал. 60

гэтым парушыцца дынамічная раўнавага ($N_1 > N_3$) паміж вадой і яе парай. Ціск (шчыльнасць) пары паменшыцца, і пара стане *ненасычанай*.

Ненасычаная пара — пара, ціск (шчыльнасць) якой меншы, чым ціск (шчыльнасць) насычанай пары пры той самай тэмпературы.

Працэс выпарэння вады з паверхні мораў і акіянаў, як правіла, пераважае над працэсам кандэнсацыі. Гэта азначае, што над морамі і акіянамі звычайна знаходзіцца ненасычаная вадзяная пара, якая ўзнімаецца ўверх, ахалоджваецца і кандэнсуецца, утвараючы воблакі і хмары.

Цікава ведаць

Паветраная абалонка Зямлі — атмасфера — з’яўляецца сумессю газаў. Атмасфернае паветра заўсёды змяшчае вадзяную пару, канцэнтрацыя малекул якой каля паверхні Зямлі вагаецца ад 3 % у тропіках да $2 \cdot 10^{-5}$ % у Антарктыдзе. З акіянаў, мораў і рэк, а таксама сушы за год выпараецца звыш $5 \cdot 10^{14}$ м³ вады — прыблізна столькі, як аб’ём вады ў Чорным моры. На выпарэнне затрачваецца каля паловы ўсёй энергіі сонечнага выпраменьвання, паглынутага паверхняй Зямлі. Пры кандэнсацыі пары ў атмасферу выдзяляецца такая колькасць цеплаты, якая раней спатрэбілася на выпарэнне вадкасці. Гэта прыводзіць да нагрывання атмасферы і прадукілае рэзкія ваганні тэмпературы. Пры перамяшчэнні вадзяной пары ў атмасферы на вялікія адлегласці адбываецца яе кандэнсацыя на ўчастках з больш нізкай тэмпературай, гэта значыць, што на адных участках паверхні і атмасферы Зямлі пераважаюць працэсы выпарэння вады, а на другіх — працэсы кандэнсацыі вадзяной пары.



Пару, якая знаходзіцца ў стане дынамічнай раўнавагі з вадкасцю, называюць насычанай

Ціск насычанай пары

прама прапарцыянальны

абсалютнай
тэмпературы T

канцэнтрацыі
малекул n

$$p = nkT$$

пры $T = \text{const}$
не залежыць
ад аб’ёму V



1. Якія агульныя рысы працэсаў выпарэння і кандэнсацыі? Чым яны адрозніваюцца?
2. Чаму пры выпарэнні вадкасць звычайна ахалоджаецца?
3. Якую пару называюць насычанай?
4. Якія фізічныя працэсы абумоўліваюць стан дынамічнай раўнавагі паміж вадкасцю і яе парай?
5. Якія ўласцівасці насычанай пары адрозніваюць яе ад ідэальнага газу?



§ 9-1

§ 10. Вільготнасць паветра

У штодзённых зводках надвор'я разам са значэннямі тэмпературы паветра і атмасфернага ціску, як правіла, называюць значэнне адноснай вільготнасці паветра. Чаму вільготнасць паветра ўплывае на жыццядзейнасць чалавека?

Вільготнасць паветра. Паветра, якое змяшчае вадзяную пару, называюць *вільготным паветрам*. Асноўнымі колькаснымі характарыстыкамі такога паветра з'яўляюцца яго *абсалютная* і *адносна вільготнасці*.

Абсалютная вільготнасць ρ_n паветра — фізічная велічыня, роўная шчыльнасці вадзяной пары, якая знаходзіцца ў паветры пры дадзеных умовах.

Звычайна абсалютную вільготнасць выражаюць у грамах на кубічны метр $\left(\frac{\text{г}}{\text{м}^3}\right)$.

Паколькі атмасфернае паветра ўяўляе з сябе сумесь розных газаў (азот, кісларод, вуглякіслы газ і інш.) і вадзяной пары, то атмасферны ціск вызначаецца сумай парцыяльных ціскаў кампанентаў сухога паветра і вадзяной пары. Выкарыстоўваючы ўраўненне Клапейрона — Мендзялеева, шчыльнасць пары можна вызначыць праз яе парцыяльны ціск p_n :

$$\rho_n = \frac{p_n M}{RT}, \quad (10.1)$$

дзе $M = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ — малярная маса вады; T — тэмпература паветра.

Ведаючы толькі шчыльнасць ρ_n пары, нельга меркаваць аб ступені вільготнасці паветра, бо пры адным і тым значэнні шчыльнасці пара можа быць як блізкай да насычэння, так і далёкай ад яго. Аказваецца, чым ніжэйшая тэмпература, тым бліжэй пара да насычэння. Менавіта ад гэтага залежыць

інтэнсіўнасць выпарэння вады і страта вільгаці жывымі арганізмамі. Вось чаму ўводзяць яшчэ адну характарыстыку вільготнасці паветра — адносную вільготнасць, якая паказвае, наколькі вадзяная пара пры дадзенай тэмпературы далёкая ад насычэння.

Адносная вільготнасць ϕ паветра — фізічная велічыня, роўная адносінам абсалютнай вільготнасці $\rho_{п}$ да шчыльнасці $\rho_{н}$ насычанай вадзяной пары пры дадзенай тэмпературы.

Звычайна адносную вільготнасць выражаюць у працэнтах:

$$\phi = \frac{\rho_{п}}{\rho_{н}} \cdot 100 \%. \quad (10.2)$$

Чым ніжэйшая адносная вільготнасць паветра, тым больш інтэнсіўна выпарваецца вада. Пры адноснай вільготнасці паветра $\phi = 100 \%$ вадзяная пара робіцца насычанай і тады знаходзіцца ў дынамічнай раўнавазе са сваёй вадкасцю. У гэтым выпадку працэсы выпарэння і кандэнсацыі ідуць з аднолькавай хуткасцю.

Паколькі шчыльнасць пары і яе парцыяльны ціск звязаны суадносінамі (10.1), то адносную вільготнасць можна вызначыць як адносіны парцыяльнага ціску $p_{п}$ вадзяной пары, якая знаходзіцца ў паветры пры дадзенай тэмпературы, да ціску $p_{н}$ насычанай пары пры той самай тэмпературы:

$$\phi = \frac{p_{п}}{p_{н}} \cdot 100 \%. \quad (10.3)$$

Такім чынам, адносная вільготнасць залежыць не толькі ад абсалютнай вільготнасці, але і ад тэмпературы паветра.

Ад тэорыі да практыкі

Дакажыце, што адносная вільготнасць паветра рэзка памяншаецца пры ўзрастанні тэмпературы.

Падказка. Выкарыстайце формулы $p = nkT$ і $\phi = \frac{p_{п}}{p_{н}} \cdot 100 \%$.

Значэнні ціску $p_{н}$ і шчыльнасці $\rho_{н}$ насычанай вадзяной пары пры розных тэмпературах прыведзены ў табліцы 1.

Табліца 1 — Ціск і шчыльнасць насычанай вадзяной пары

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{ кПа}$	$\rho_{\text{н}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{ кПа}$	$\rho_{\text{н}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$
-20	0,103	0,85	8	1,06	8,3
-18	0,125	1,05	10	1,228	9,4
-16	0,151	1,27	12	1,402	10,7
-14	0,181	1,51	14	1,598	12,1
-12	0,217	1,80	16	1,817	13,6
-10	0,260	2,14	18	2,063	15,4
-8	0,337	2,54	20	2,338	17,3
-6	0,368	2,99	22	2,643	19,4
-4	0,437	3,51	24	2,984	21,8
-2	0,517	4,13	26	3,361	24,4
0	0,611	4,84	28	3,780	27,2
2	0,705	5,60	30	4,242	30,3
4	0,813	6,40	40	7,37	51,2
6	0,934	7,3	50	12,3	83,0

Ад тэорыі да практыкі

1. Вадзяная пара, якая знаходзіцца ў паветры, становіцца насычанай пры значэнні тэмпературы $t_1 = 6,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Якой будзе адносная вільготнасць паветра, калі тэмпература падымецца да $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_3 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_4 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_5 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_6 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$? Зрабіце выснову, як змяняецца адносная вільготнасць паветра пры павелічэнні тэмпературы.

2. Як правіла, мы адчуваем сябе камфортна, калі парцыяльны ціск вадзяной пары пры пакаёвай тэмпературы ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) складае прыкладна $p_{\text{н}} = 1,1 \text{ кПа}$. Якая пры гэтым адносная вільготнасць паветра?

Калі парцыяльны ціск вадзяной пары ў паветры роўны ціску насычанай пары пры той самай тэмпературы, гавораць, што паветра насычана вадзяной парай. Калі ж шчыльнасць вадзяной пары перавышае шчыльнасць насычанай пары, то пару ў паветры лічаць *перанасычанай*. Такі стан з'яўляецца няўстойлівым і завяршаецца кандэнсацыяй.

Ад тэорыі да практыкі

Тэмпература паветра $t = 16$ °С. Выкарыстоўваючы табліцу «Ціск і шчыльнасць насычанай вадзяной пары», пакажыце, якой будзе вадзяная пара, што знаходзіцца ў паветры (насычаная, ненасычаная, перанасычаная), калі ў яе: а) ціск дасягнуў значэння $p_n = 1,819$ кПа; б) шчыльнасць $\rho_n = 13,0 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$.

Ціск насычанай пары памяншаецца пры паніжэнні тэмпературы (гл. табл. 1). З формулы (10.3) вынікае, што пры адным і тым ціску p_n вадзяной пары адносная вільготнасць тым вышэйшая, чым ніжэйшая тэмпература, і пры некаторым яе значэнні можа стаць роўнай 100 %.

Тэмпературу, пры якой вадзяная пара ў выніку ізабарнага ахаладжэння робіцца насычанай, называюць **пунктам расы**.

Пры паніжэнні тэмпературы ніжэй пункта расы адбываецца кандэнсацыя вадзяной пары. Напрыклад, днём тэмпература паветра была $t_d = 26$ °С, а шчыльнасць вадзяной пары $\rho_n = 24,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. Ноччу тэмпература панізілася да $t_n = 16$ °С. Пры гэтай тэмпературы шчыльнасць насычанай вадзяной пары $\rho_n = 13,6 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. Значыць, лішак пары скандэнсаваўся і выпаў у выглядзе расы. Гэты працэс з'яўляецца прычынай узнікнення туману (у паветры заўсёды ёсць пылінкі, якія з'яўляюцца цэнтрамі кандэнсацыі), воблакаў і дажджу. У тэхніцы кандэнсацыя звычайна адбываецца на паверхнях, якія ахаладжваюцца.

Калі адносная вільготнасць меншая за 100 %, то тэмпература, якая адпавядае пункту расы, заўсёды ніжэйшая за тэмпературу паветра, прычым тым ніжэйшая, чым меншая адносная вільготнасць.

Ад тэорыі да практыкі

Якім павінен быць пункт расы, каб на дрэвах з'явіўся іней?

Прыборы для вымярэння вільготнасці. Адносную вільготнасць паветра звычайна вымяраюць псіхрометрам, які складаецца з двух тэрмометраў — сухога і вільготнага (мал. 61). Сухі тэрмометр паказвае тэмпературу паветра.

Рэзервуар вільготнага тэрмометра абгорнуты тканінай, якую змочваюць вадой. Вада з тканіны выпарваецца, у выніку чаго тэрмометр ахалоджваецца. Чым меншая адносная вільготнасць паветра, тым больш інтэнсіўна выпарваецца вада і тым мацней ахалоджваецца вільготны тэрмометр. І наадварот — пры вялікай адноснай вільготнасці паветра вільготны тэрмометр ахалоджваецца нязначна.

Пры 100 %-най адноснай вільготнасці вада і яе пара знаходзяцца ў дынамічнай раўнавазе, і паказанні абодвух тэрмометраў супадаюць.

Ведаючы паказанні сухога і вільготнага тэрмометраў, адносную вільготнасць паветра вызначаюць па спецыяльнай табліцы, якая называецца псіхаметрычнай (табл. 2).



Мал. 61

Табліца 2 — Псіхаметрычная табліца

Паказанні сухога тэрмоме- тра, °С	Рознасць паказанняў сухога і вільготнага тэрмометраў, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Адносная вільготнасць, %										
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Ад тэорыі да практыкі

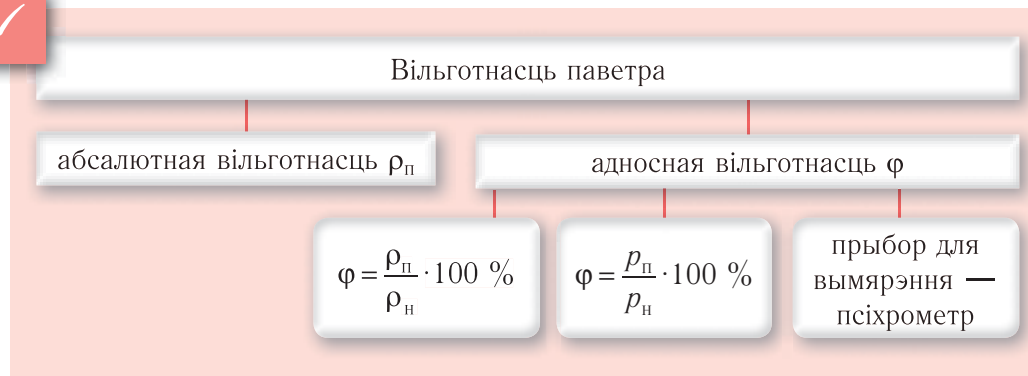
Як зменіцца рознасць паказанняў тэрмометраў псіхromетра ў кабінце фізікі пасля вільготнага прыбірання?

Жывыя арганізмы і расліны вельмі адчувальныя да адноснай вільготнасці паветра. Найбольш спрыяльная для чалавека адносная вільготнасць пры тэмпературы паветра 20–25 °С складае 40–60 %.

Пры высокай вільготнасці, асабліва ў спякотны дзень, выпарэнне вільгаці з паверхні скуры адбываецца з цяжкасцю, што вядзе да парушэння надзвычай важных біялагічных механізмаў рэгулявання тэмпературы цела.

Пры нізкай вільготнасці адбываецца інтэнсіўнае выпарэнне з паверхні цела і высыханне слізистой абалонкі носа, гартані, лёгкіх, што пагаршае самаадчуванне. Нізкая вільготнасць спрыяе развіццю патагенных мікраарганізмаў, што таксама небяспечна для чалавека. У выпадку нізкай вільготнасці паветра інтэнсіўнасць выпарэння з лістоў раслін павялічваецца, і пры малым запасе вільгаці ў глебе яны хутка вянуць і засыхаюць.

Вільготнасць паветра трэба ўлічваць і ў розных тэхналагічных працэсах, такіх, напрыклад, як сушка і захоўванне гатовых вырабаў. Сталёвыя вырабы пры высокай вільготнасці хутка ржавеюць. Захаванне твораў мастацтва і кніг таксама патрабуе падтрымання аптымальнай вільготнасці паветра. Вялікае значэнне мае вільготнасць у метэаралогіі для прадказання надвор'я. Калі паветра каля паверхні Зямлі ахалоджваецца ніжэй пункта расы, то могуць утварацца туман, роса або іней.



1. Што называюць абсалютнай і адноснай вільготнасцямі паветра? У якіх адзінках іх вымяраюць?
2. Што называюць пунктам расы?

3. Як можна знайсці адносную вільготнасць паветра, калі вядомыя яго тэмпература і пункт росы?
4. Як змяняюцца абсалютная і адносная вільготнасці паветра пры яго награванні?
5. На якіх фізічных з'явах заснавана дзеянне псіхметра?
6. Ці можна, выкарыстоўваючы псіхметр, вызначыць адносную вільготнасць паветра, тэмпература якога ніжэй $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Тэмпература паветра ў пакоі $t_1 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, а яго адносная вільготнасць $\varphi_1 = 45\text{ }\%$. На дварэ тэмпература і адносная вільготнасць паветра $t_2 = 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\varphi_2 = 80\text{ }\%$ адпаведна. Якім будзе напрамак руху вадзяной пары, калі адкрыць фортку: з двара ў пакой ці з пакоя на двор?

Дадзена:
 $t_1 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\varphi_1 = 45\text{ }\%$
 $t_2 = 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\varphi_2 = 80\text{ }\%$

Рашэнне. Пры тэмпературы паветра $t_1 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ціск насычанай пары $p_{н1} = 2,984\text{ кПа}$, а пры тэмпературы $t_2 = 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $p_{н2} = 0,705\text{ кПа}$ (гл. табліцу 1 § 10). Тады ціск вадзяной пары ў пакоі

p_1 — ?
 p_2 — ?

$$p_1 = \frac{\varphi_1 p_{н1}}{100\text{ }\%} = \frac{45\text{ }\% \cdot 2,984\text{ кПа}}{100\text{ }\%} = 1,34\text{ кПа},$$

а на дварэ

$$p_2 = \frac{\varphi_2 p_{н2}}{100\text{ }\%} = \frac{80\text{ }\% \cdot 0,705\text{ кПа}}{100\text{ }\%} = 0,564\text{ кПа}.$$

$p_2 < p_1$, такім чынам, пар выходзіць з пакоя на двор.

Адказ: пар выходзіць з пакоя на двор.

Прыклад 2. Увечары пры тэмпературы $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ адносная вільготнасць паветра $\varphi_1 = 60\text{ }\%$. Ці выпадзе роса, калі ноччу тэмпература панізіцца да $t_2 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Дадзена:
 $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $t_2 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\varphi_1 = 60\text{ }\%$

Рашэнне. Для таго каб даведацца, ці выпадзе роса пры паніжэнні тэмпературы паветра да $t_2 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, неабходна параўнаць шчыльнасць (парцыяльны ціск) насычанай пары пры гэтай тэмпературы са шчыльнасцю (парцыяльным ціскам) пары пры тэмпературы $t_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ці выпадзе роса?

Пры тэмпературы $t_2 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ шчыльнасць насычанай вадзяной пары $\rho_{н2} = 10,7 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (гл. табліцу 1 § 10). Шчыльнасць вадзяной пары, якая знаходзіцца ў паветры пры тэмпературы $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, можна вызначыць, выкарыстаўшы формулу

$$\varphi = \frac{\rho_1}{\rho_{н1}} \cdot 100 \%,$$

дзе $\rho_{н1} = 17,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (гл. табліцу 1 § 10):

$$\rho_1 = \frac{\varphi \rho_{н1}}{100 \%} = \frac{60 \% \cdot 17,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}}{100 \%} = 10,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Паколькі $\rho_1 < \rho_{н2}$ ($10,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} < 10,7 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$), то наяўнай у паветры колькасці вадзяной пары недастаткова для насычэння, роса не выпадае.

Адказ: роса не выпадае.

Практыкаванне 6

1. Пры тэмпературы $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ парцыяльны ціск вадзяной пары ў паветры $p_{п} = 1,2 \text{ кПа}$. Вызначце адносную вільготнасць паветра.

2. Вызначце адносную вільготнасць паветра ў памяшканні ўмяшчальнасцю $V = 200 \text{ м}^3$, калі маса вадзяной пары ў памяшканні $m = 2,4 \text{ кг}$, а тэмпература паветра $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Пры тэмпературы $t = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ адносная вільготнасць паветра $\varphi = 61 \%$. Пры якой тэмпературы пачне выпадаць роса?

4. Пры тэмпературы $t = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ адносная вільготнасць паветра $\varphi = 50 \%$. Вызначце масу росы, якая выпала з паветра аб'ёмам $V = 1,0 \text{ км}^3$, калі яго тэмпература знізілася на $T_1 - T_2 = 16 \text{ К}$.

5. Вызначце адносную і абсалютную вільготнасці паветра, калі сухі і вільготны тэрмометры псіхметра паказваюць $t_c = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ і $t_b = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ адпаведна.

6. Пры тэмпературы $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ адносная вільготнасць паветра $\varphi = 44 \%$. Вызначце паказанні вільготнага тэрмометра псіхметра.

РАЗДЗЕЛ 2

АСНОВЫ ТЭРМАДЫНАМІКІ

§ 11. Тэрмадынамічная сістэма. Унутраная энергія. Унутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу

Поўную энергію фізічнай сістэмы можна выразіць як алгебраічную суму яе механічнай энергіі і ўнутраных энергій цел, якія ўтвараюць сістэму. Змяніэнне механічнай энергіі сістэмы ў шэрагу выпадкаў адбываецца пры самаадвольным пераходзе яе часткі ва ўнутраную энергію цел сістэмы. Так, напрыклад, рэжучыя інструменты прыкметна награвваюцца пры завострыванні. Падчас бегу канькабежца пад канькамі растае лёд, што забяспечвае добрае слізганне. У гэтых прыкладах целы пры трэнні награвваюцца, і інтэнсіўнасць цеплавога руху іх малекул узрасце, што прыводзіць да павелічэння ўнутранай энергіі цел. Як жа вызначыць унутраную энергію тэрмадынамічнай сістэмы? І што разумеюць пад тэрмадынамічнай сістэмай?

Тэрмадынамічная сістэма. У тэрмадынаміцы фізічныя целы і іх мадэлі называюць *тэрмадынамічнымі сістэмамі*. Для іх апісання выкарыстоўваюць параметры сістэмы, такія як ціск, аб'ём, тэмпература (макрапараметры), а не фізічныя характарыстыкі малекул (мікрапараметры). Макрапараметры можна непасрэдна вымераць з дапамогай прыбораў або выразіць праз іншыя велічыні, якія можна вымераць доследным шляхам. Мы разгледзім найбольш простыя тэрмадынамічныя сістэмы, стан якіх вызначаюць, выкарыстоўваючы толькі ціск, аб'ём і тэмпературу.

Целы, якія ўтвараюць тэрмадынамічную сістэму, могуць абменьвацца з навакольным асяроддзем энергіяй, а таксама рэчывам. Калі гэтага не адбываецца, то тэрмадынамічную сістэму называюць *замкнутай* або *ізаляванай*.



Ад тэорыі да практыкі

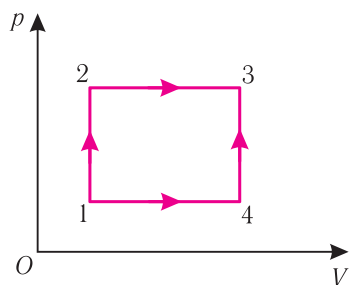
У адным выпадку газ знаходзіцца ў герметычна закрытай цепланепра-нікальнай пасудзіне, а ў другім — у шклянёй колбе. У якім выпадку газ як тэрмадынамічная сістэма з'яўляецца ізаляваным?



Унутраная энергія. Разглядаючы поўную энергію макраскапічнага цела, неабходна ўлічваць не толькі яго механічную энергію (кінетычную і патэнцыяльную), але таксама і энергію, якая знаходзіцца ўнутры самога цела, — *унутраную энергію*.

Унутраная энергія макраскапічнага цела — алгебраічная сума кінетычнай энергіі цеплавога руху ўсіх часціц, якія ўтвараюць цела, і патэнцыяльнай энергіі іх узаемадзеяння.

Унутраная энергія любой тэрмадынамічнай сістэмы складаецца з унутраных энергій цел, што ўваходзяць у дадзеную сістэму, і з'яўляецца адной з асноўных фізічных велічынь, якія выкарыстоўваюцца ў тэрмадынаміцы.



Мал. 62

Тэрмадынаміку цікавіць не само значэнне ўнутранай энергіі сістэмы, а яе змяненне. Таму звычайна прымаюць пад увагу толькі тыя складнікі ўнутранай энергіі, якія змяняюцца ў разгляданых працэсах.

Разгледзім пераход некаторай масы ідэальнага газу са стану 1, у якім яго ўнутраная энергія U_1 , у стан 3, у якім яго ўнутраная энергія U_3 (мал. 62). Змяненне станаў можна ажыццявіць або пры ізахорным нагрavanні, а затым ізабарным расшырэнні (працэс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$), або пры ізабарным расшырэнні, а затым ізахорным нагрavanні (працэс $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$). Аднак прырашчэнне* ўнутранай энергіі газу ў абодвух выпадках аднолькавае:

$$\Delta U_{123} = \Delta U_{143} = U_3 - U_1.$$

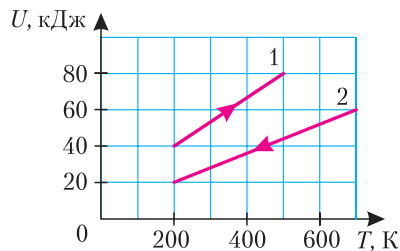
Унутраная энергія залежыць ад канкрэтнага стану сістэмы. Гэта азначае, што змяненне ўнутранай энергіі пры пераходзе тэрмадынамічнай сістэмы з аднаго стану ў другі залежыць толькі ад значэнняў параметраў гэтых станаў і не залежыць ад працэсу пераходу.

* Δ — прырашчэнне фізічнай велічыні, гэта значыць рознасць паміж яе канчатковым і пачатковым значэннямі;

— Δ — змяншэнне велічыні, гэта значыць рознасць паміж яе пачатковым і канчатковым значэннямі.

Ад тэорыі да практыкі

На малюнку 63 прыведзены графікі 1 і 2 залежнасці ўнутранай энергіі двух ідэальных газаў пэўнай масы ад абсалютнай тэмпературы. Ці аднолькавыя прырашчэнні ўнутранай энергіі газаў?



Мал. 63

Унутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу. Вызначым унутраную энергію ідэальнага аднаатамнага газу, гэта значыць газу, які складаецца з асобных атамаў. Напрыклад, аднаатамнымі з'яўляюцца інертныя газы — гелій, неон, аргон і інш.

З азначэння паняцця «ідэальны газ» вынікае, што яго ўнутраная энергія з'яўляецца сумай кінетычных энергій хаатычнага руху ўсіх атамаў або малекул (патэнцыяльная энергія ўзаемадзеяння паміж часціцамі адсутнічае). Такім чынам, унутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу роўная здабытку сярэдняй кінетычнай энергіі $\langle E_k \rangle$ цэплагава руху часціц і іх колькасці N , гэта значыць $U = N \langle E_k \rangle$. Паколькі

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

дзе m — маса газу, а $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$, то

$$U = \frac{m}{M} N_A \cdot \frac{3}{2} kT.$$

З улікам таго, што здабытак пастаяннай Больцмана і пастаяннай Авагадра $kN_A = R$, дзе R — універсальная газавая пастаянная, атрымаем:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT, \quad (11.1)$$

або

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

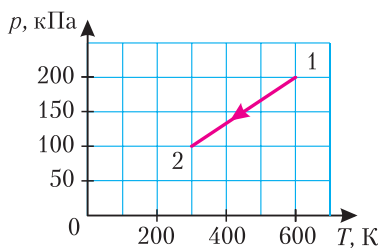
З формулы (11.1) вынікае, што ўнутраная энергія дадзенай масы ідэальнага аднаатамнага газу прапарцыянальная яго абсалютнай тэмпературы. Яна не залежыць ад іншых макраскапічных параметраў стану — ціску і аб'ёму. Такім чынам, змяненне ўнутранай энергіі дадзенай масы аднаатамнага ідэальнага газу адбываецца толькі пры змене яго тэмпературы:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Ад тэорыі да практыкі

1. Паветра пры пакаёвай тэмпературы і нармальным атмасфэрным ціску можна апісаць мадэллю ідэальнага газу. Як паказваюць разлікі, унутраная энергія двухатамнага газу большая за ўнутраную энергію аднолькавай колькасці аднаатамнага газу, які знаходзіцца пры такой жа тэмпературы, у

$\alpha = \frac{U_{\text{двухат}}}{U_{\text{аднаат}}} = \frac{5}{3}$ раз. Улічыўшы, што паветра складаецца ў асноўным з двухатамных малекул, ацаніце ўнутраную энергію паветра ў пакоі, даўжыня якога $a = 3,0$ м, шырыня $b = 3,2$ м, вышыня $c = 2,5$ м.



Мал. 64

Параўнайце атрыманы вынік з кінетычнай энергіяй грузавага аўтамабіля масай $m = 10$ т, што рухаецца са скорасцю, модуль якой $v = 54 \frac{\text{км}}{\text{г}}$. Зрабіце выснову.

2. Ідэальны аднаатамны газ, колькасць рэчыва якога $\nu = 10,0$ моль, перавялі са стану 1 у стан 2 (мал. 64). Як і на колькі змянілася ўнутраная энергія газу?

Пры вызначэнні ўнутранай энергіі рэальных газаў, вадкасцей і цвёрдых цел неабходна ўлічваць патэнцыяльную энергію ўзаемадзеяння часціц, якая залежыць ад адлегласці паміж імі. Таму ў агульным выпадку ўнутраная энергія макраскапічных цел залежыць не толькі ад абсалютнай тэмпературы, але і ад аб'ёму.

Змяніць унутраную энергію тэрмадынамічнай сістэмы можна двума спосабамі: выкарыстоўваючы цеплаабмен і выконваючы работу. Працэс цеплаабмену і выкананне работы характарызуюць адпаведна фізічнымі велічынямі — колькасцю цеплаты Q і работай A , якія з'яўляюцца мерамі змены ўнутранай энергіі сістэмы.



Фізічныя цэлы і іх мадэлі ў тэрмадынаміцы называюць тэрмадынамічнымі сістэмамі. Тэрмадынамічную сістэму характарызуюць наборам макрапараметраў, якія вызначаюць яе стан

Унутраная энергія макраскапічнага цэла — алгебраічная сума кінетычнай энергіі цеплавога руху ўсіх часціц, якія ўтвараюць цэла, і патэнцыяльнай энергіі іх узаемадзеяння

Змяненне ўнутранай энергіі пры пераходзе тэрмадынамічнай сістэмы з аднаго стану ў другі залежыць толькі ад значэнняў параметраў гэтых станаў і не залежыць ад працэсу пераходу

Унутраная энергія дадзенай масы ідэальнага аднаатамнага газу залежыць толькі ад тэмпературы

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

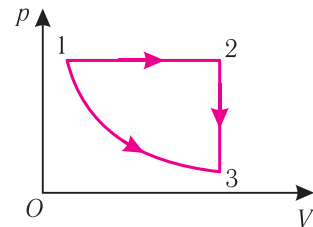
Спосабы змянення ўнутранай энергіі

выкананне работы

цеплаабмен



1. Што называюць тэрмадынамічнай сістэмай?
2. Што разумеюць пад унутранай энергіяй макраскапічнага цэла? тэрмадынамічнай сістэмы?
3. Што ўяўляе з сябе ўнутраная энергія ідэальнага газу? Ад чаго залежыць яе значэнне?
4. Ідэальны газ пераводзяць са стану 1 у стан 3 двума рознымі спосабамі: ізатэрмічна ($1 \rightarrow 3$) і ажыццяўляючы спачатку ізабарнае расшырэнне, а затым ізохорнае ахалджэнне ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$) (мал. 65). Ці залежыць прырашчэнне ўнутранай энергіі газу ад спосабу яго пераходу са стану 1 у стан 3?
5. Ад якіх параметраў залежаць значэнні ўнутранай энергіі ідэальнага газу і ўнутранай энергіі рэальных газаў?



Мал. 65

Прыклад рашэння задачы

Пры ізабарным ахаладжэнні ўнутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу змянілася на $\Delta U = -6,0 \cdot 10^2$ Дж. Вызначце ціск газу, калі яго аб'ём змяніўся на $\Delta V = -1,0 \cdot 10^{-2}$ см³.

Дадзена:

$$\Delta U = -6,0 \cdot 10^2 \text{ Дж}$$

$$\Delta V = -1,0 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3 =$$

$$= -1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$p = ?$

Рашэнне. Прырашчэнне ўнутранай энергіі некотрай колькасці ідэальнага аднаатамнага газу

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T. \quad (1)$$

Выкарыстоўваючы ўраўненне Клапейрона — Мендзялеева, можна ажыццявіць замену:

$$p \Delta V = \nu R \Delta T. \quad (2)$$

Рашаючы сумесна ўраўненні (1) і (2), атрымаем: $p = \frac{2\Delta U}{3\Delta V}$.

$$p = \frac{2 \cdot (-6,0 \cdot 10^2 \text{ Дж})}{3 \cdot (-1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3)} = 4,0 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Адказ: $p = 4,0 \cdot 10^6$ Па.

Практыкаванне 7

1. Вызначце ўнутраную энергію аргону масай $m = 4,0$ г пры тэмпературы $t = 27$ °С.

2. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі ідэальнага аднаатамнага газу, колькасць рэчыва якога $\nu = 2,0$ моль, пры яго награванні на $\Delta t = 20$ °С.

3. Ідэальны аднаатамны газ займае аб'ём $V = 4,0$ л, яго ціск $p = 0,30$ МПа. Вызначце ўнутраную энергію газу.

4. Пры змене стану ідэальнага аднаатамнага газу яго аб'ём павялічыўся ў $\alpha = 2,4$ раза, а ціск зменшыўся ў $\beta = 1,2$ раза. Вызначце адносіны значэнняў ўнутранай энергіі газу ў канчатковым і пачатковым станах.

5. Маса гелію $m = 2,0$ кг, яго ціск $p = 60$ кПа. Вызначце ўнутраную энергію гелію, калі яго шчыльнасць $\rho = 0,20 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

6. Пры тэмпературы $t = 27$ °С унутраная энергія аднаатамнага ідэальнага газу $U = 1,2$ Дж. Вызначце колькасць атамаў газу.

§ 12. Работа ў тэрмадынаміцы

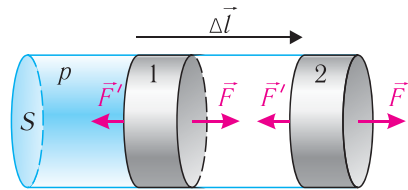
У 9-м класе вы даведаліся, што перадача энергіі шляхам выканання работы адбываецца ў працэсе сілавога ўзаемадзеяння цел. Гэта значыць работа, выкананая над разгляданым целам, ёсць не што іншае, як работа сіл, прыкладзеных да гэтага цела з боку ўсіх астатніх (знешніх) цел, з якімі яно ўзаемадзейнічае. Работа, выкананая над целам, можа непасрэдна змяніць любы від энергіі гэтага цела, напрыклад унутраную энергію, таму работу сілы разглядаюць як меру змены энергіі фізічнай сістэмы.

Работа ў тэрмадынаміцы. Адным са спосабаў змянення ўнутранай энергіі тэрмадынамічнай сістэмы з'яўляецца выкананне работы. Гэты спосаб характарызуецца перадачай энергіі ў працэсе механічнага ўзаемадзеяння цел. Пры гэтым механічная энергія аднаго цела пераходзіць ва ўнутраную энергію другога цела ці, наадварот, змяншэнне ўнутранай энергіі аднаго цела вядзе да павелічэння механічнай энергіі другога цела.

Такім чынам, падчас выканання работы адбываецца ператварэнне энергіі з адной формы ў другую.

Паколькі для апісання тэрмадынамічных сістэм выкарыстоўваюць макрапараметры (ціск, аб'ём, тэмпература), то работу ў тэрмадынаміцы неабходна выражаць праз гэтыя параметры.

Разгледзім газ у цыліндры, закрытым поршнем, плошча якога S (мал. 66). Ціск газу ў цыліндры p . У выніку ізабарнага расшырэння газу поршань перамясціўся са становішча 1 у становішча 2 на адлегласць Δl . Модуль сілы ціску газу на поршань $F = pS$. Гэтая сіла выканала работу па перамяшчэнні поршня, роўную



Мал. 66

$$A_{12} = F\Delta l \cos\alpha,$$

дзе α — вугал паміж напрамкамі сілы \vec{F} і перамяшчэння поршня $\vec{\Delta l}$.

У дадзеным прыкладзе $\alpha = 0$ і $\cos\alpha = 1$, то

$$A_{12} = pS\Delta l.$$

Здабытак $S\Delta l$ вызначае змяненне аб'ёму $\Delta V = V_2 - V_1$, дзе V_1 — пачатковы аб'ём газу; V_2 — аб'ём газу ў канчатковым стане (гл. мал. 66).

Такім чынам, работа сілы ціску газу пры яго ізобарным расшырэнні:

$$A_{12} = p\Delta V = p(V_2 - V_1). \quad (12.1)$$

Ціск p газу — велічыня дадатная, таму з формулы (12.1) вынікае, што $A_{12} > 0$.

Пры ізобарным расшырэнні газу са стану 1 у стан 2 работа сілы \vec{F}' (гл. мал. 66):

$$A'_{12} = F' \Delta l \cos \beta,$$

дзе F' — модуль сілы, якая дзейнічае на газ з боку поршня (знешняя сіла); β — вугал паміж напрамкамі сілы \vec{F}' і перамяшчэння $\Delta \vec{l}$ поршня.

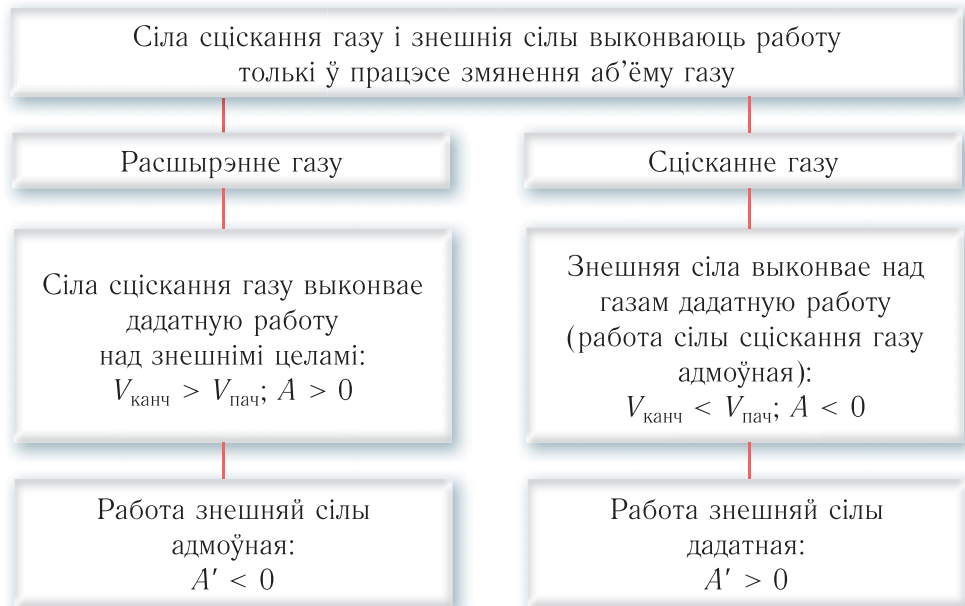
Перамяшчэнне $\Delta \vec{l}$ поршня адно і тое ж, а сіла ціску \vec{F} газу на поршань і сіла ціску \vec{F}' поршня на газ — сілы, якія падпарадкоўваюцца трэцяму закону Нютана:

$$\vec{F} = -\vec{F}'.$$

Значыць, работа A'_{12} і работа A_{12} адрозніваюцца толькі знакам ($\cos \beta = \cos 180^\circ = -1$):

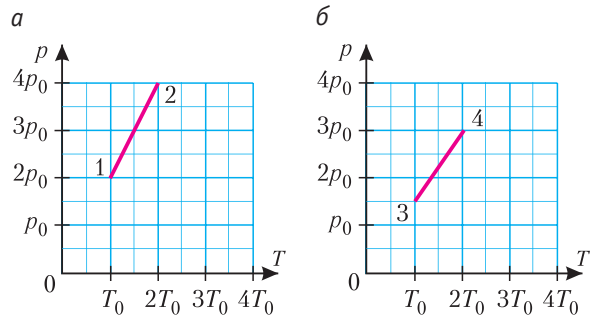
$$A'_{12} = -A_{12} = -p\Delta V.$$

Такім чынам, можна зрабіць наступныя высновы.



Ад тэорыі да практыкі

На малюнку 67, *а* паказаны працэс пераходу ідэальнага газу пэўнай масы са стану 1 у стан 2, а на малюнку 67, *б* — працэс пераходу гэтага ж газу са стану 3 у стан 4. Параўнайце работы, выкананыя сілай ціску газу ў абодвух працэсах, і змены значэнняў яго ўнутранай энергіі.



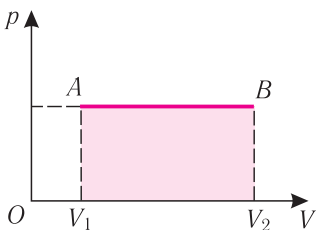
Мал. 67

Геаметрычнае тлумачэнне работы. Работу газу можна вызначыць з дапамогай графіка. Пабудуем графік залежнасці ціску газу ад яго аб'ёму пры $p = \text{const}$ (мал. 68). Калі працэс пераходу газу з пачатковага стану ў канчатковы з'яўляецца ізабарным (AB — ізабара), то работа сілы ціску газу лікава роўная плошчы прамавугольніка V_1ABV_2 .

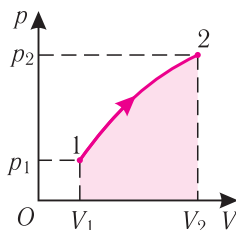
Калі працэс пераходу газу з пачатковага стану ў канчатковы не з'яўляецца ізабарным (мал. 69), то работа сілы ціску газу пры змене аб'ёму ад V_1 да V_2 лікава роўная плошчы фігуры, абмежаванай графікам працэсу (крывая 1–2), воссю OV і прамымі, якія адпавядаюць значэнням аб'ёмаў V_1 і V_2 .



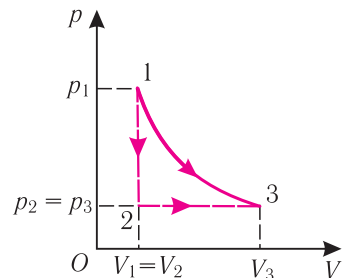
Работу газу вызначаюць не толькі пачатковы і канчатковы станы сістэмы, але і від працэсу. Напрыклад, газ са стану 1 можна перавесці ў стан 3 або ў выніку ізатэрмічнага расшырэння (мал. 70), або спачатку ізахорна панізіўшы яго ціск да значэння p_2 , а затым ізабарна павялічыўшы яго аб'ём да значэння V_3 . У першым выпадку работа газу большая, чым у другім.



Мал. 68



Мал. 69



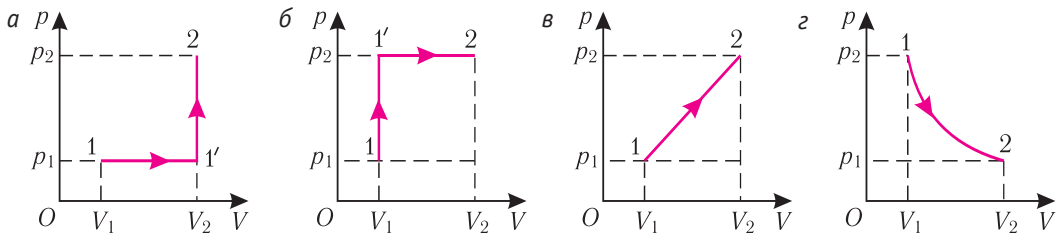
Мал. 70

Такім чынам, работа, выкананая тэрмадынамічнай сістэмай пры пераходзе з аднаго стану ў другі, залежыць не толькі ад пачатковага і канчатковага станаў сістэмы, але і ад віду працэсу.

Ад тэорыі да практыкі

На якім з графікаў, прыведзеных на малюнках 71, а–г, сіла ціску газу выконвае ў працэсе пераходу са стану 1 у стан 2:

а) найбольшую работу; б) найменшую работу?

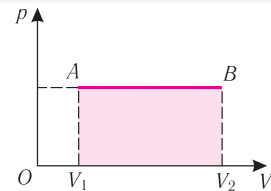


Мал. 71



Работу газу пры ізабарным працэсе выражаюць праз макраскапічныя параметры тэрмадынамічнай сістэмы: $A = p\Delta V$

Работа газу лікава роўная плошчы фігуры, абмежаванай графікам залежнасці ціску ад аб'ёму, восью OV і прамымі, якія адпавядаюць значэнням аб'ёмаў V_1 і V_2



Работа, выкананая сістэмай пры пераходзе з аднаго стану ў другі, залежыць не толькі ад пачатковага і канчатковага станаў, але і ад віду працэсу

Расшырэнне ідэальнага газу

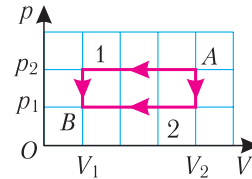
Работа сілы ціску газу дадатная: $A > 0$;
 работа знешняй сілы адмоўная: $A' < 0$

Сцісканне ідэальнага газу

Работа сілы ціску газу адмоўная: $A < 0$;
 работа знешняй сілы дадатная: $A' > 0$



1. Як можна вылічыць работу, якую выконвае сіла ціску газу пры яго расшырэньні (сцісканні)?
2. Як суадносяцца паміж сабой работа сілы ціску газу і работа знешніх сіл над газам?
3. У чым заключаецца геаметрычны сэнс паняцця «работа» ў тэрмадынаміцы?
4. Чаму расшырэньне газу пры адсутнасці цеплаабмену з навакольным асяроддзем суправаджаецца яго ахаладжэннем?
5. Ідэальны газ пераводзяць са стану *A* ў стан *B* двума спосабамі: першы раз — *A1B*, а другі — *A2B* (мал. 72). У якім выпадку работа, якую выконвае сіла ціску газу, большая? У якім выпадку змена ўнутранай энергіі большая?

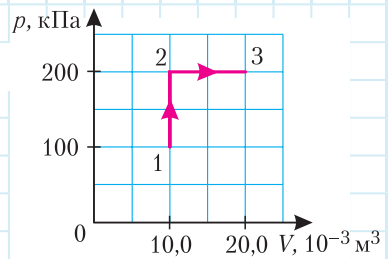


Мал. 72

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Вызначце работу, якую выконвае сіла ціску ідэальнага газу пэўнай масы пры яго пераходзе са стану 1 у стан 3 (мал. 73).

Рашэнне. *1 спосаб.* Работа *A* газу падчас усяго працэсу роўная суме работ на ўчастках *1→2* і *2→3*. Паколькі пры пераходзе газу са стану 1 у стан 2 яго аб'ём не змяняецца (ізахорны працэс $V_2 = V_1$), то работа, якую выконвае сіла ціску газу, $A_{12} = 0$. У працэсе ізабарнага расшырэньня (пераход газу са стану 2 у стан 3) сіла ціску газу выконвае работу



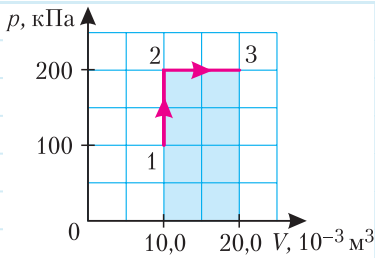
Мал. 73

$$A_{23} = p_2 \Delta V = p_2 (V_3 - V_1).$$

Тады пры пераходзе са стану 1 у стан 3 работа

$$A = A_{12} + A_{23} = p_2 (V_3 - V_1).$$

$$\begin{aligned} A &= 2,00 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (2,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 - 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3) = \\ &= 2,00 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 2,00 \text{ кДж}. \end{aligned}$$



Мал. 74

II спосаб. Работа газу лікава роўная плошчы зафарбаванай фігуры, абмежаванай графікам залежнасці ціску ад аб'ёму, воссю OV і прамымі, якія адпавядаюць значэнням аб'ёмаў $V_1 = 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ і $V_2 = 20,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (зафарбаваная частка на малюнку 74).

$$A = 2,00 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (2,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 - 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3) = 2,00 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 2,00 \text{ кДж.}$$

Адказ: $A = 2,00 \text{ кДж.}$

Прыклад 2. Вызначце работу, якую выконвае сіла ціску ідэальнага газу пэўнай масы пры ізобарным павышэнні яго тэмпературы ад $t_1 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ да $t_2 = 87 \text{ }^\circ\text{C}$, калі ціск газу $p = 190 \text{ кПа}$, а яго пачатковы аб'ём $V_1 = 6,0 \text{ дм}^3$.

Дадзена:
 $T_1 = 285 \text{ К}$
 $T_2 = 360 \text{ К}$
 $p = 190 \text{ кПа} =$
 $= 1,90 \cdot 10^5 \text{ Па}$
 $V_1 = 6,0 \text{ дм}^3 =$
 $= 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

$A = ?$

Рашэнне. Сіла ціску газу выконвае дадатную работу, бо пры ізобарным награванні павялічваецца яго аб'ём. Таму

$$A = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1.$$

Згодна з ураўненнем Клапейрона — Мендзялеева $pV_1 = \nu RT_1$ і $pV_2 = \nu RT_2$. Значыць,

$$A = \nu R(T_2 - T_1) = \nu RT_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = pV_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right).$$

$$A = 1,90 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \left(\frac{360 \text{ К}}{285 \text{ К}} - 1 \right) = 3,0 \cdot 10^2 \text{ Дж} = 0,30 \text{ кДж.}$$

Адказ: $A = 0,30 \text{ кДж.}$



Практыкаванне 8

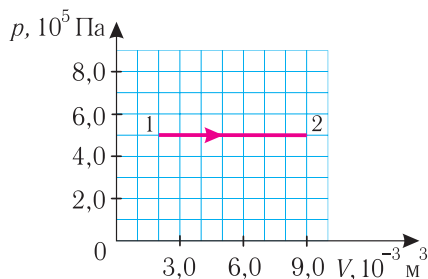
1. Сіла ціску ідэальнага аднаатамнага газу пэўнай масы выконвае адмоўную работу падчас ізатэрмічнага працэсу. Як змяняюцца ў гэтым працэсе аб'ём, ціск і ўнутраная энергія газу?

2. Газ, ціск якога $p = 0,10 \text{ МПа}$, ізобарна расшыраецца. Пры гэтым сіла ціску газу выконвае работу $A = 40 \text{ Дж}$. Вызначце, на колькі павялічыўся аб'ём газу.

3. На малюнку 75 прыведзены графік залежнасці ціску газу ад аб'ёму. Вызначце работу, якую выканае сіла ціску газу пры расшырэнні.

4. Пры ізабарным павелічэнні тэмпературы азоту на $\Delta T = 180$ К сілай яго ціску выканана работа $A = 25$ кДж. Вызначце масу азоту.

5. Ідэальны газ пэўнай масы, тэмпература якога $T_1 = 290$ К і ціск $p = 0,20$ МПа, займае аб'ём $V_1 = 0,10$ м³. Вызначце работу, якую выканае сіла ціску газу пры яго ізабарным нагрэванні да тэмпературы $T_2 = 370$ К.



Мал. 75



§ 13. Колькасць цеплаты

У чым прычына змянення ўнутранай энергіі макраскапічнага цела пры цеплаабмене?

Цеплаабмен. Яшчэ адным спосабам змянення ўнутранай энергіі тэрмадынамічнай сістэмы з'яўляецца *цеплаабмен*.

Цеплаабмен — самаадвольны працэс перадачы ўнутранай энергіі ад цела з большай тэмпературай цела з меншай тэмпературай без выканання работы.

Цеплаабмен паміж целамі, якія кантактуюць, называюць *цеплаперадачай*. За кошт перададзенай пры гэтым энергіі павялічваецца ўнутраная энергія аднаго цела, разам з тым памяншаецца ўнутраная энергія другога. Калі, напрыклад, прывесці ў судакрананне два целы з рознымі тэмпературамі, то часціцы больш нагрэтага цела будуць перадаваць частку сваёй кінетычнай энергіі часціцам менш нагрэтага цела. У выніку ўнутраная энергія аднаго цела памяншаецца, а другога павялічваецца.

Такім чынам, пры цеплаперадачы не адбываецца ператварэння энергіі з адной формы ў другую: частка ўнутранай энергіі больш нагрэтага цела перадаецца менш нагрэтанаму.

Ад тэорыі да практыкі

Выберыце правільнае сцвярджэнне.

1. Адбылася цеплаперадача — значыць, змянілася ўнутраная энергія цела.
2. Унутраная энергія цела змянілася — значыць, адбылася цеплаперадача.

Колькасць цеплаты і ўдзельная цеплаёмістасць. Колькаснай мерай энергіі, перададзенай цела (або аддадзенай ім) у працэсе цеплаабмену, з'яўляецца *колькасць цеплаты*.

У СІ адзінкай колькасці цеплаты Q з'яўляецца джоўль (Дж). Часам для вымярэння колькасці цеплаты выкарыстоўваюць пазасістэмную адзінку — калорыю (1 кал = 4,19 Дж).

Калі працэс цеплаабмену не суправаджаецца змяненнем аграгатнага стану рэчыва, то

$$Q = cm(T_2 - T_1),$$

дзе m — маса цела; $T_2 - T_1 = \Delta T$ — рознасць тэмператур у канцы і ў пачатку працэсу цеплаабмену; c — *удзельная цеплаёмістасць рэчыва* — фізічная велічыня, лікава роўная колькасці цеплаты, якую атрымлівае рэчыва масай 1 кг пры павелічэнні яго тэмпературы на 1 К. Удзельную цеплаёмістасць вымяраюць у джоўлях, падзеленых на кілаграм і кельвін $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$.

Удзельная цеплаёмістасць залежыць ад уласцівасцей дадзенага рэчыва і, як паказваюць доследы, у дастаткова вялікім інтэрвале тэмператур практычна не змяняецца. Аднак удзельная цеплаёмістасць газу залежыць ад таго, пры якім працэсе (ізабарным або ізахорным) ажыццяўляецца цеплаабмен.

Ад тэорыі да практыкі

У якога з рэчываў, прыведзеных у табліцы, змена тэмпературы будзе максімальнай пры перадачы ім аднолькавай колькасці цеплаты, калі іх масы роўныя?

Рэчыва	алюміній	жалеза	волава	свінец	цынк
Удзельная цеплаёмістасць c , $10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	0,92	0,46	0,25	0,12	0,40

Цікава ведаць

Фізічная велічыня, роўная здабытку масы цела на ўдзельную цеплаёмістасць рэчыва, носіць назву цеплаёмістасць цела. Абазначаюць цеплаёмістасць C і вымяраюць у джоўлях, падзеленых на кельвін $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right)$: $C = cm$. Цеплаёмістасць, у адрозненне ад удзельнай цеплаёмістасці, з'яўляецца цеплавой характарыстыкай цела, а не рэчыва.

Удзельная цеплата плаўлення. Фізічную велічыню, лікава роўную колькасці цеплаты, неабходнай для ператварэння крышталічнага рэчыва масай 1 кг, узятага пры тэмпературы плаўлення, у вадкасць той самай тэмпературы, называюць *удзельнай цеплатой плаўлення* λ . Гэтую велічыню вымяраюць у джоўлях, падзеленых на кілаграм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$. Для плаўлення цела масай m , папярэдне нагрэтага да тэмпературы плаўлення, яму трэба перадаць колькасць цеплаты $Q_{\text{пл}} = \lambda m$. Пры крышталізацыі цела такая самая колькасць цеплаты выдзяляецца: $Q_{\text{кр}} = -\lambda m$.

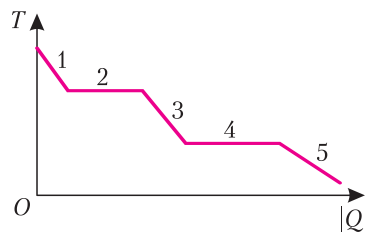
Ад тэорыі да практыкі

Пасудзіну, у якой знаходзіўся лёд пры тэмпературы $t_1 = -10$ °С, унеслі ў пакой. Пры дасягненні цеплавой раўнавагі тэмпература ў пасудзіне павысілася да $t_2 = 20$ °С. Якія цеплавыя працэсы адбываліся з рэчывам у пасудзіне? Ці змянялася ўнутраная энергія рэчыва ў працэсе дасягнення цеплавой раўнавагі і калі змянялася, то як?

Удзельная цеплата параўтварэння. Фізічную велічыню, лікава роўную колькасці цеплаты, якую трэба перадаць вадкасці масай 1 кг, што знаходзіцца пры тэмпературы кіпення, для ператварэння яе пры пастаяннай тэмпературы ў пару, называюць *удзельнай цеплатой параўтварэння* L . Адзінкай вымярэння гэтай велічыні з'яўляецца джоўль, падзелены на кілаграм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$. Колькасць цеплаты, неабходную для ператварэння вадкасці масай m , папярэдне нагрэтай да тэмпературы кіпення, у пару, вызначаюць па формуле $Q_{\text{п}} = Lm$. Кандэнсацыя пары суправаджаецца выдзяленнем колькасці цеплаты $Q_{\text{к}} = -Lm$.

Ад тэорыі да практыкі

У ходзе эксперымента быў пабудаваны графік залежнасці тэмпературы рэчыва ад абсалютнай велічыні выдзеленай ім у працэсе цеплаабмену колькасці цеплаты (мал. 76). У момант, калі пачаўся адлік часу, у пасудзіне знаходзіўся толькі газ, а яго ціск на працягу ўсяго працэсу заставаўся пастаянным. Якія змены тэмпературы і ўнутранай энергіі рэчыва адлюстраваны на кожным участку графіка?



Мал. 76

Удзельная цеплата згарання паліва. Фізічную велічыню, лікава роўную колькасці цеплаты, якая выдзяляецца пры поўным згаранні паліва масай 1 кг, называюць *удзельнай цеплатой згарання* q паліва і вымяраюць у джоўлях, падзеленых на кілаграм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$. Колькасць цеплаты, што выдзяляецца пры поўным згаранні некаторай масы m паліва, вызначаюць па формуле

$$Q_{\text{зг}} = qm.$$

Гэтая колькасць цеплаты перадаецца цэлам, якія ўтвараюць тэрмадынамічную сістэму, і ў адносінах да іх з'яўляецца дадатнай велічынёй.

Ад тэорыі да практыкі

Крыніцай цяпла ў доме, дзе не ўстаноўлена газавае абсталяванне, з'яўляецца печ. Які від паліва найбольш эфектыўны (гл. табліцу) для пячнага ацяплення? Чаму?

Рэчыва	дровы сухія	торф у брыкетах	буры вугаль	каменны вугаль
Удзельная цеплата згарання паліва q , $10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	8,3	15,0	9,3	30,3



Цеплаабмен — самаадвольны працэс перадачы ўнутранай энергіі ад цела з большай тэмпературай целу з меншай тэмпературай без выканання работы

Пры цеплаабмене не адбываецца ператварэння энергіі з адной формы ў другую: частка ўнутранай энергіі больш нагрэтага цела перадаецца менш нагрэтаму

Колькасць цеплаты з'яўляецца колькаснай мерай энергіі, перададзенай целу ў працэсе цеплаабмену

Колькасць цеплаты, што перадаецца пры нагрыванні цела (выдзяляецца пры ахаладжэнні):

$$Q = cm(T_2 - T_1)$$

Колькасць цеплаты, необходимая для плаўлення цвёрдага цела, якое знаходзіцца пры тэмпературы плаўлення:

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m$$

Колькасць цеплаты, якая выдзяляецца пры крышталізацыі вадкасці:

$$Q_{\text{кр}} = -\lambda m$$

Колькасць цеплаты, необходимая для ператварэння вадкасці, якая знаходзіцца пры тэмпературы кіпення, у пару:

$$Q_{\text{п}} = Lm$$

Колькасць цеплаты, якая выдзяляецца пры кандэнсацыі пары:

$$Q_{\text{к}} = -Lm$$

Колькасць цеплаты, якая выдзяляецца пры поўным згаранні паліва:

$$Q_{\text{зг}} = qm$$


1. Раствлумачце прычыну змены ўнутранай энергіі цела пры цеплаабмене і выкананні работы.
2. Якая фізічная велічыня з'яўляецца мерай змены ўнутранай энергіі цел пры цеплаабмене?
3. Што называюць удзельнай цеплаёмістасцю рэчыва? У якіх адзінках яе вымяраюць?
4. Што называюць удзельнай цеплатой плаўлення рэчыва? У якіх адзінках яе вымяраюць?
5. Пры плаўленні крышталічнага рэчыва, нягледзячы на падведзеную энергію, яго тэмпература не змяняецца. На што расходзецца колькасць цеплаты, якая перадаецца целу?
6. Што называюць удзельнай цеплатой параўтварэння рэчыва? У якіх адзінках яе вымяраюць?

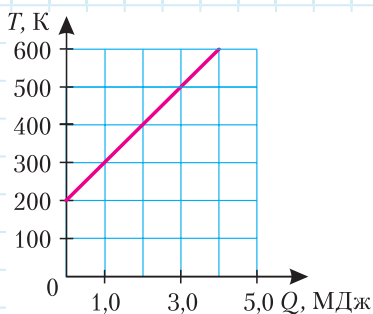
7. Чаму, нягледзячы на адвядзенне энергіі, тэмпература рэчыва на ўчастку 2 (гл. мал. 76) не змяняецца?
8. Што называюць цеплатой згарання паліва? У якіх адзінках яе вымяраюць?

Дамашняя лабараторыя

1. Калі вы бераце ў рукі металічныя нажніцы, то яны здаюцца халаднейшымі, чым навакольнае паветра. Маючы толькі бытавы тэрмометр і пасудзіну з вадой, прапануйце дослед, які дазволіць праверыць, ці так гэта на самай справе. Правядзіце гэты дослед.

2. Выкарыстоўваючы бытавы тэрмометр, высветліце, у якім выпадку натуральнае перамешванне вады адбудзецца хутчэй: калі ў гарачую вадку наліваць халодную або ў халодную наліваць гарачую (аб'ёмы вады ў абодвух выпадках аднолькавыя). Растворыце атрыманы вынік.

Прыклады рашэння задач



Мал. 77

Прыклад 1. На малюнку 77 прыведзены графік залежнасці абсалютнай тэмпературы цела, якое награвалася, ад перададзенай яму колькасці цеплаты. Выкарыстоўваючы табліцу на с. 84, вызначце рэчыва, з якога выраблена цела, калі яго маса $m = 40$ кг.

Рашэнне. Для таго каб вызначыць рэчыва, з якога выраблена цела, знойдзем яго ўдзельную цеплаёмістасць c . Аналізуючы графік, робім выснову, што пры награванні цела ад тэмпературы $T_1 = 200$ К да тэмпературы $T_2 = 600$ К яму была перададзена колькасць цеплаты $Q = 4,0 \cdot 10^6$ Дж, якую можна разлічыць па формуле $Q = cm(T_2 - T_1)$.

Значыць, удзельная цеплаёмістасць рэчыва $c = \frac{Q}{m\Delta T}$.

$$c = \frac{4,0 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{40 \text{ кг} \cdot (600 \text{ К} - 200 \text{ К})} = 0,25 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Атрыманае значэнне ўдзельнай цеплаёмістасці адпавядае волаву.

Адказ: $c = 0,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ — волава.

Прыклад 2. У налітую ў пасудзіну ваду, маса якой $m_1 = 800$ г і тэмпература $t_1 = 60$ °С, дадалі некаторую колькасць лёду пры тэмпературы $t_2 = -10$ °С. Вызначце масу лёду, калі пасля дасягнення цеплавой раўнавагі тэмпература вадкасці ў пасудзіне $t_3 = 40$ °С. Цеплаёмістасць пасудзіны і страты цяпла можна не прымаць пад увагу. Уздельная цеплаёмістасць вады $c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, лёду $c_2 = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, уздельная цеплата плаўлення лёду $\lambda = 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Дадзена:

$$m_1 = 800 \text{ г} = 0,800 \text{ кг}$$

$$t_1 = 60 \text{ °С}$$

$$t_2 = -10 \text{ °С}$$

$$t_3 = 40 \text{ °С}$$

$$c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_2 = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda = 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$m_2 = ?$$

Рашэнне. Не прымаючы пад увагу страты энергіі ў навакольнае асяроддзе, улічваем толькі абмен энергіяй паміж цэламі, што ўваходзяць у склад сістэмы. Разгледзім цеплавыя працэсы, якія адбываліся ў сістэме: 1) награванне лёду ад тэмпературы t_2 да тэмпературы плаўлення $t_0 = 0,0$ °С: $Q_1 = c_2 m_2 (t_0 - t_2)$; 2) плаўленне лёду: $Q_2 = \lambda m_2$; 3) награванне вады, якая з'явілася пры плаўленні лёду, ад тэмпературы t_0 да тэмпературы t_3 : $Q_3 = c_1 m_2 (t_3 - t_0)$; 4) ахалоджванне цёплай вады масай m_1 ад тэмпературы t_1 да тэмпературы t_3 : $Q_4 = c_1 m_1 (t_3 - t_1)$. Складзём ураўненне цеплавога балансу: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0$, або

$$c_2 m_2 (t_0 - t_2) + \lambda m_2 + c_1 m_2 (t_3 - t_0) + c_1 m_1 (t_3 - t_1) = 0.$$

Адкуль маса лёду:

$$m_2 = \frac{c_1 m_1 (t_1 - t_3)}{c_2 (t_0 - t_2) + \lambda + c_1 (t_3 - t_0)}.$$

$$m_2 = \frac{4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,800 \text{ кг} \cdot (60 \text{ °С} - 40 \text{ °С})}{2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot (0,0 \text{ °С} + 10 \text{ °С}) + 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} + 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot (40 \text{ °С} - 0,0 \text{ °С})} = 0,13 \text{ кг}.$$

Адказ: $m_2 = 0,13$ кг.

Практыкаванне 9

1. Каб павялічыць тэмпературу вады, маса якой $m_1 = 230$ г, на $\Delta T_1 = 30,0$ К, патрабуецца такая ж колькасць цеплаты, як і для павелічэння тэмпературы жалезнага бруска на $\Delta T_2 = 50,0$ К. Вызначце масу бруска. Удзельныя цеплаёмістасці: вады $c_1 = 4,20 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, жалеза $c_2 = 4,60 \cdot 10^2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

2. Вадкае волава пры тэмпературы плаўлення $t_1 = 232$ °С улілі ў ваду, маса якой $m_2 = 2,0$ кг, а тэмпература $t_2 = 12$ °С. У выніку тэмпература вады павысілася да $t = 32$ °С. Вызначце масу волава. Цеплаабмен з навакольным асяроддзем, цеплаёмістасць пасудзіны, у якой знаходзілася вада, і выпарэнне вады можна не прымаць пад увагу. Удзельныя цеплаёмістасці: волава $c_1 = 0,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, вады $c_2 = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; удзельная цеплата плаўлення волава $\lambda_1 = 60,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

3. У цеплаізаляванай пасудзіне, цеплаёмістасць якой можна не ўлічваць, знаходзіцца вада масай $m_1 = 0,40$ кг пры тэмпературы $t_1 = 10$ °С. У ваду ўпускаюць сухую вадзяную пару масай $m_2 = 50$ г, тэмпература якой $t_2 = 100$ °С. Вызначце тэмпературу вады, якая ўстанавілася ў пасудзіне. Для вады: удзельная цеплаёмістасць $c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, удзельная цеплата параўтварэння $L = 2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

4. У цеплаізаляванай пасудзіне, цеплаёмістасць якой можна не ўлічваць, знаходзіцца вада аб'ёмам $V_1 = 3,2$ л пры тэмпературы $t_1 = 20$ °С. У ваду апускаюць сталёвы брусок масай $m_2 = 4,0$ кг, нагрэты да тэмпературы $t_2 = 360$ °С. У выніку цеплаабмену вада нагрэлася да тэмпературы $t_3 = 50$ °С, а частка яе ператварылася ў пару. Вызначце масу вады, якая ператварылася ў пару. Для вады: удзельная цеплаёмістасць $c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, шчыльнасць $\rho_1 = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, удзельная цеплата параўтварэння $L_1 = 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, тэмпература кіпення $t_k = 100$ °С. Удзельная цеплаёмістасць сталі $c_2 = 4,6 \cdot 10^2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

5. У каларыметр налілі ваду пры тэмпературы $t = 12$ °С. Пры правядзенні першага доследу ў ваду змясцілі лёд масай $m_1 = 0,10$ кг, а пры правядзенні другога — лёд масай $m_2 = 0,20$ кг. У абодвух доследах лёд быў узяты пры тэмпературы плаўлення. Вызначце тэмпературу, што ўстанавілася ў каларыметры, калі ў першым і другім доследах яна была аднолькавая.



§ 14. Першы закон тэрмадынамікі. Прымяненне першага закона тэрмадынамікі да ізапрацэсаў змянення стану ідэальнага газу

У 9-м класе вы даведаліся, што поўная механічная энергія замкнутай сістэмы цал захоўваецца толькі пры адсутнасці трэння, а пры наяўнасці трэння яна памяншаецца. Куды дзяваецца механічная энергія?

Закон захавання энергіі. У сярэдзіне XIX ст. вядомы англійскі фізік Дж. Джоўль (1818–1889), правёўшы шматлікія доследы, паказаў, што выкананая пры перамяшванні вады механічная работа практычна роўная павелічэнню яе ўнутранай энергіі. Доследы Джоўля, а таксама даследаванні нямецкага ўрача і прыродазнаўцы Ю. Р. Маера (1814–1878), нямецкага прафесара фізіялогіі і аднаго з самых знакамітых фізікаў другой паловы XIX ст. Г. Гельмгольца (1821–1894) дазволілі сфармуляваць *закон захавання і ператварэння энергіі*, распаўсюдзіўшы яго на ўсе з’явы прыроды.

Закон захавання і ператварэння энергіі: пры любых узаемадзеяннях матэрыяльных аб’ектаў энергія не знікае і не ўзнікае з нічога, яна толькі перадаецца ад адных аб’ектаў да другіх або ператвараецца з адной формы ў другую.

Закон захавання і ператварэння энергіі з’яўляецца ўсеагульным законам прыроды і звязвае разам усе фізічныя з’явы. Гэты закон выконваецца абсалютна дакладна, на ім грунтуецца ўсё сучаснае прыродазнаўства.

Ад тэорыі да практыкі

Калі бутэльку, запоўненую да паловы вадой пры пакаёвай тэмпературы, патрэсці на працягу некалькіх хвілін, то выявіцца, што вада нагрэлася на 1–2 °С. Што з’яўляецца прычынай павышэння тэмпературы вады?

Першы закон тэрмадынамікі. У папярэдніх параграфрах мы разглядалі працэсы, у якіх унутраная энергія сістэмы змянялася або пры выкананні работы, або ў выніку цеплаабмену. Аднак часцей за ўсё пры пераходзе сістэмы з аднаго стану ў другі ўнутраная энергія змяняецца як за кошт выканання работы, так і за кошт цеплаабмену з навакольнымі цэламі.

Для тэрмадынамічных сістэм закон захавання і ператварэння энергіі называюць *першым законам тэрмадынамікі*.

Першы закон тэрмадынамікі: прырашчэнне ўнутранай энергіі тэрмадынамічнай сістэмы пры пераходзе з аднаго стану ў другі роўнае алгебраічнай суме работы, выкананай знешнімі сіламі, і колькасці цеплаты, атрыманай (або аддадзенай) сістэмай пры ўзаемадзеянні з навакольнымі цэламі.

$$\Delta U = A' + Q.$$

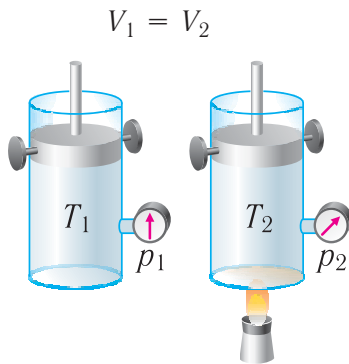
Паколькі работа знешніх сіл роўная рабоце, якая выконваецца тэрмадынамічнай сістэмай, узятай з супрацьлеглым знакам ($A' = -A$), то *першы закон тэрмадынамікі* можна сфармуляваць інакш:

Колькасць цеплаты, атрыманая (або аддадзеная) тэрмадынамічнай сістэмай пры ўзаемадзеянні са знешнімі цэламі пры яе пераходзе з аднаго стану ў другі, ідзе на прырашчэнне ўнутранай энергіі сістэмы і на работу, якую яна выконвае супраць знешніх сіл:

$$Q = \Delta U + A.$$

Ад тэорыі да практыкі

Ідэальны газ атрымаў колькасць цеплаты $Q = 340$ Дж. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу, калі пры гэтым сіла ціску газу выканала работу $A = 300$ Дж.



Мал. 78

Прыменім першы закон тэрмадынамікі да розных ізапрацэсаў змены стану ідэальнага аднаатамнага газу.

У якасці тэрмадынамічнай сістэмы разгледзім ідэальны аднаатамны газ, які знаходзіцца ў цыліндрычнай пасудзіне, закрытай поршнем.

Ізэхорны працэс. Калі пасудзіна закрыта нерухомым поршнем, то пры награванні аб'ём газу застаецца пастаянным ($V = \text{const}$ і $\Delta V = 0$) (мал. 78). Значыць, работа сілы ціску газу $A = 0$. Тады першы закон тэрмадынамікі прыме выгляд:

$$Q = \Delta U.$$



Пры ізэхорным працэсе ўся перададзеная газу колькасць цеплаты ідзе на павелічэнне яго ўнутранай энергіі:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T > 0.$$

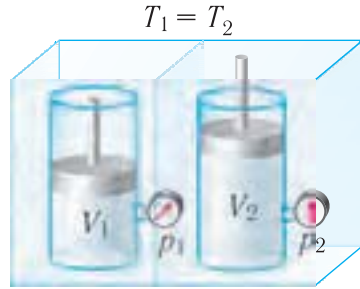
Калі газ пры ізакорным працэсе аддае пэўную колькасць цеплаты, то яго ўнутраная энергія змяншаецца: $\Delta U < 0$.

Ад тэорыі да практыкі

Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі ідэальнага газу, калі пры ізакорным працэсе ад яго была адведзена колькасць цеплаты $Q = -560$ Дж.



Ізатэрмічны працэс. Змесцім пасудзіну з газам, якая знаходзіцца пад рухомым поршнем, у тэрмастат — прыладу, у якой падтрымліваецца пастаянная тэмпература (мал. 79). З дапамогай знешняга прыстасавання павольна перамесцім поршань у пасудзіне так, каб аб'ём газу павялічыўся (або паменшыўся). Значэнні тэмпературы газу ў пачатковым і канчатковым станах аднолькавыя. У гэтым выпадку ўнутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу $U = \frac{3}{2} \nu RT$ застаецца пастаян-



Мал. 79

най, а яе змяненне $\Delta U = 0$. Тады першы закон тэрмадынамікі прыме выгляд:

$$Q = A.$$

Пры ізатэрмічным працэсе перададзеная газу колькасць цеплаты расходуюцца на выкананне газам работы.



Ад тэорыі да практыкі

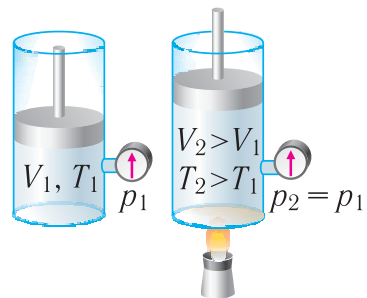
Сіла ціску ідэальнага газу падчас ізатэрмічнага расшырэння выканала работу $A = 3640$ Дж. Якую колькасць цеплаты атрымаў газ?



Ізобарны працэс. Калі пасудзіна закрыта рухомым поршнем, то пры награванні павялічацца як тэмпература газу, так і яго аб'ём (мал. 80). Тады першы закон тэрмадынамікі мае выгляд:

$$Q = \Delta U + A.$$

Пры ізобарным працэсе перададзеная газу колькасць цеплаты часткова расходуюцца на



Мал. 80



павелічэнне ўнутранай энергіі газу і часткова ідзе на выкананне работы сілай ціску газу пры яго расшырэнні.

З улікам таго, што пры ізабарным працэсе работа расшырэння (сціскання) газу $A = p\Delta V \neq 0$, першы закон тэрмадынамікі прыме выгляд:

$$Q = \Delta U + p\Delta V.$$

Ад тэорыі да практыкі



Сіла ціску ідэальнага газу падчас ізабарнага расшырэння выканала работу $A = 320$ Дж. Пры гэтым газ атрымаў колькасць цеплаты $Q = 680$ Дж. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі ідэальнага газу.



Змяненне ўнутранай энергіі тэрмадынамічнай сістэмы пры пераходзе з аднаго стану ў другі роўнае алгебраічнай суме работы, выкананай знешнімі сіламі, і колькасці цеплаты, атрыманай (або аддадзенай) сістэмай пры ўзаемадзеянні з навакольнымі цэламі:

$$\Delta U = A' + Q$$

Колькасць цеплаты, атрыманая (або аддадзеная) тэрмадынамічнай сістэмай пры ўзаемадзеянні са знешнімі цэламі пры яе пераходзе з аднаго стану ў другі, ідзе на прырашчэнне ўнутранай энергіі сістэмы і на работу, якую сістэма выконвае супраць знешніх сіл: $Q = \Delta U + A$

Пры ізахорным працэсе ўся колькасць цеплаты, якая перадаецца сістэме, ідзе на павелічэнне яе ўнутранай энергіі:
 $Q = \Delta U$

Пры ізатэрмічным працэсе работа расшырэння або сціскання ідэальнага газу суправаджаецца цеплаабменам паміж газам і тэрмастатам:
 $A = Q$

Пры ізабарным працэсе перададзеная ідэальнаму газу колькасць цеплаты часткова расходуюцца на павелічэнне ўнутранай энергіі газу і часткова ідзе на выкананне работы газам пры яго расшырэнні:
 $Q = \Delta U + p\Delta V$





1. Прывядзіце дзве фармулёўкі першага закона тэрмадынамікі.
2. Чаму роўная змена ўнутранай энергіі пры ізахорным працэсе?
3. На што расходуюцца колькасць цеплаты, якую перадаюць сістэме, пры ізатэрмічным працэсе?
4. На што расходуюцца колькасць цеплаты, якую перадаюць сістэме, пры ізабарным працэсе?
5. Пры хуткім сцісканні газу адбылося павышэнне яго тэмпературы. Ці азначае гэта, што газу перадалі пэўную колькасць цеплаты? Ці можна сцвярджаць, што ўнутраная энергія газу павялічылася?
6. Запоўніце табліцу ў сшытку.

Працэс	Работа сілы ціску газу	Колькасць цеплаты	Змена ўнутранай энергіі	Выснова
Ізахорны ($V = \text{const}$ і $\Delta V = 0$)				
Ізатэрмічны ($T = \text{const}$ і $\Delta T = 0$)				
Ізабарны ($p = \text{const}$)				



Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Ідэальны аднаатамны газ, ціск якога $p = 2,0 \cdot 10^5$ Па, ізабарна расшыраецца так, што яго аб'ём узрастае на $\Delta V = 0,40$ м³. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу і колькасць цеплаты, атрыманую газам у гэтым працэсе.

Дадзена:
 $p = 2,0 \cdot 10^5$ Па
 $\Delta V = 0,40$ м³
 $p = \text{const}$

ΔU — ?
 Q — ?

Рашэнне. Прырашчэнне ўнутранай энергіі ідэальнага аднаатамнага газу $\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$. Пры ізабарным расшырэнні ідэальнага газу змяненне яго тэмпературы ΔT звязана са змяненнем аб'ёму ΔV газу суадносінамі $\frac{m}{M} R \Delta T = p \Delta V$.

Тады $\Delta U = \frac{3}{2} p \Delta V$. Паводле першага закона тэрмадынамікі для ізабарнага працэсу $Q = \Delta U + p \Delta V$.

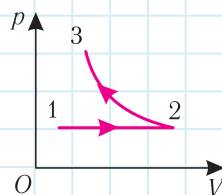
Значыць, $Q = \frac{3}{2} p \Delta V + p \Delta V = \frac{5}{2} p \Delta V$.

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,40 \text{ м}^3 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,12 \text{ МДж},$$

$$Q = \frac{5}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,40 \text{ м}^3 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,20 \text{ МДж}.$$

Адказ: $\Delta U = 0,12 \text{ МДж}$, $Q = 0,20 \text{ МДж}$.

Прыклад 2. На малюнку 81 прыведзены графік працэсу змянення стану пэўнай масы ідэальнага газу (участак $2 \rightarrow 3$ — ізатэрма). На якім участку графіка работа сілы ціску газу: а) дадатная; б) адмоўная? На якім участку графіка газ: а) атрымліваў колькасць цеплаты; б) аддаваў? Як змянялася ўнутраная энергія газу?



Мал. 81

Рашэнне. Участак $1 \rightarrow 2$. Паколькі пры пастаянным ціску ($p = \text{const}$, $p_1 = p_2$) павялічваецца аб'ём газу ($\Delta V_{12} > 0$), то расце і яго тэмпература ($\Delta T_{12} > 0$).

Значыць, работа сілы ціску газу $A_{12} > 0$ і прырашчэнне яго ўнутранай энергіі $\Delta U_{12} > 0$. З першага закона тэрмадынамікі, запісанага ў выглядзе $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12}$, вынікае, што $Q_{12} > 0$.

Участак $2 \rightarrow 3$. Паколькі тэмпература газу не змяняецца ($T = \text{const}$, $T_2 = T_3$, $\Delta T_{23} = 0$), то прырашчэнне яго ўнутранай энергіі $\Delta U_{23} = 0$. Аб'ём газу памяншаецца (ізабармічнае сцісканне), і работа сілы ціску газу $A_{23} < 0$. З першага закона тэрмадынамікі, запісанага ў выглядзе $Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23}$, вынікае, што $Q_{23} < 0$.

Адказ:

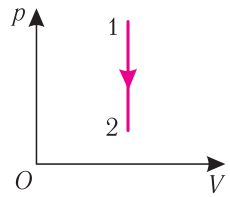
Участак графіка	Работа сілы ціску газу	Колькасць цеплаты	Прырашчэнне ўнутранай энергіі газу
$1 \rightarrow 2$	$A_{12} > 0$	$Q_{12} > 0$ (газ атрымліваў колькасць цеплаты)	$\Delta U_{12} > 0$
$2 \rightarrow 3$	$A_{23} < 0$	$Q_{23} < 0$ (газ аддаваў колькасць цеплаты)	$\Delta U_{23} = 0$



Практыкаванне 10

1. Вызначце колькасць цеплаты, перададзеную кіслароду, калі пры ізатэрмічным расшырэнні работа, выкананая сілай ціску газу, $A = 6,4$ кДж.

2. З ідэальным газам пэўнай масы ажыццёўлены працэс, графік якога прыведзены на малюнку 82. Чаму роўная работа сілы ціску газу? Атрымліваў ці аддаваў газ колькасць цеплаты ў гэтым працэсе? Як змянілася ўнутраная энергія газу?

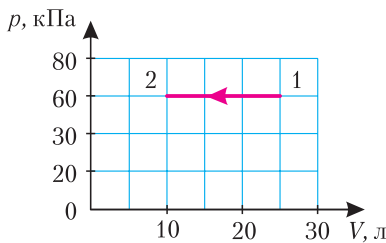


Мал. 82

Запоўніце табліцу ў сшытку (гл. прыклад 2).

Работа сілы ціску газу	Колькасць цеплаты	Прырашчэнне ўнутранай энергіі газу

3. З ідэальным газам пэўнай масы ажыццявілі працэс, графік якога прыведзены на малюнку 83. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу, калі ён аддаў колькасць цеплаты $Q_{12} = -2,25$ кДж.



Мал. 83

4. У герметычна закрытым балоне знаходзіцца азот масай $m = 4,00$ кг. Вызначце колькасць цеплаты, якую перадалі азоту пры павышэнні яго тэмпературы на $\Delta T = 120$ К, калі ўдзельная цеплаёмкасць азоту пры пастаянным аб'ёме $c_V = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

5. Пры ізабарным расшырэнні сілай ціску ідэальнага аднаатамнага газу выканана работа $A = 50,0$ кДж. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу і перададзеную яму колькасць цеплаты.



§ 15. Цеплавая рухавікі. Прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў і іх ККД. Экалагічныя праблемы выкарыстання цеплавых рухавікоў

Людзі даўно заўважылі, што пры выкананні механічнай работы ўнутраная энергія цел можа змяняцца, і навучыліся гэта выкарыстоўваць. Напрыклад, можна сагрэць рукі, паціраючы далоні адна аб адну, або здабыць агонь трэннем аднаго кавалка дрэва аб другі. Значна больш часу спатрэбілася чалавецтву, каб навучыцца выкарыстоўваць змяшэнне ўнутранай энергіі цел для выканання механічнай работы. Толькі ў другой палове XVIII ст., параўнальна нядаўна па гістарычных мерках, з'явіліся першыя практычна карысныя ўніверсальныя прылады для ажыццяўлення гэтай мэты — паравыя машыны. Вынаходства паравой машыны, а пасля і рухавіка ўнутранага згарання мела выключна важнае значэнне. Цяпер немагчыма ўявіць наша жыццё без аўтамабіляў, самалётаў, караблёў і іншых складаных канструкцый, у якіх змяшэнне ўнутранай энергіі паліва пры згаранні і яго акісляльніка часткова пераўтвараецца ў механічную работу.

Незваротнасць працэсаў у прыродзе. Першы закон тэрмадынамікі дапускае самаадвольны пераход энергіі як ад больш нагрэтага цела да менш нагрэтага, так і наадварот. Мае значэнне толькі тое, каб памяншэнне ўнутранай энергіі аднаго цела было роўнае павелічэнню ўнутранай энергіі другога цела. На самай справе самаадвольны пераход энергіі ад менш нагрэтага да больш нагрэтага цела ў прыродзе не адбываецца. Напрыклад, немагчыма назіраць, каб пры апусканні халоднай лыжкі ў гарачы чай лыжка ахалоджвалася яшчэ больш, перадаючы пэўную колькасць цеплаты гарачаму чаю. Як вы не раз пераконваліся на практыцы, заўсёды пэўная колькасць цеплаты самаадвольна пераходзіць ад гарачага чаю да халоднай лыжкі, пакуль у сістэме «чай — лыжка» не ўстанавіцца цеплавая раўнавага з аднолькавай тэмпературай ва ўсіх частках сістэмы.

Сцвярджаючы, выказанае Р. Клаўзіусам у 1850 г. пра тое, што немагчымая самаадвольная перадача колькасці цеплаты ад менш нагрэтага цела да больш нагрэтага, атрымала назву *другі закон тэрмадынамікі*.

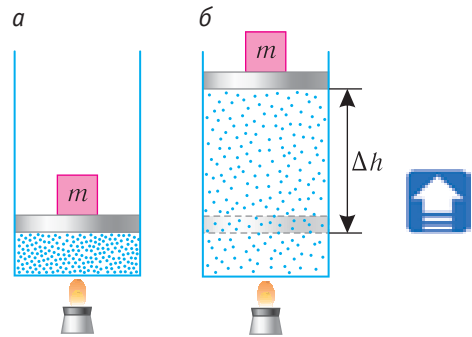
Другі закон тэрмадынамікі канстатуе той факт, што *колькасць цеплаты самаадвольна можа пераходзіць толькі ад больш нагрэтых цел да менш нагрэтых*.

Гэты навуковы факт і вызначае адзіна магчымы напрамак самаадвольнага праходжання цеплавых працэсаў — яны ідуць у бок да стану цеплавой раўнавагі.

Цеплавые рухавікі.

Цеплавые рухавікі — рухавікі, у якіх адбываецца ператварэнне часткі ўнутранай энергіі паліва пры згаранні ў механічную работу.

У якасці спрошчанай мадэлі цеплавога рухавіка разгледзім цыліндр, у якім знаходзіцца газ (паветра) пад поршнем. Змесцім на поршань цела масай m і будзем награвець газ у цыліндры (мал. 84, а). Ціск газу ўзрастае, поршань пачынае рухацца і падывае цела на пэўную вышыню Δh (мал. 84, б). Пры гэтым аб'ём газу павялічваецца, гэта значыць сіла ціску газу выконвае работу ($A > 0$). Аднак у дадзеным выпадку прылада прыдатная толькі для аднаразовага выканання работы, таму такія прылады не знаходзяць прымянення.

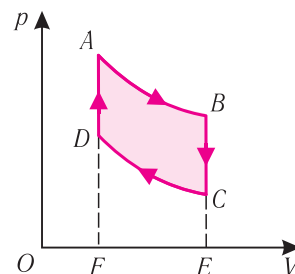


Мал. 84

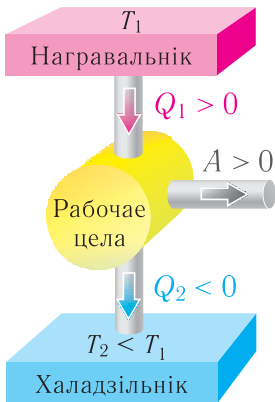
Рабочае цела — цела, якое выконвае работу пасля атрымання колькасці цеплаты Q_1 ад **награвальніка**, што знаходзіцца пры тэмпературы T_1 , і павінна ў канчатковым выніку вярнуцца ў зыходны стан, каб зноў пачаць такі самы працэс. Такім чынам, **першы прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў** — цыклічнасць (бесперапыннасць) іх работы.

Для вяртання поршня ў зыходнае становішча газ неабходна сціснуць да першапачатковага аб'ёму. Пры гэтым знешняя сіла выконвае работу па сцісканні. Але калі сцісканне будзе адбывацца пры той жа тэмпературы, што і расшырэнне газу, то работа знешніх сіл будзе роўная работе сілы ціску газу пры яго расшырэнні. У выніку поўная работа газу за адзін цыкл (расшырэнне — сцісканне) будзе роўная нулю. Таму **другі прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў** — сцісканне газу павінна адбывацца пры больш нізкай тэмпературы T_2 , чым яго расшырэнне (мал. 85). У гэтым выпадку поўная работа газу за цыкл дадатная ($A > 0$) і лікава роўная плошчы фігуры $S_{ABCD} = S_{ABEF} - S_{DCEF}$.

Такім чынам, перад сцісканнем рабочае цела неабходна ахаладзіць. Гэта ажыццяўляецца шляхам перадачы колькасці цеплаты Q_2 трэцяму целу — **халадзільніку**. Са сказанага вынікае, што для работы цыклічнага цеплавога рухавіка, акрамя



Мал. 85



Мал. 86



нагрэвальніка і рабочага цела, необходимая наяўнасць халадзільніка.

Схема цеплага рухавіка прыведзена на малюнку 86. Цеплавы рухавік складаецца з нагрэвальніка, рабочага цела (як правіла, газ) і халадзільніка (атмасфера або вада пры тэмпературы навакольнага асяроддзя — каля 300 К). Энергія, якая выдзяляецца пры згаранні паліва ў нагрэвальніку, перадаецца рабочаму целу (газу) шляхам цеплаперадачы. Пры расшырэнні газу частка яго ўнутранай энергіі ідзе на выкананне работы. Некаторая колькасць цеплаты непазбежна перадаецца халадзільніку.

Каэфіцыент карыснага дзеяння (ККД) цеплага рухавіка — адносіны карысна выкарыстанай энергіі $E_{\text{карысн}}$ да агульнай колькасці энергіі E , атрыманай сістэмай:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{E_{\text{карысн}}}{E}.$$

Вызначаны такім чынам ККД цеплавых рухавікоў называюць *эфектыўным ККД*. Пры гэтым $E = Q_{\text{поўн}}$, дзе $Q_{\text{поўн}}$ — колькасць цеплаты, якая выдзяляецца пры поўным згаранні паліва.

Ступень дасканаласці пераўтварэння пэўнай часткі ўнутранай энергіі нагрэвальніка ў механічную работу, што адбываецца ў цыліндрах цеплага рухавіка, характарызуюць *тэрмічным (тэрмадынамічным) каэфіцыентам карыснага дзеяння*.

Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплага рухавіка — адносіны работы $A_{\text{ц}}$, якая выконваецца рабочым целам за цыкл, да колькасці цеплаты Q_1 , атрыманай ім ад нагрэвальніка:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{A_{\text{ц}}}{Q_1}.$$

Калі Q_2 — колькасць цеплаты, аддадзенай рабочым целам халадзільніку ($Q_2 < 0$), то $A_{\text{ц}} = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$ і

$$\eta_{\text{т}} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}. \quad (15.1)$$

З формулы (15.1) вынікае, што тэрмічны ККД цеплавога рухавіка залежыць ад працэсаў, у якіх удзельнічае рабочае цела, і заўсёды меншы за адзінку.

Рэальныя цеплавые рухавікі маюць наступныя сярэднія значэнні тэрмічнага ККД: дызельны рухавік — 40 %; газатурбінныя ўстаноўкі — 25–30 %; паравая турбіна — 40 %.

У аўтамабільных рухавіках унутранага згарання эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння вызначаюць па эксперыментальнай механічнай магутнасці P рухавіка і колькасці паліва, якая спальваецца за адзінку часу. Так, калі за прамяжак часу Δt спалена паліва масай m , якое мае ўдзельную цеплату згарання q , то

$$\eta_{э} = \frac{P\Delta t}{qm}.$$

Значэнне цеплавых рухавікоў і экалагічныя праблемы іх выкарыстання. Найбольшае значэнне мае выкарыстанне цеплавых рухавікоў у энергетыцы і на транспарце. Цеплавые рухавікі — паравыя турбіны (мал. 87) — ставяць на цеплавых і атамных электрастанцыях, дзе энергія пары ператвараецца ў механічную энергію ротараў генератараў электрычнага току. У першым выпадку пару высокай тэмпературы атрымліваюць за кошт згарання паліва, а ў другім — за кошт энергіі, якая выдзяляецца падчас ядзерных рэакцый.

Вынаходства рухавіка ўнутранага згарання адыграла велізарную ролю ў аўтамабілебудаванні, ва ўдасканаленні сельскагаспадарчай і будаўнічай тэхнікі. Карбюратарныя рухавікі ўнутранага згарання ўстанаўліваюць на аўтамабільях, матацыклах, верталётах і самалётах, дызельныя (мал. 88, а) — на цеплаходах, цеплавозах, трактарах, магутных аўтамабільях. Стварэнне рэактыўнага рухавіка (мал. 88, б) дазволіла падняць самалёты на вялікую вышыню, павялічыць скорасць і далёкасць іх палётаў.



Мал. 87

а



б



Мал. 88



Аднак інтэнсіўнае выкарыстанне цеплавых рухавікоў у энергетыцы і на транспарце адмоўна ўплывае на навакольнае асяроддзе.

Падчас работы цеплавых рухавікоў у паветра выкідваецца вялікая колькасць гарачай пары або газу, што прыводзіць да цеплавога забруджвання атмасферы. Шырокае выкарыстанне розных відаў паліва цягне за сабой павелічэнне ў атмасферы вуглякіслага газу (дыяксід вугляроду CO_2). Злучаючыся з вадзяной парай у атмасферы, вуглякіслы газ утварае вугальную кіслату, якая нават пры малых канцэнтрацыях, выпадаючы ў выглядзе кіслотнага дажджу, за стагоддзі разбурае цэглу, метал, мрамур.

Згаранне паліва на цеплавых электрастанцыях вядзе да назапашвання ў атмасферы чаднага газу (аксід вугляроду CO), які з'яўляецца атрутай для жывых арганізмаў. Напрыклад, пры згаранні 1 т бензіну ўтвараецца 60 кг аксиду вугляроду. Падчас работы аўтатранспарту разам з аксідам вугляроду ў атмасферу трапляюць злучэнні свінцу. Пры гарэнні паліва выкарыстоўваецца кісларод з атмасферы, што прыводзіць да паступовага змяншэння яго канцэнтрацыі ў паветры і, акрамя таго, утварэння аксідаў азоту (NO_x). Раствараючыся ў дажджавой вадзе, яны ператвараюцца ў азотную кіслату, а рэагуючы з разнастайнымі прымесямі, што змяшчаюцца ў паветры, утвараюць таксічныя злучэнні, якія выпадаюць на паверхню вады і сушы з кіслотнымі дажджамі. Гэта выклікае засаленне глебы, адкрытых і падземных вадаёмаў, гібель лясоў, парушэнне хімічнага саставу ў экасістэмах. Акрамя таго, у «кіслай» вадзе лепш раствараюцца такія атрутныя рэчывы, як кадмій, ртуць, свінец, якія знаходзяцца ў глебе і донных адкладах, а гэта ўплывае на чысціню вады, якую спажываюць людзі і жывёлы.

Пры палётах самалётаў і запусках ракет адбываецца разбурэнне аэравага слоя атмасферы, які засцерагае ўсё жывое на Зямлі ад лішку ультрафіялетавага выпраменьвання Сонца.

Вырашэнне праблем, якія ўзнікаюць пры згаранні паліва ў цеплавых рухавіках, вучоныя і канструктары бачаць:

а) у экалагізацыі тэхналагічных працэсаў (стварэнне безадходных і малаадходных тэхналогій, якія выключаюць пападанне ў атмасферу шкодных рэчываў); ачыстцы газавых выкідаў у атмасферу (улоўліванне і перапрацоўка вуглякіслага газу, аксідаў азоту і іншых таксічных рэчываў);

б) павелічэнні каэфіцыента карыснага дзеяння цеплавых рухавікоў, у прыватнасці, шляхам стварэння ўмоў для найбольш поўнага згарання паліва;

в) замене цеплавых рухавікоў на больш экалагічна чыстыя рухавікі, напрыклад электрычныя.

Дадаткова да пералічанага ў многіх краінах свету ў заканадаўчым парадку прыняты гранічна дапушчальныя нормы ўтрымання таксічных кампанентаў у

выхлапных газах. У Рэспубліцы Беларусь правіламі дарожнага руху забаронена эксплуатацыя аўтамабіляў, утрыманне аксиду вугляроду ў адпрацаваных газах якіх перавышае 1,5 %. Для выяўлення такіх транспартных сродкаў уведзена сістэма інструментальнага кантролю пры праходжанні дзяржаўнага тэхнічнага агляду.

Рацыянальная арганізацыя аўтамабільнага руху ў гарадах (будаўніцтва скарасных магістралей, дадатковых развязак і эстакад, што спрыяе змяншэнню колькасці святлафораў і ліквідацыі затораў) таксама дазволіць зменшыць шкодныя выкіды ў атмасферу пры эксплуатацыі транспартных сродкаў.



Колькасць цеплаты самаадвольна можа пераходзіць толькі ад больш нагрэтых цел да менш нагрэтых

Рухавікі, у якіх адбываецца ператварэнне часткі ўнутранай энергіі паліва пры згаранні ў механічную работу, называюць цеплавымі рухавікамі

Першы прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў — цыклічнасць (бесперапыннасць) іх работы

Другі прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў — сцісканне газу павінна адбывацца пры больш нізкай тэмпературы, чым яго расшырэнне

Цеплавы рухавік складаецца з нагрэвальніка, рабочага цела і халадзільніка

Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка — адносіны работы, якая выконваецца рабочым целам за цыкл, да колькасці цеплаты, атрыманай ім ад нагрэвальніка:

$$\eta_t = \frac{A_{ц}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$





1. Прывядзіце прыклады найбольш тыповых незваротных працэсаў.
2. Што называюць цеплавым рухавіком? Якія прыныцы пакладзены ў аснову стварэння цеплавых рухавікоў?
3. Для чаго прызначаны нагрэвальнік, халадзільнік і рабочае цела цеплага рухавіка?
4. Ці можа эфектыўны ККД цеплага рухавіка стаць роўны адзінцы, калі трэнне ў частках рухавіка звесці да нуля?
5. Ці можна ахаладзіць паветра ў пакоі, калі адкрыць дзверцы працуючага халадзільніка?



Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплага рухавіка $\eta_t = 20\%$. Вызначце работу, выкананую ім за цыкл, калі колькасць цеплаты, перададзена халадзільніку, $Q_2 = -1,2$ кДж.

Дадзена:

$$\eta_t = 20\%$$

$$|Q_2| = 1,2 \text{ кДж} =$$

$$= 1,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$A_{ц} = ?$

Рашэнне. Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплага рухавіка

$$\eta_t = \frac{A_{ц}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1},$$

дзе Q_1 — колькасць цеплаты, атрыманая рабочым целам ад нагрэвальніка. Тады

$$Q_1 = \frac{|Q_2|}{1 - \eta_t}.$$

$$\text{Такім чынам, } A_{ц} = \eta_t Q_1 = \frac{\eta_t |Q_2|}{1 - \eta_t}.$$

$$A_{ц} = \frac{0,20 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}}{0,80} = 0,30 \text{ кДж}.$$

Адказ: $A_{ц} = 0,30$ кДж.

Прыклад 2. Кожны з чатырох рухавікоў рэактыўнага самалёта на шляху $s = 5,0 \cdot 10^3$ км развівае сярэдняю сілу цягі $\langle F \rangle = 0,11$ МН. Вызначце аб'ём газу, зрасходаванай на гэтым шляху, калі эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння рухавіка $\eta_s = 24\%$. Шчыльнасць і ўдзельная цеплата згарання газу $\rho = 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ і $q = 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ адпаведна.

Дадзена: $s = 5,0 \cdot 10^3 \text{ км} =$ $= 5,0 \cdot 10^6 \text{ м}$ $\langle F \rangle = 0,11 \text{ МН} =$ $= 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н}$ $\eta_{\text{э}} = 24\%$ $\rho = 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $q = 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Рашэнне. Паводле азначэння, эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння, $\eta_{\text{э}} = \frac{A_{\text{карысн}}}{Q_{\text{поўн}}}$, дзе $A_{\text{карысн}} = 4\langle F \rangle s$ — карысная работа, выкананая ўсімі чатырма рухавікамі самалёта; $Q_{\text{поўн}} = q\rho V$ — колькасць цеплаты, якая выдзяляецца пры поўным згаранні газы на шляху s . Тады $\eta_{\text{э}} = \frac{4\langle F \rangle s}{q\rho V}$, адкуль $V = \frac{4\langle F \rangle s}{\eta_{\text{э}} q\rho}$.
$V = ?$	$V = \frac{4 \cdot 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot 5,0 \cdot 10^6 \text{ м}}{0,24 \cdot 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 2,7 \cdot 10^2 \text{ м}^3.$
Адказ: $V = 2,7 \cdot 10^2 \text{ м}^3$.	

Практыкаванне 11

1. За цыкл рабочае цела цеплавога рухавіка атрымлівае ад награвальніка колькасць цеплаты $Q_1 = 800 \text{ Дж}$ і перадае халадзільніку колькасць цеплаты $Q_2 = -600 \text{ Дж}$. Вызначце тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка.

2. Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка $\eta_t = 20\%$. Вызначце колькасць цеплаты, якая перададзена рабочаму целу ад награвальніка, калі за цыкл рабочым целам выканана работа $A_{\text{ц}} = 300 \text{ Дж}$.

3. Матацыкл на працягу пэўнага прамежку часу рухаецца са скорасцю, модуль якой $v = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Пры гэтым расход бензіну на шляху $s = 100 \text{ км}$ складае $V_0 = 4,0 \text{ л}$. Вызначце сярэдняю магутнасць рухавіка матацыкла, калі эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння рухавіка $\eta_{\text{э}} = 25\%$. Шчыльнасць і ўдзельная цеплата згарання бензіну $\rho = 7,1 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ і $q = 46 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ адпаведна.

4. Для работы рухавіка электрагенератара, эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння якога $\eta_{\text{э}} = 20,0\%$, падрыхтавана цыстэрна дызельнага паліва аб'ёмам $V = 62,0 \text{ м}^3$. Вызначце, на колькі рабочих дзён хопіць гэтага паліва, калі сярэдняя магутнасць рухавіка падчас работы $\langle P \rangle = 150 \text{ кВт}$ і працягласць рабочага дня рухавіка $t = 7,00 \text{ г}$. Шчыльнасць і ўдзельная цеплата згарання дызельнага паліва $\rho = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ і $q = 42,0 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ адпаведна.



Абагульненне і сістэматызацыя ведаў

АСНОВЫ

Унутраная энергія макраскапічнага цела — алгебраічная сума кінетычнай энергіі цеплавога руху ўсіх часціц, якія ўтвараюць цела, і патэнцыяльнай энергіі іх узаемадзеяння

Змяненне ўнутранай энергіі ідэальнага газу пры пераходзе тэрмадынамічнай сістэмы з аднаго стану ў другі залежыць толькі ад значэнняў параметраў гэтых станаў і не залежыць ад працэсу пераходу

Унутраная энергія і яе змяненне для дадзенай масы ідэальнага аднаатамнага газу

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{3}{2}kTN = \frac{3}{2}kT\nu N_A = \\
 &= \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT = \frac{3}{2}pV \\
 \Delta U &= \frac{3}{2}\nu R\Delta T = \frac{3}{2}\Delta(pV) = \\
 &= \frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1)
 \end{aligned}$$

$$Q = \Delta U + A$$

$$\begin{aligned}
 p &= \text{const} \\
 Q &= \Delta U + p\Delta V
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V &= \text{const} \Rightarrow \\
 A &= 0 \\
 Q &= \Delta U
 \end{aligned}$$

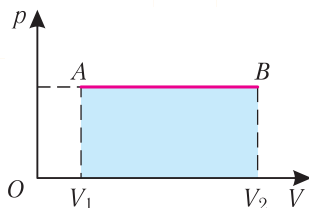
Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка

$$\eta_t = \frac{A_{ц}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$

ТЭРМАДЫНАМІКІ

Работа, выкананая над разгляданым целам, ёсць работа сіл, прыкладзеных да гэтага цела з боку ўсіх астатніх (знешніх) цел, з якімі яно ўзаемадзейнічае і якія ажыццяўляюць перадачу энергіі

Сіла ціску газу і знешнія сілы выконваюць работу толькі ў працэсе змянення аб'ёму газу. Работа газу лікава роўная плошчы фігуры, абмежаванай графікам залежнасці ціску ад аб'ёму, восьсю OV і прамымі, якія адпавядаюць значэнням аб'ёмаў V_1 і V_2 . Плошча фігуры (работа газу) залежыць ад віду працэсу



Пры ізабарным працэсе ($p = \text{const}$)
 $A = p\Delta V$

Першы закон тэрмадынамікі

Цеплавая рухавікі

Эфектыўны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка

$$\eta_s = \frac{Pt}{qm}$$

Колькасць цеплаты — колькасць унутранай энергіі, якой цела абменьваецца з навакольным асяроддзем пры цеплаабмене — самаадвольным працэсе перадачы энергіі ад цела з большай тэмпературай цела з меншай тэмпературай без выканання работы

$$Q = qm$$

$$Q = cm(T_2 - T_1)$$

$$Q_{\text{п}} = Lm, \\ Q_{\text{к}} = -Lm$$

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m, \\ Q_{\text{кр}} = -\lambda m$$

Цеплаабмен пры пераходзе з аднаго стану ў другі

$$\Delta U = A' + Q$$

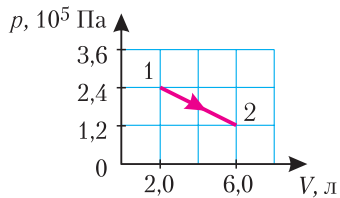
$$T = \text{const} \Rightarrow \Delta U = 0 \\ Q = A$$



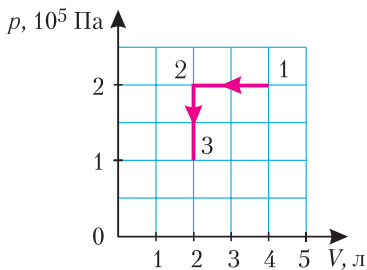
Заданні для самакантролю

1. Вызначце адносіны ўнутранай энергіі неону да ўнутранай энергіі гелію, колькасць рэчыва якіх $\nu_{\text{He}} = 1$ моль і $\nu_{\text{Ne}} = 3$ моль, калі яны знаходзяцца пры аднолькавай тэмпературы.

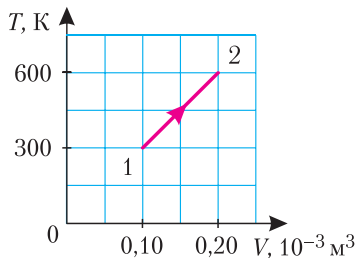
2. На малюнку 89 прыведзены графік працэсу пераходу ідэальнага аднаатамнага газу са стану 1 у стан 2. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу ў гэтым працэсе.



Мал. 89



Мал. 90



Мал. 91

8. Гелій, узяты ў колькасці $\nu = 2,00$ моль, ізабарна расшыраецца. Пры гэтым сіла ціску газу выконвае работу $A = 7,20$ кДж. Канцэнтрацыя атамаў газу

3. На малюнку 90 прыведзены графік працэсу пераходу ідэальнага аднаатамнага газу пэўнай масы са стану 1 у стан 3. Вызначце адносіны значэнняў унутранай энергіі газу ў пачатковым і канчатковым станах.

4. У балоне знаходзіцца ідэальны аднаатамны газ, колькасць рэчыва якога $\nu = 2,4$ моль, тэмпература $T_1 = 420$ К. У выніку ізахорнага пераходу з аднаго стану ў другі ціск газу зменшыўся ад $p_1 = 860$ кПа да $p_2 = 655$ кПа. Вызначце прырашчэнне ўнутранай энергіі газу.

5. Пры ізабарным сцісканні азоту N_2 знешняя сіла выканала работу $A' = 400$ Дж. Пры гэтым абсалютная тэмпература газу паменшылася ад $T_1 = 480$ К да $T_2 = 300$ К. Вызначце масу азоту.

6. Графік цыклічнага працэсу ў ідэальным газе складаецца з адрэзкаў прамых, якія злучаюць пункты з каардынатамі $A (1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; 1,5 \text{ л})$, $B (1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; 4,5 \text{ л})$ і $C (0,60 \cdot 10^5 \text{ Па}; 1,5 \text{ л})$. Вызначце работу, выкананую сілай ціску газу за цыкл.

7. На малюнку 91 прыведзены графік расшырэння ідэальнага газу, узятага ў колькасці $\nu = 1,0$ моль. Вызначце работу, выкананую сілай ціску газу пры яго пераходзе са стану 1 у стан 2.

ў канчатковым стане ў $\alpha = 3,00$ раза меншая, чым у пачатковым, а яго маса не мяняецца. Вызначце пачатковую тэмпературу гелію.

9. На малюнку 92 прыведзены графікі залежнасці тэмпературы ад часу для цвёрдых крышталічных цел A і B . Карысная магутнасць награвальнікаў у абодвух выпадках аднолькавая, а страты энергіі можна не ўлічваць. Выберыце два правільныя сцвярджэнні.

1) Тэмпература цела A расце ў чатыры разы хутчэй, чым тэмпература цела B .

2) Цела A атрымлівае ў два разы большую колькасць цеплаты, чым цела B .

3) Целы A і B могуць складацца з аднаго рэчыва, але маса m_A цела A ўдвая меншая, чым маса m_B цела B .

4) Целы A і B могуць мець аднолькавую масу, але ўдзельная цеплаёмістасць c_A цела A ў цвёрдым стане ўдвая меншая, чым удзельная цеплаёмістасць c_B цела B у цвёрдым стане.

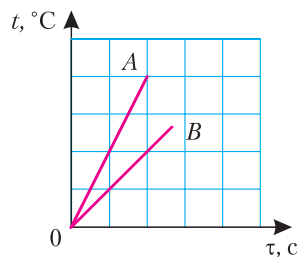
5) Целы A і B могуць мець аднолькавую масу, але ўдзельная цеплаёмістасць c_A цела A ў цвёрдым стане ўдвая большая за ўдзельную цеплаёмістасць c_B цела B у цвёрдым стане.

10. Жалезны асколак падае са стану спакою з вышыні $h = 800$ м. Модуль скорасці руху асколка ў момант падзення на паверхню Зямлі $v = 35 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Вызначце прырашчэнне тэмпературы асколка за час падзення. Удзельная цеплаёмістасць жалеза $c = 460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Страты энергіі ў навакольнае асяроддзе не прымаць пад увагу.

11. У цеплаізаляваную пасудзіну з вадой, маса і тэмпература якой $m_B = 1,6$ кг і $t_{0B} = 8,0$ °С адпаведна, апусцілі кавалак лёду масай $m_L = 0,80$ кг. Пасля таго як устанавілася цеплая раўнавага, выявілася, што маса лёду павялічылася на $\Delta m = 20$ г. Вызначце пачатковую тэмпературу лёду. Удзельная

цеплаёмістасць вады $c_B = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; для лёду: удзельная цеплаёмістасць $c_L = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, удзельная цеплата плаўлення $\lambda = 3,4 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, тэмпература плаўлення $t_{пл} = 0,0$ °С. Цеплаёмістасць пасудзіны не прымаць пад увагу.

12. У цеплаізаляванай пасудзіне знаходзіцца вада масай $m_1 = 1,2$ кг, тэмпература якой $t = 0$ °С. З пасудзіны адпампоўваюць вільготнае паветра, у выніку чаго вада ў пасудзіне крышталізуецца. Вызначце масу ўтворанага лёду. Удзельная цеплата параўтварэння вады пры тэмпературы $t = 0$ °С складае $L = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, а ўдзельная цеплата плаўлення лёду $\lambda = 3,4 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.



Мал. 92

13. Пры перадачы ідэальнаму аднаатамнаму газу колькасці цеплаты $Q = 60$ Дж яго тэмпература павялічылася пры пастаянным ціску на $\Delta T = 10$ К. Вызначце колькасць рэчыва газу.



Мал. 93

14. Пры ізабарным расшырэнні гелію масай $m = 20$ г яго аб'ём павялічыўся ў $\alpha = 2,0$ раза. Пачатковая тэмпература гелію $T_1 = 300$ К. Вызначце работу, выкананую сілай ціску газу пры яго расшырэнні, і атрыманую газам колькасць цеплаты.

15. З ідэальным газам пэўнай масы ажыццёўлены працэс, графік якога прыведзены на малюнку 93. Вызначце: а) на якіх участках графіка работа газу дадатная; б) на якіх участках графіка газ атрымліваў энергію, а на якіх — аддаваў. Запоўніце табліцу ў шшытку.

Участак графіка	Работа сілы ціску газу	Колькасць цеплаты	Прырашчэнне ўнутранай энергіі газу
$1 \rightarrow 2$			
$2 \rightarrow 3$			
$3 \rightarrow 1$			



Тэмы практных заданняў да часткі «Малекулярная фізіка»

1. Парадак і хаос у свеце малекул.
2. Роля дыфузіі ў прыродзе.
3. Вымярэнне тэмпературы і залежнасць яе значэння ад знешніх фактараў.
4. Крышталі ў прыродзе і жыцці чалавека.
5. Выпарэнне і кандэнсацыя ў прыродзе.
6. Значэнне выпарэння ў жыцці жывых істот.
7. Вільготнасць паветра і яе ўплыў на здароўе чалавека.
8. Прыродныя з'явы: утварэнне туману і выпадзенне расы.
9. Цеплавая рухавікі і іх уплыў на навакольнае асяроддзе.
10. Аўтамабільны транспарт і экалогія.
11. Эвалюцыя аўтамабільных рухавікоў.
12. Вечны рухавік: міф ці рэальнасць?





Усе вядомыя фізічныя з’явы звязаны з тым ці іншым узаемадзеяннем цел або часціц. Напрыклад, рух Месяца вакол Зямлі, падзенне цел на паверхню Зямлі, адхіленне адвеса ад вертыкальнага становішча паблізу масіўнай гары абумоўлены гравітацыйным узаемадзеяннем гэтых цел. Да гравітацыйнага ўзаемадзеяння схільныя ўсе целы, аднак прыкметным яно становіцца толькі тады, калі хоць бы адно з цел, якія ўзаемадзейнічаюць, валодае дастаткова вялікай масай.

Малекулы любога рэчыва таксама ўдзельнічаюць ва ўзаемным прыцяжэнні, абумоўленым сіламі сусветнага прыцягнення. Але паколькі масы малекул вельмі малыя, гэтае ўзаемадзеянне звычайна не бяруць пад увагу. Прыцяжэнне і адштурхванне малекул, якія забяспечваюць існаванне цвёрдых і вадкіх цел, маюць зусім іншую прыроду — электрамагнітную.

Электрамагнітнае ўзаемадзеянне ажыццяўляецца з прычыны існавання асаблівага віду матэрыі — *электрамагнітнага поля* — сукупнасці двух узаемазвязаных палёў: электрычнага і магнітнага.

Электрамагнітнае ўзаемадзеянне праяўляецца ва ўсіх электрычных, магнітных і аптычных з’явах. Дзякуючы яму вы бачыце навакольны свет, бо святло — адна з праяў электрамагнітнага поля. Гэтым жа ўзаемадзеяннем абумоўлены сілы пругкасці і сілы трэння, вядомыя вам з механікі. Электрамагнітнае ўзаемадзеянне вызначае ўласцівасці рэчываў у розных агрэгатных станах і іх хімічныя пераўтварэнні. Паколькі малекулярныя сілы электрамагнітныя па прыродзе, то практычна ўсе біялагічныя з’явы абумоўлены электрамагнетызмам.

Электрадынаміка — раздзел фізікі, у якім вывучаюць электрамагнітнае ўзаемадзеянне паміж электрычна зараджанымі цэламі і часціцамі.



Тэрмін «электрадынаміка» ўвёў у фізіку французскі вучоны Андрэ Мары Ампер (1775–1836) у 1822 г.

Пры вивучэнні электрадынамікі вы пазнаёміцеся з законамі ўзаемадзеяння цел (часціц), якія валодаюць электрычнымі зарадамі, асаблівасцямі ўпарадкаванага руху зараджаных часціц, фізічнымі велічынямі, якія характарызуюць электрычныя і магнітныя палі.

У 10-м класе ў раздзеле «Электрадынаміка» вы будзеце вивучаць наступныя тэмы: «Электростатыка», «Пастаянны электрычны ток», «Магнітнае поле. Электрамагнітная індукцыя» і «Электрычны ток у розных асяроддзях».

РАЗДЗЕЛ 3

ЭЛЕКТРАСТАТЫКА



Электростатыка — раздзел электрадынамікі, у якім вывучаюць ўзаемадзеянне *нерухомых* у некаторай інерцыяльнай сістэме адліку электрычна зараджаных цел, размеркаванне зараду на якіх не змяняецца з цягам часу, а таксама электростатычныя палі, створаныя зарадамі такіх цел.

Тэрмін «электростатыка» ўвёў Ампер у 1822 г.

Падмуркам электростатыкі з’яўляюцца эксперыментальныя навуковыя факты, якія адлюстроўваюць паводзіны зараджаных цел пры іх электрычным узаемадзеянні. Ядро электростатыкі складаюць закон захавання электрычнага зараду, які шляхам доследаў устанавіў у 1759 г. пецяярбургскі акадэмік Франц Эпінус (1724–1802), і закон ўзаемадзеяння пунктавых зарадаў у спакоі, які эксперыментальна адкрыў у 1785 г. французскі вучоны Шарль Кулон (1736–1806).

§ 16. Электрычны зарад. Закон захавання электрычнага зараду

Што азначае наяўнасць электрычнага зараду ў цела або часціцы? Як узаемадзейнічаюць электрычна зараджаныя целы?

Электрычны зарад. Пра тое, што бурштын, пацёрты аб шэрсць, набывае ўласцівасць прыцягваць лёгкія прадметы (мал. 94), ведалі яшчэ старажытныя грэкі. Аднак толькі ў 1600 г. лейб-медык каралевы Англіі доктар медыцыны Уільям Гільберт у кнізе «Аб магніце, магнітных целах і вялікім магніце — Зямлі» даў



Мал. 94

першае сістэматызаванае апісанне ўласцівасцей электрычных і магнітных матэрыялаў. Гільберт прадэманстраваў, што акрамя бурштыну ўласцівасцю прыцягваць лёгкія прадметы валодаюць пасля націрання алмаз, сера, фарфор і многія іншыя целы. Ён назваў іх электрычнымі (электрон па-грэчаскі — бурштын). Цяпер мы гаворым, што такія целы электрычна зараджаныя, гэта значыць ім перададзены *электрычны зарад*.

Электричны зарад — фізічная скалярная велічыня, якая характарызуе інтэнсіўнасць электрамагнітнага ўзаемадзеяння цел (часціц).

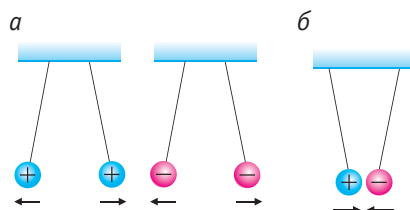
Электричны зарад, як і маса, не існуе без цела або часціцы, а зарад любой сістэмы цел (часціц) роўны суме зарадаў цел (часціц), якія ўваходзяць у сістэму.



Існуюць два віды електричных зарадаў, якія дамовіліся называць дадатнымі і адмоўнымі. Прычым пры ўзаемадзеянні аднайменна зараджаных цел (часціц) адштурхваюцца адно ад аднаго (мал. 95, а), а рознаіменна зараджаных — прыцягваюцца паміж сабой (мал. 95, б).

Зарады розных цел (часціц) могуць адрознівацца не толькі знакамі, але і лікавымі значэннямі.

За адзінку електричнага зараду ў СІ прыняты кулон (Кл). Гэтая адзінка названа ў гонар Шарля Кулона (1736–1806). 1 Кл — велічыня електричнага зараду, які праходзіць праз папярочнае сячэнне правадніка за прамежак часу 1 с пры сіле пастаяннага току 1 А.



Мал. 95

Цікава ведаць

Адзін кулон — вельмі вялікая адзінка зараду. Разлікі паказваюць, што дыяметр аддаленага ад астатніх цел металічнага шара, што знаходзіцца ў сухім паветры, павінен быць роўны не менш як 110 м, каб на ім мог знаходзіцца залішні зарад 1 Кл. Разам з тым у час уключэння аўтамабільных фар сіла току ў ланцугу прыблізна 10 А, гэта значыць штосекундна праз папярочнае сячэнне праваднікоў, далучаных да фар, праходзіць зарад прыблізна 10 Кл.

Элементарны зарад. На мяжы XIX і XX стагоддзяў вучоныя эксперыментальна вызначылі, што ў прыродзе існуе електричны зарад, модуль якога мінімальны. Гэты зарад назвалі *элементарным*. Вы ведаеце, што ядры ўсіх атамаў змяшчаюць пратоны, якія з'яўляюцца носьбітамі дадатнага элементарнага зараду, а самі атамы ўтрымліваюць электроны, якія з'яўляюцца носьбітамі адмоўнага элементарнага зараду. Вучоныя з дакладнасцю $\sim 10^{-20}$ устанавілі роўнасць модуляў зарадаў электрона і пратона.

Модуль элементарнага електричнага зараду $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл. Звычайна абмяжоўваюцца дзвюма значнымі лічбамі: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электроны, пратоны і нейтроны змяшчаюць усе целы, бо з іх складаюцца атамы і малекулы любога рэчыва*. У электрычна нейтральным целе алгебраічная сума зарадаў усіх часціц роўная нулю. Калі якім-небудзь чынам стварыць у такім целе лішак зарадаў аднаго знака, то яно стане зараджаным. Зарад цела q утвараецца сукупнасцю элементарных зарадаў і заўсёды кратны элементарнаму зараду e (электрычны зарад дыскрэтны):

$$q = e(N_p - N_e),$$

дзе N_p і N_e — колькасць пратонаў і электронаў у дадзеным целе.

Напрыклад, цела, зарад якога $q_1 = 5e$, адрозніваецца ад нейтральнага цела недахопам пяці электронаў, а цела, зарад якога $q_2 = -13e$, — лішкам трынаццаці электронаў.

Ад тэорыі да практыкі

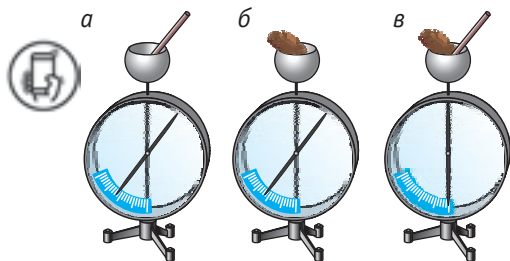
Мы адзначалі, што 1 Кл — гэта вельмі вялікі зарад. Якому лішку (недахопу) электронаў у целе адпавядае гэты зарад?



Цікава ведаць

У адным молі рэчыва ($\sim 6 \cdot 10^{23}$ малекул) зараджанага цела звычайна змяшчаецца адносна невялікая колькасць электронаў (да $\sim 1 \cdot 10^{10}$), якія з'яўляюцца залішнімі або адсутнічаюць у параўнанні з колькасцю пратонаў. Паколькі маса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, то гэта выклікае змену масы аднаго моля зараджанага цела не больш чым на $9 \cdot 10^{-31}$ кг $\cdot 1 \cdot 10^{10} = 9 \cdot 10^{-21}$ кг у параўнанні з масай нейтральнага цела. Такую змену масы, вядома, можна не ўлічваць.

Закон захавання электрычнага зараду. Вы ведаеце, што пры трэнні судакранутыя целы электрызуюцца, пры гэтым модулі супрацьлеглых па знаку зарадаў, якія ўзніклі на целах, роўныя. Правярым гэта падчас доследу. Наэлектрызуем трэннем адно аб адно два целы — эбанітавую палачку і кавалачак футра або шарсцяной тканіны. Змесцім па чарзе ўнутр металічнай сферы, замацаванай на стрыжні электрометра, эбанітавую палачку (мал. 96, а) і кавалачак футра (мал. 96, б). Стрэлка электрометра адхіліцца, прычым як у першым, так і ў другім выпадку на



Мал. 96

* Выключэннем з'яўляецца вадарод, у якога ядры атамаў — пратоны.

аднолькавыя вуглы. Калі адначасова апусціць унутр сферы эбанітавую палачку і кавалачак футра (мал. 96, в), то стрэлка электромметра застанецца на месцы. Значыць, модулі зарадаў абодвух цел роўныя, а іх знакі супрацьлеглыя.

Вінікі шматлікіх эксперыментаў дазволілі сфармуляваць сцвярдженне, якое з'яўляецца фундаментальным законам прыроды — **законам захавання электрычнага зараду**: у электрычна ізаляванай сістэме пры любых узаемадзеяннях алгебраічная сума электрычных зарадаў застаецца пастаяннай:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const},$$

дзе n — колькасць зарадаў у сістэме.

Прынята лічыць сістэму цел (часціц) *электрычна ізаляванай*, калі паміж ёй і знешнімі цэламі няма абмену электрычна зараджанымі часціцамі.

Закон захавання электрычнага зараду паказвае на важную асаблівасць электрычных з'яў: электрычныя зарады заўсёды з'яўляюцца парамі. Так, напрыклад, пры электрызацыі трэннем целы набываюць зарады супрацьлеглых знакаў, модулі якіх аднолькавыя.

Ад тэорыі да практыкі

Ці можна пры электрызацыі трэннем зарадзіць толькі адно з першапачаткова электрычна нейтральных цел, што знаходзяцца ў судакрананні?



Электрычны зарад — фізічная скалярная велічыня, якая характарызуе інтэнсіўнасць электрамагнітнага ўзаемадзеяння цел (часціц)

Электрычныя зарады існуюць двух відаў: дадатныя і адмоўныя

Аднайменна зараджаныя часціцы адштурхваюцца, а рознайменна — прыцягваюцца

Электрычны зарад дыскрэтны, гэта значыць электрычны зарад любой часціцы або цела з'яўляецца цэлым кратным элементарнаму электрычнаму зараду

Існуе зарад, модуль якога мінімальны, які называюць элементарным:
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Закон захавання электрычнага зараду: у электрычна ізаляванай сістэме пры любых узаемадзеяннях алгебраічная сума электрычных зарадаў застаецца пастаяннай: $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$



3 гісторыі фізікі

Закон захавання электрычнага зараду ўпершыню быў сфармуляваны і эксперыментальна пацверджаны М. Фарадэем у 1843 г.



1. Растлумачце электрызацыю цел пры судакрананні. Чаму пры электрызацыі зараджаюцца абодва целы?
2. Што характарызуе электрычны зарад?
3. Якія віды электрычных зарадаў існуюць у прыродзе? Як узаемадзейнічаюць аднайменна зараджаныя часціцы? рознаіменна зараджаныя?
4. Які зарад называюць элементарным?
5. У чым праяўляецца ўласцівасць дыскрэтнасці электрычнага зараду?



6. Сфармулюйце закон захавання электрычнага зараду. Якія ўмовы прымяняльнасці гэтага закона?

Практыкаванне 12

1. Ці можна пры электрызацыі шкляной палачкі аб шоўк надаць ёй зарад $q = 4,8 \cdot 10^{-21}$ Кл?

2. Металічны шарык мае $N = 5,0 \cdot 10^5$ залішніх электронаў. Вызначце яго электрычны зарад.

3. Два аднолькавыя металічныя шарыкі замацаваны так, што адлегласць паміж імі істотна большая за іх памеры (мал. 97). Вызначце, які зарад будзе на такім самым трэцім шарыку, калі ім спачатку дакрануцца да першага шарыка, а затым да другога. Першапачатковыя зарады шарыкаў: $q_1 = 3e$; $q_2 = -8e$ і $q_3 = 5e$.



Мал. 97

4. Вызначце сумарны зарад усіх пратонаў, якія змяшчаюцца ў вадзе аб'ёмам $V = 10$ см³ (дзе чайныя лыжкі).

5. Два аднолькавыя металічныя шары, электрычныя зарады якіх $q_1 = -4,0 \cdot 10^{-14}$ Кл і $q_2 = 2,0 \cdot 10^{-13}$ Кл, прывялі ў судакрананне. Вызначце лік электронаў, якія перайшлі з першага шара на другі.



§ 17. Узаемадзеянне пунктавых зарадаў. Закон Кулона

Электрычна зараджаныя целы (часціцы) узаемадзейнічаюць адно з адным. Але як вызначыць сілу, з якой адно зараджанае цела прыцягвае або адштурхвае другое?

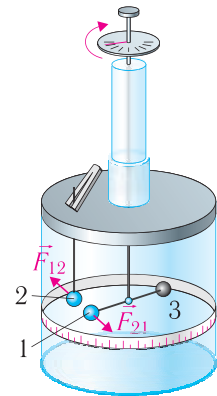
Вы ўжо сустракаліся з фізічнымі мадэлямі пры вывучэнні механікі (матэрыяльны пункт) і малекулярнай фізікі (ідэальны газ). У электростатыцы пры вывучэнні ўзаемадзеяння электрычна зараджаных цел эфектыўнай з'яўляецца мадэль «пунктавы зарад».

Пунктавы зарад — зарад такога зараджанага цела, памеры якога значна меншыя за адлегласць ад гэтага цела да пункта назірання і да іншых цел (гэта значыць памеры зараджанага цела ва ўмовах дадзенай задачы можна не прымаць пад увагу).

Успомніце, закон сусветнага прыцягнення таксама сфармуляваны для пунктавых цел (матэрыяльных пунктаў).

Закон Кулона. Кулон дэталёва даследаваў узаемадзеянне нерухомых пунктавых зарадаў. Ён шляхам доследаў вывучыў залежнасць сіл электрычнага ўзаемадзеяння цел ад модуляў зарадаў гэтых цел і адлегласці паміж імі.

У сваіх доследах Кулон выкарыстоўваў спецыяльную прыладу — круцільныя вагі (мал. 98). Круцільныя вагі ўяўляюць з сябе два шкляныя цыліндры, унутры якіх на тонкай сярэбранай нітцы падвешаны лёгкі непроводны каромысел. На адным канцы каромысла замацаваны праводны шар 1, а на другім — папяровая процівага 3. Шар 1 можна зараджаць з дапамогай такога самага праводнага шара 2. Ён знаходзіцца на ізаляючым стрыжні, які замацаваны на накрыўцы ніжняга цыліндра. У час судакранання шара 1 з зараджаным шарам 2 зарад размяркоўваецца паміж імі пароўну, і шары адштурхваюцца. Па вугле закручвання ніткі, які адлічваецца па шкале прылады, можна вызначыць сілу ўзаемадзеяння зараджаных шароў.



Мал. 98



Правёўшы вялікую колькасць доследаў, Кулон вызначыў, што модулі сіл узаемадзеяння двух зараджаных шароў $|\vec{F}_{21}| = |\vec{F}_{12}| = F$ адваротна прапарцыянальны квадрату адлегласці паміж імі $F \sim \frac{1}{r^2}$ і прама прапарцыянальны здабытку модуляў электрычных зарадаў кожнага з іх:

$$F \sim |q_1| \cdot |q_2|.$$

Абагульніўшы эксперыментальныя даныя, Кулон сфармуляваў закон, які атрымаў яго імя.

Закон Кулона: модулі сіл узаемадзейння двух нерухомых пунктавых зараджаных цел у вакууме прама прапарцыянальныя здабытку модуляў зарадаў гэтых цел, адваротна прапарцыянальныя квадрату адлегласці паміж імі, а самі сілы накіраваны ўздоўж прамой, якая злучае гэтыя целы:

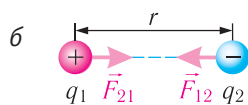
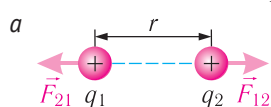
$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (17.1)$$

дзе k — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які залежыць ад выбару адзінак фізічных велічынь; $|q_1|$ і $|q_2|$ — модулі пунктавых зарадаў; r — адлегласць паміж імі.

У СІ каэфіцыент прапарцыянальнасці

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2},$$

дзе $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — *электрычная пастаянная*.



Мал. 99

Сілы \vec{F}_{21} і \vec{F}_{12} узаемадзейння нерухомых пунктавых зарадаў (мал. 99) называюць *кулонаўскімі сіламі*. У адпаведнасці з трэцім законам Ньютана гэтыя сілы супрацьлегла накіраваныя $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, а іх модулі роўныя. Адзначым, што сілы электрстатычнага ўзаемадзейння з'яўляюцца сіламі адштурхвання для аднайменных зарадаў (мал. 99, а) і сіламі прыцяжэння для рознаіменных (мал. 99, б).

Ад тэорыі да практыкі

Два маленькія дадатна зараджаныя шарыкі замацаваны на адлегласці r адзін ад аднаго. Як зменіцца модуль сіл электрстатычнага ўзаемадзейння шарыкаў, калі: 1) паменшыць зарад кожнага шарыка ў чатыры разы; 2) павялічыць адлегласць паміж шарыкамі ў чатыры разы; 3) павялічыць зарад кожнага шарыка і адлегласць паміж імі ў два разы?

Як змяніліся б сілы электрстатычнага ўзаемадзейння шарыкаў, калі б:

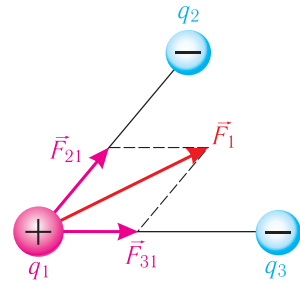
1) шарыкі былі зараджаныя адмоўна; 2) адзін з шарыкаў зараджаны адмоўна, а другі дадатна?



Узаемадзейненне сістэмы пунктавых зарадаў. Эксперыментальным шляхам вызначылі, што сілы ўзаемадзейння двух пунктавых зарадаў не змяняюцца пры з'яўленні трэцяга пунктавага зараду або любой колькасці пунктавых зарадаў. У гэтым выпадку сілы ўздзеяння \vec{F}_{21} , \vec{F}_{31} , ..., \vec{F}_{n1} кожнага з зарадаў q_2 , q_3 , ..., q_n на зарад q_1 вызначаюць па законе Кулона. Рэзультуючая сіла з'яўляецца век-

тарнай сумай сіл, якімі кожны з гэтых зарадаў паасобку ўздзейнічае на зарад q_1 (прынцып суперпазіцыі).

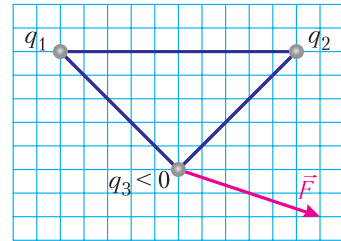
Выкарыстоўваючы прынцып суперпазіцыі і закон Кулона, можна апісаць электростатычнае ўзаемадзеянне любой сістэмы пунктавых зарадаў. На малюнку 100 паказаны тры пунктавыя электрычныя зарады, якія ўзаемадзейнічаюць паміж сабой: $q_1 > 0$, $q_2 < 0$, $q_3 < 0$. Рэзультуючай сіл, якія дзейнічаюць на зарад q_1 з боку зарадаў q_2 і q_3 , з'яўляецца сіла \vec{F}_1 , роўная вектарнай суме сіл \vec{F}_{21} і \vec{F}_{31} : $\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31}$. Сілы \vec{F}_{21} і \vec{F}_{31} уздзеяння зарадаў q_2 і q_3 на зарад q_1 вызначаюць паводле закона Кулона.



Мал. 100

Ад тэорыі да практыкі

Пунктавыя зарады q_1 , q_2 і q_3 замацаваны ў вяршынях трохвугольніка. Напрамак рэзультуючай электростатычнай сілы, якая дзейнічае на адмоўны зарад q_3 з боку зарадаў q_1 і q_2 , паказаны на малюнку 101. Якія знакі маюць зарады q_1 і q_2 ?



Мал. 101



Цікава ведаць

Паняцце электрычнага зараду ў пэўнай ступені нагадвае паняцце гравітацыйнай масы. Электрычны зарад вызначае інтэнсіўнасць электрамагнітных узаемадзеянняў, а маса — гравітацыйных. Закон Кулона, які апісвае электростатычнае ўзаемадзеянне, фармальна падобны на закон сусветнага прыцягнення Ньютана, які вызначае сілы гравітацыйнага ўзаемадзеяння:

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

У абодвух выпадках модуль сіл узаемадзеяння:

- адваротна прапарцыянальны квадрату адлегласці паміж матэрыяльнымі пунктамі;
- прама прапарцыянальны велічыням, якія характарызуюць тыя ўласцівасці цел (матэрыяльных пунктаў), якія вызначаюць узаемадзеянні, — масам у адным выпадку і электрычным зарадам — у другім.

Для вымярэння сіл электрычнага адштурхвання (Ш. Кулон, 1785) і гравітацыйнай пастаяннай (Г. Кавендыш, 1788 г.) вучоныя выкарыстоўвалі падобныя па будове эксперыментальныя прылады.



Аднак паміж сіламі гравітацыйнага і электрстатычнага ўзаемадзеянняў ёсць істотнае адрозненне. Ньютанаўскія сілы прыцягнення — гэта заўсёды сілы прыцяжэння. Кулонаўскія ж сілы ўзаемадзеяння зарадаў могуць быць як сіламі прыцяжэння (паміж рознаіменнымі зарадамі), так і сіламі адштурхвання (паміж аднайменнымі зарадамі).

Дыэлектрычная пранікальнасць рэчыва. З доследаў вынікае, што ўзаемадзеянне электрычна зараджаных цел у паветры практычна не адрозніваецца ад іх узаемадзеяння ў вакууме. Калі зараджаныя целы знаходзяцца ў вадзе, газе, алеі або якім-небудзь іншым непроводным асяроддзі, то модуль сіл іх узаемадзеяння будзе меншы, чым у вакууме. Каб улічыць уплыў асяроддзя, увялі яго адмысловую характарыстыку, названую *дыэлектрычнай пранікальнасцю*.

Дыэлектрычная пранікальнасць рэчыва — фізічная велічыня, якая паказвае, у колькі разоў модуль сіл электрстатычнага ўзаемадзеяння зарадаў у дадзеным аднародным асяроддзі меншы, чым модуль сіл узаемадзеяння гэтых жа зарадаў у вакууме:

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F}, \quad (17.2)$$

дзе F_0 і F — модулі сіл электрстатычнага ўзаемадзеяння зарадаў у вакууме і ў аднародным асяроддзі адпаведна.

З улікам суадносін (17.2) закон Кулона можна запісаць наступным чынам:

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

Дыэлектрычная пранікальнасць вакууму роўная 1. За 1 прымаюць і дыэлектрычную пранікальнасць паветра, бо яна мае значэнне (пры нармальным атмасферным ціску) 1,0006. Дыэлектрычныя пранікальнасці іншых аднародных асяроддзяў заўсёды большыя за адзінку. Напрыклад, дыэлектрычная пранікальнасць вады 81, гліцэрыны — 56, а газы — 2.

Ад тэорыі да практыкі

Як і ў колькі разоў адрозніваюцца модулі сіл электрстатычнага ўзаемадзеяння двух пунктавых зарадаў, якія знаходзяцца на аднолькавай адлегласці адзін ад аднаго ў вадзе, газе і гліцэрыне?

Цікава ведаць

Дыэлектрычная пранікальнасць дыстыляванай вады пры тэмпературы 25 °C роўная 78,54, а пры тэмпературы 0 °C — 88. Звычайна без указання тэмпературы дыэлектрычную пранікальнасць вады лічаць роўнай 81.



Пунктавы зарад — зарад такога зараджанага цела, памеры якога значна меншыя за адлегласць ад гэтага цела да пункта назірання і да іншых цел (гэта значыць памеры зараджанага цела ва ўмовах дадзенай задачы можна не прымаць пад увагу)

Закон Кулона: модулі сіл узаемадзеяння двух нерухомых пунктавых зараджаных цел у вакууме прама прапарцыянальныя здабытку модуляў зарадаў гэтых цел, адваротна прапарцыянальныя квадрату адлегласці паміж імі, а самі сілы накіраваны ўздоўж прамой, якая злучае гэтыя целы

У вакууме

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

У аднародным асяроддзі

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

Каэфіцыент прапарцыянальнасці

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

Электрычная пастаянная

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

Дыэлектрычная пранікальнасць паказвае, у колькі разоў модуль сіл узаемадзеяння зарадаў у дадзеным аднародным асяроддзі меншы, чым модуль сіл узаемадзеяння гэтых жа зарадаў у вакууме:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}$$



1. Да якога віду ўзаемадзеянняў адносяць узаемадзеянне нерухомых электрычных зарадаў (зараджаных цел)?
2. Зарады якіх зараджаных цел можна лічыць пунктавымі?
3. Раскажыце пра эксперыменты Кулона па даследаванні ўзаемадзеяння электрычных зарадаў.
4. Сфармулюйце закон Кулона. Якія ўмовы прымяняльнасці закона Кулона?
5. Чаму роўны ў СІ каэфіцыент k ?
6. Матэматычны запіс закона Кулона нагадвае закон сусветнага прыцягнення. У чым адрозненне гэтых законаў? Параўнайце фізічныя паняцці «маса» і «электрычны зарад».
7. Што называюць дыэлектрычнай пранікальнасцю асяроддзя?



Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Два пунктавыя зарады знаходзяцца ў газе на адлегласці $r_1 = 42$ см. Вызначце, на якой адлегласці павінны знаходзіцца гэтыя зарады ў гліцэрыне, каб модуль сіл іх электрстатычнага ўзаемадзеяння застаўся ранейшы. Дыэлектрычныя пранікальнасці газу $\epsilon_1 = 2,0$, гліцэрыны $\epsilon_2 = 56,2$.

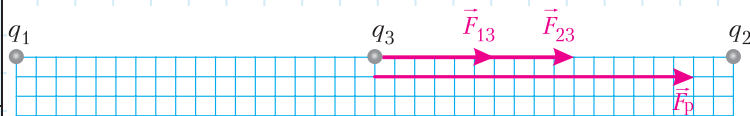
Дадзена:	Рашэнне. Паколькі $F_{к1} = F_{к2}$, то, выкарыстаўшы закон Кулона, можна запісаць: $k \frac{ q_1 \cdot q_2 }{\epsilon_1 r_1^2} = k \frac{ q_1 \cdot q_2 }{\epsilon_2 r_2^2}$.
$r_1 = 42$ см	
$F_{к1} = F_{к2}$	
$\epsilon_1 = 2,0$	
$\epsilon_2 = 56,2$	Значыць, $r_2 = r_1 \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$.
$r_2 = ?$	$r_2 = 42$ см $\sqrt{\frac{2,0}{56,2}} = 7,9$ см.

Адказ: $r_2 = 7,9$ см.

Прыклад 2. Пунктавыя зарады $q_1 = 3,4$ нКл і $q_2 = -5,6$ нКл знаходзяцца ў вакууме на адлегласці $r = 36$ см. Вызначце модуль і напрамак уздзеяння рэзультуючай сілы на зарад $q_3 = 3,2$ нКл, змешчаны ў пункт прасторы, які знаходзіцца на сярэдзіне адрэзка, што злучае гэтыя зарады.

Дадзена:	Рашэнне. Адлюструем на малюнку сілы \vec{F}_{13} і \vec{F}_{23} , якія дзейнічаюць на пунктавы зарад q_3 з боку пунктавых зарадаў q_1 і q_2 адпаведна. Пабудоваўшы вектарную суму сіл \vec{F}_{13} і \vec{F}_{23} , вызначым, што рэзультуючая \vec{F}_p гэтых сіл накіравана да зараду q_2 (мал. 102).
$q_1 = 3,4$ нКл = $3,4 \cdot 10^{-9}$ Кл	
$q_2 = -5,6$ нКл = $-5,6 \cdot 10^{-9}$ Кл	
$r = 36$ см = $0,36$ м	
$q_3 = 3,2$ нКл = $3,2 \cdot 10^{-9}$ Кл	

$\vec{F}_p = ?$



Мал. 102

Паколькі сілы \vec{F}_{13} і \vec{F}_{23} накіраваны аднолькава, то модуль рэзультуючай сілы $F_p = F_{13} + F_{23} = \frac{4kq_3}{r^2}(q_1 + |q_2|)$.

Такім чынам,

$$F_p = \frac{4 \cdot 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(0,36 \text{ м})^2} \cdot (3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} + 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}) = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 8,0 \text{ мкН}.$$

Адказ: $F_p = 8,0$ мкН; сіла накіравана да зараду q_2 .



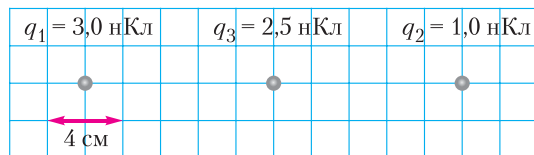
Практыкаванне 13

1. Вызначце модуль сіл узаемадзеяння двух аднолькавых нерухомых пунктавых зарадаў $q_1 = q_2 = 9,0$ нКл, якія знаходзяцца на адлегласці $r = 0,30$ м у вакууме. У колькі разоў паменшыцца ці павялічыцца модуль сіл узаемадзеяння гэтых зарадаў, калі змясціць іх у газу, дыэлектрычная пранікальнасць якой $\epsilon = 2,0$?

2. Вызначце, у колькі разоў трэба павялічыць адлегласць паміж двума нерухомымі пунктавымі зарадамі, каб модуль сіл узаемадзеяння застаўся ранейшым пры павелічэнні колькаснага значэння аднаго з зарадаў $\alpha = 4$ разы.

3. Два аднолькавыя маленькія праводныя шарыкі, зарады якіх адрозніваюцца ў два разы, знаходзяцца на адлегласці $r = 50$ см. Вызначце адлегласць, на якую неабходна развесці шарыкі пасля судакранання, каб модуль сіл іх узаемадзеяння застаўся ранейшым.

4. Пунктавыя зарады q_1 і q_2 замацаваны ў вакууме (мал. 103). Вызначце модуль і напрамак рэзультуючай сілы, якая дзейнічае на зарад q_3 , змешчаны ў пункт, які знаходзіцца на сярэдзіне адрэзка, што злучае гэтыя зарады.



Мал. 103

5. Зарады двух аднолькавых маленькіх шарыкаў масай $m = 40$ г кожны аднолькавыя. Адлегласць паміж шарыкамі істотна перавышае іх памеры. Вызначце модуль зарадаў шарыкаў, калі кулонаўская сіла іх адштурхвання ўраўнаважвае сілу гравітацыйнага прыцяжэння гэтых шарыкаў.

6. Невялікі шарык, зарад якога $q_1 = 20$ нКл і маса $m = 60$ мг, падвешаны ў паветры на шаўковай нітцы. Пасля таго як на вертыкалі, якая праходзіць праз цэнтр шарыка, на адлегласці $r = 15$ см ніжэй яго змясцілі другі маленькі шарык, зараджаны адмоўна, модуль сілы пругкасці ніткі павялічыўся ў два разы. Вызначце зарад другога шарыка.



§ 18. Электрстатычнае поле

Зараджаныя целы і часціцы, якія коратка называюць зарадамі, узаемадзейнічаюць адно з адным. Гэта пацвярджаюць шматлікія доследы, а закон Кулона дазваляе вызначыць сілы ўзаемадзеяння нерухомых пунктавых зарадаў. Але што з'яўляецца прычынай такога ўзаемадзеяння, які яго механізм?

Першым, хто здагадаўся, што «целы дзейнічаюць адно на адно на адлегласці ў выніку прывядзення навакольнага асяроддзя ў стан напружання», быў выдатны англійскі вучоны Майкл Фарадэй (1791–1867). Абагульніўшы вынікі ўласных даследаванняў, праведзеных з 1832 да 1852 г., Фарадэй увёў у фізіку новае паняцце — *поле*. Ён разглядаў поле як матэрыяльнае асяроддзе, якое з'яўляецца пасярэднікам пры любых узаемадзеяннях аддаленых адно ад аднаго цел.

Паводле сучасных уяўленняў, электрычны зарад надзяляе навакольную прастору асаблівымі фізічнымі ўласцівасцямі — стварае *электрычнае поле*. Гэты зарад называюць крыніцай поля і часта пазначаюць сімвалам Q . Асноўнай уласцівасцю электрычнага поля з'яўляецца яго дзеянне некаторай сілай на змешчаны ў яго зарад. Інакш кажучы, зарады не дзейнічаюць адзін на аднаго непасрэдна. Узаемадзеянне электрычных зарадаў ажыццяўляецца праз створаны імі палі.

Так, напрыклад, пры ўзаемадзеянні нерухомых электрычных зарадаў электрстатычнае поле зараду q_1 дзейнічае пэўнай сілай на зарад q_2 , а поле зараду q_2 дзейнічае на зарад q_1 . Гэтыя ўзаемадзеянні перадаюцца не імгненна, а з канчатковай скорасцю, роўнай скорасці святла ў вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Па меры аддалення ад зараду-крыніцы поле слабее.

Электрстатычнае поле — поле, якое ствараецца нерухомымі адносна выкарыстанай інерцыяльнай сістэмы адліку электрычнымі зарадамі.

Электрстатычнае поле існуе ў прасторы вакол нерухомых зарадаў, непаруўна з імі звязана і не змяняецца з часам. Сілу, якой поле дзейнічае на ўнесены ў яго электрычны зарад, называюць *электрычнай сілай* або кулонаўскай сілай.

Каб даследаваць электрстатычнае поле, створанае зарадам Q , у яго змяшчаюць зарад q_0 , які называюць пробным. Пад *пробным зарадам* разумеюць зарад, модуль якога дастаткова малы ($|q_0| \ll |Q|$) і ўласнае поле якога істотна не мяняе размеркавання астатніх зарадаў у даследаваным полі. Пробны зарад павінен быць пунктавым, каб можна было даследаваць

поле ў малых частках прасторы. Пробны заряд можа быць як дадатны, так і адмоўны.

Адзначым, што ўласцівасць электрычнага поля ўздзейнічаць некаторай сілай праяўляецца не толькі ў пункце, у якім знаходзіцца пробны заряд q_0 . Гэтую ўласцівасць маюць усе пункты поля, створанага зарадам Q .

Выкарыстоўваючы пробны заряд q_0 , можна колькасна ахарактарызаваць электростатичнае поле, створанае любым зараджаным целам, паказаўшы модуль і напрамак сілы, якая дзейнічае на зарад q_0 у любым пункце поля.



3 гісторыі фізікі

На думку А. Эйнштэйна, ідэя поля была самым важным адкрыццём з часоў Ньютана. Ён пісаў, што «трэба мець магутны дар навуковага прадбачання, каб распазнаць, што ў апісанні электрычных з'яў не зарады і не часціцы вызначаюць сутнасць з'яў, а, хутчэй, прастора паміж зарадамі і часціцамі». Фарадэй стварыў канцэпцыю электрамагнітнага поля, заснаваную на канчатковай скорасці распаўсюджвання любых узаемадзеянняў. Матэматычную завершанасць ідэі Фарадэя надаў яго геніяльны суайчыннік і пераемнік Джэймс Клерк Максвел (1831–1879).



Электростатичнае поле — поле, якое ствараецца нерухомымі адносна выкарыстанай інерцыяльнай сістэмы адліку электрычнымі зарадамі

Узаемадзеянне электрычных зарадаў ажыццяўляецца праз стварэння імі палі

Асноўнай уласцівасцю электрычнага поля з'яўляецца яго дзеянне некаторай сілай на змешчаны ў яго зарад

Пробны зарад q_0

$|q_0| \ll |Q|$, дзе Q — зарад-крыніца поля

пунктавы

можа быць як дадатны, так і адмоўны



1. Якія факты пацвярджаюць існаванне электрычнага поля?
2. Якое поле называюць электростатичным?
3. Якія асноўныя асаблівасці электростатичнага поля?

§ 19. Напружаність електростатичного поля. Принцип суперпозиції

Для вивчення *ї*ласцівасцей електростатичного поля зручна використувати таку його характеристику, яка не залежить від лікавага значення пробного заряду і дозволяє визначити силу, што дзейнічає на заряд з боку поля *ї* любым його пункце. Для гравітаційного поля характеристикою, яка не залежить від маси тела, з'являється паскаренне свабодного падзення $\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$. А яка фізична величина з'являється характеристикою електростатичного поля?

Напружаність електростатичного поля. Няхай електростатичне поле створено *ї* вакууме пунктавым зарядом $Q > 0$. Калі *ї* пэўны пункт поля змязціть пробны додатны заряд q_0 , на яго буде дзейнічає кулонаўская сила адштурхвання, модуль якої $F = k \frac{Qq_0}{r^2}$.

Сила \vec{F} не можа з'являтися характеристикою поля, бо яе модуль прапарційнальний значенню пробного заряду q_0 . Аднак адносіны модуля сили, якої електростатичне поле пунктавага заряду Q дзейнічає на пробны заряд q_0 , не залежать від значення пробного заряду:

$$\frac{F}{q_0} = k \frac{Q}{r^2}, \quad (19.1)$$

а значить, можуть служити характеристикою поля.

Гэтая характеристика атрымала назву *напружаність електростатичного поля* і яе абазначають \vec{E} . Напружаність характеризує сілавоє дзеянне поля на *ї*несення *ї* яго заряду.

Напружаність електростатичного поля — фізична вектарная величина, роўная адносинам сили, якої поле дзейнічає на пробны заряд, до значення гэтага заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (19.2)$$

З улікам виразу (19.1) і (19.2) можна визначити модуль напружаності електростатичного поля, створенога пунктавым зарядом Q , у пункце, які знаходиться на адлеглості r від яго:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

Такім чынам, модуль напружанасці поля, стваранага ў вакууме пунктавым зарадам, прама прапарцыянальна модулю гэтага зараду і адваротна прапарцыянальна квадрату адлегласці паміж зарадам і пунктам, у якім вызначаюць значэнне напружанасці.

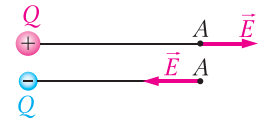
Калі зарад Q знаходзіцца ў аднародным асяроддзі з дыэлектрычнай пранікальнасцю ϵ , то модуль напружанасці поля $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$.

З выразу $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$ вынікае, што адзінкай напружанасці электростатычнага поля ў СІ з'яўляецца ньютан на кулон $\left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right)$. Аднак у СІ шырока выкарыстоўваюць іншую назву гэтай адзінкі — вольт на метр $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$.

Ведаючы напружанасць электростатычнага поля, можна вызначыць сілу, якая дзейнічае на любы пунктавы зарад у любым пункце гэтага поля:

$$\vec{F} = \vec{E}q. \tag{19.3}$$

Напружанасць поля, як і сіла, велічыня вектарная. Напрамак напружанасці поля супадае з напрамкам сілы, якая дзейнічае на дадатны пробны электрычны зарад. Напружанасць у любым пункце электростатычнага поля пунктавага зараду накіравана ўздоўж прамой, што злучае гэты пункт і пунктавы зарад, які стварае поле. Напружанасць поля, створанага пунктавым дадатным зарадам $Q > 0$, накіравана ад зараду, а напружанасць поля, створанага пунктавым адмоўным зарадам $Q < 0$, — да зараду (мал. 104).

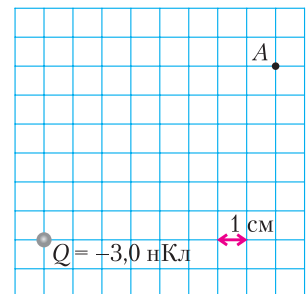


Мал. 104

Ад тэорыі да практыкі

1. Як зменіцца модуль напружанасці ў некаторым пункце поля, створанага пунктавым зарадам Q , калі: а) адлегласць r ад зараду да гэтага пункта павялічыць удвая; б) зарад Q павялічыць удвая, а адлегласць r ад зараду да гэтага пункта паменшыць удвая?

2. Як накіравана ў пункце A напружанасць поля, створанага нерухомым пунктавым зарадам (мал. 105)? Чаму роўны модуль напружанасці поля ў гэтым пункце?



Мал. 105



Цікава ведаць

Акрамя гравітацыйнага поля, у Зямлі ёсць электрычнае і магнітнае палі. Модуль напружанасці электрычнага поля каля паверхні Зямлі ў сярэднім складае $130 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$. Электрычнае поле Зямлі змяняецца з цягам часу. Залішні адмоўны электрычны зарад зямнога шара вагаецца каля $-6 \cdot 10^5$ Кл.

Прынцып суперпазіцыі электрычных палёў. Няхай пробны зарад q_0 знаходзіцца ў пэўным пункце электростатычнага поля, створанага не адным, а некалькімі пунктавымі зарадамі. Эксперыментальным шляхам вызначылі, што результирующая сіла, якая дзейнічае на пробны зарад, роўная вектарнай суме сіл, якія дзейнічаюць з боку электростатычных палёў гэтых пунктавых зарадаў:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n. \quad (19.4)$$

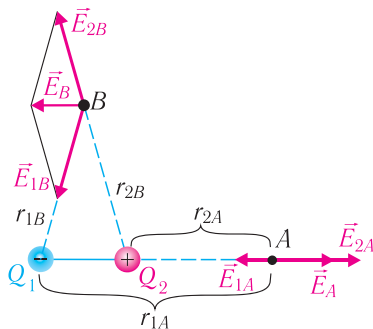
Выкарыстаўшы формулу (19.3), можна вызначыць сілы, якія дзейнічаюць на пробны зарад:

$$\vec{F} = \vec{E}q_0, \quad \vec{F}_1 = \vec{E}_1q_0, \quad \vec{F}_2 = \vec{E}_2q_0, \quad \vec{F}_3 = \vec{E}_3q_0, \quad \dots, \quad \vec{F}_n = \vec{E}_nq_0,$$

дзе \vec{E} — результирующая напружанасць поля сістэмы пунктавых зарадаў, а $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$ — напружанасці палёў у дадзеным пункце, якія ствараюцца 1-м, 2-м, 3-м, ..., n -м пунктавымі зарадамі.

Падставіўшы гэтыя выразы ў суадносіны (19.4), атрымаем, што **калі ў дадзеным пункце прасторы электростатычнае поле створана сістэмай пунктавых зарадаў, то напружанасць результирующага поля ў гэтым пункце роўная вектарнай суме напружанасцей палёў, якія ствараюцца кожным з пунктавых зарадаў сістэмы паасобна:**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$$



Мал. 106

Гэтае палажэнне носіць назву *прынцып суперпазіцыі палёў*.

Выкарыстаем прынцып суперпазіцыі, каб вызначыць у пунктах A і B напружанасці результирующага поля, створанага двума пунктавымі электрычнымі зарадамі супрацьлеглых знакаў $Q_1 < 0$ і $Q_2 > 0$, але з аднолькавымі модулямі (мал. 106).

Напружанасці \vec{E}_{1A} і \vec{E}_{2A} палёў, створаных зарадамі Q_1 і Q_2 , у пункце A накіраваны ўздоўж прамой, якая злучае зарады, у супрацьлеглыя

бакі. Напружанасць \vec{E}_A рэзультуючага поля ў пункце A роўная вектарнай суме напружанасцей \vec{E}_{1A} і \vec{E}_{2A} і таксама накіравана ўздоўж прамой, якая злучае зарады.

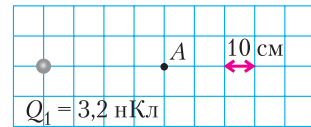
Напружанасць \vec{E}_B рэзультуючага поля ў пункце B , які знаходзіцца па-за прамой, якая злучае зарады, роўная вектарнай суме напружанасцей \vec{E}_{1B} і \vec{E}_{2B} . Вызначыць яе можна паводле правіла паралелаграма (гл. мал. 106).



Ад тэорыі да практыкі

1. Чаму роўны модуль напружанасці поля, створанага пунктавым нерухомым зарадам Q_1 , у пункце A (мал. 107)?

2. Дзе трэба размясціць яшчэ адзін такі самы пунктавы зарад $Q_2 = Q_1$, каб у пункце A модуль напружанасці рэзультуючага поля быў роўны нулю?



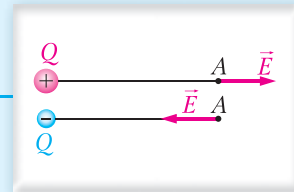
Мал. 107



Напружанасць электрстатычнага поля — фізічная вектарная велічыня, роўная адносінам сілы, якой поле дзейнічае на пробны зарад, да значэння гэтага зараду: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$

Модуль напружанасці поля, створанага пунктавым зарадам:

- у вакууме або ў паветры: $E = k \frac{|Q|}{r^2}$;
- у аднародным асяроддзі з дыэлектрычнай пранікальнасцю ϵ : $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$



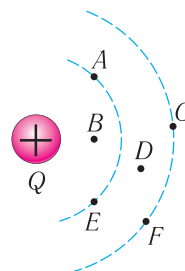
Прынцып суперпазіцыі: калі ў дадзеным пункце прасторы электрстатычнае поле створана сістэмай пунктавых зарадаў, то напружанасць рэзультуючага поля ў гэтым пункце роўная вектарнай суме напружанасцей палёў, якія ствараюцца кожным з пунктавых зарадаў сістэмы паасобна:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$





1. Што называюць напружанасцю электростатычнага поля?
2. Як разлічыць напружанасць электростатычнага поля пунктавага зараду ў некаторым пункце гэтага поля?
3. Як вызначыць сілу, якая дзейнічае з боку электростатычнага поля на змешчаны ў яго пункты зарад?
4. Ці можна назваць паскарэнне свабоднага падзення $\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$ напружанасцю гравітацыйнага поля?
5. Пробны зарад змяшчаюць у розныя пункты электростатычнага поля, створанага зарадам Q (мал. 108). У якіх пунктах модуль напружанасці поля максімальны? мінімальны? У якіх пунктах ён аднолькавы?
6. Як накіравана напружанасць поля, створанага пунктавым зарадам $Q < 0$; пунктавым зарадам $Q > 0$?
7. У чым заключаецца прынцып суперпазіцыі электростатычных палёў?



Мал. 108



Прыклад рашэння задачы

Два нерухомыя пунктавыя зарады $Q_1 = 6,70$ нКл і $Q_2 = -13,3$ нКл знаходзяцца ў паветры на адлегласці $r = 5,00$ см адзін ад аднаго. Вызначце модуль напружанасці электростатычнага поля ў пункце, які знаходзіцца на адлегласці $r_1 = 3,00$ см ад дадатнага зараду і $r_2 = 4,00$ см ад адмоўнага.

Дадзена:

$$Q_1 = 6,70 \text{ нКл} = 6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$Q_2 = -13,3 \text{ нКл} =$$

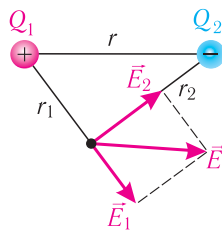
$$= -1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r = 5,00 \text{ см} = 5,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_1 = 3,00 \text{ см} = 3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 4,00 \text{ см} = 4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$|\vec{E}|$ — ?



Мал. 109

Рашэнне. Згодна з прынцыпам суперпазіцыі напружанасць рэзультуючага поля $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (мал. 109) вызначаюць паводле правіла паралелаграма. Тут \vec{E}_1 і \vec{E}_2 — напружанасці палёў, створаных пунктавымі зарадамі Q_1 і Q_2 у дадзеным пункце. З умовы задачы і тэарэмы Піфагора вынікае, што вугал паміж \vec{E}_1 і \vec{E}_2 прамы.

Модуль напружанасці E рэзультуючага поля знойдем па тэарэме Піфагора: $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$. Паколькі зарады Q_1 і Q_2 пунктавыя, то

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_1^2}, \quad E_2 = k \frac{|Q_2|}{r_2^2}.$$

$$\text{З улікам гэтага } E = k \sqrt{\left(\frac{Q_1}{r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{Q_2}{r_2^2}\right)^2}.$$

$$E = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \sqrt{\left(\frac{6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}\right)^2 + \left(\frac{1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{(4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}\right)^2} = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Адказ: $E = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.



Практыкаванне 14

1. У некаторы пункт электростатычнага поля, у якім модуль напружанасці $E = 160 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, змяшчаюць пунктавы зарад $q = 4,00 \text{ нКл}$. Вызначце модуль сілы, якая дзейнічае на гэты зарад з боку электростатычнага поля.

2. Вызначце модуль пунктавага зараду, які знаходзіцца ў паветры, калі на адлегласці $r = 1,0 \text{ см}$ ад зараду модуль напружанасці поля $E = 3,6 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

3. Два дадатныя пунктавыя зарады знаходзяцца на адлегласці $r_0 = 10 \text{ см}$ адзін ад аднаго. У пункце, размешчаным на прамой, якая злучае зарады, на адлегласці $r_1 = 8,0 \text{ см}$ ад першага зараду модуль напружанасці рэзультуючага электростатычнага поля роўны нулю. Вызначце адносіны зарадаў $\frac{Q_1}{Q_2}$.

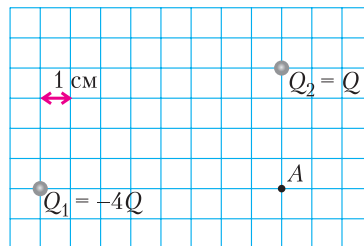
4. Электростатычнае поле ў пэўным пункце створана нерухомымі пунктавымі зарадамі $Q_1 = -4Q$ і $Q_2 = Q$ (мал. 110).

а) Адлюструйце ў выбраным вамі маштабе напружанасці \vec{E}_{1A} і \vec{E}_{2A} палёў, створаных кожным зарадам у пункце A .

б) Пазначце на малюнку напрамак рэзультуючай напружанасці \vec{E}_A .

в) Вызначце модуль рэзультуючай напружанасці E_A поля, калі $|Q| = 8,0 \text{ нКл}$.

5. Пылінка масай $m = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ г}$ мае зарад $q = 5,0 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$. Напружанасць поля ў пункце, дзе знаходзіцца пылінка, накіравана вертыкальна ўверх. Вызначце модуль напружанасці электростатычнага поля, калі пылінка знаходзіцца ў раўнавазе.

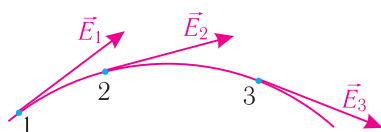


Мал. 110



§ 20. Лініі напружанасці электрстатычнага поля

Для апісання электрстатычнага поля трэба ведаць як модуль, так і напрамак напружанасці ў кожным яго пункце. Каб наглядна паказваць размеркаванне поля ў прасторы, Фарадэй у 1845 г. прапанаваў спосаб адлюстравання электрычных палёў у выглядзе ўяўных ліній. Іх назвалі лініямі напружанасці або сілавымі лініямі.

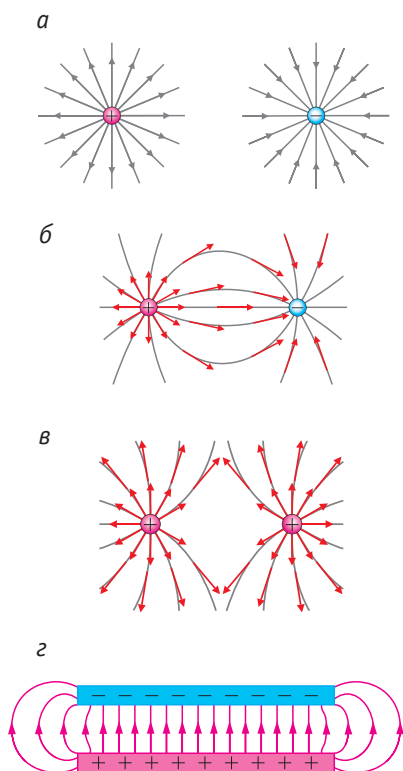


Мал. 111

Лініі напружанасці — уяўныя накіраваныя лініі, датычныя да якіх у кожным пункце поля супадаюць па напрамку з напружанасцю электрстатычнага поля ў тым жа пункце (гэта значыць з напрамкам электрстатычнай сілы, якая дзейнічае на дадатны зарад) (мал. 111).

Відавочна, што праз любы пункт поля, у якім $\vec{E} \neq \vec{0}$, можна правесці адну і толькі адну лінію напружанасці. У кожным такім пункце напружанасць мае зусім пэўны напрамак.

На малюнку 112, а паказаны лініі напружанасці палёў, утвораных зарадамі, раўнамерна размеркаванымі па паверхні адасобленых праводных шарыкаў. Напрамак кожнай стрэлкі на малюнку 112, а супадае з напрамкам напружанасці поля. Лініі напружанасці ў першым выпадку накіраваны ад дадатнага зараду ў бясконцасць, а ў другім — з бясконцасці да адмоўнага зараду і заканчваюцца на ім. У электрстатычным полі лініі напружанасці пачынаюцца і заканчваюцца на электрычных зарадах нават тады, калі адным сваім канцом сыходзяць у бясконцасць, дзе і знаходзяцца зарады, якія адсутнічаюць на малюнку.



Мал. 112

На малюнку 112, *б* адлюстраваны лініі напружанасці электростатычнага поля, створанага двума рознаіменнымі зарадамі, якія знаходзяцца на праводных шарыках і маюць аднолькавыя модулі. Стрэлкі паказваюць напрамкі напружанасці поля ў розных яго пунктах.

На малюнку 112, *в* паказаны лініі напружанасці электростатычнага поля двух аднолькава зараджаных шарыкаў.

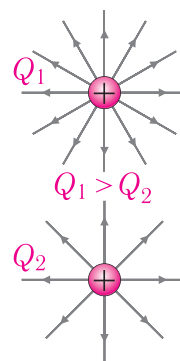
На малюнку 112, *г* адлюстравана поле, створанае зарадамі супрацьлеглых знакаў з аднолькавымі модулямі, якія знаходзяцца на двох плоскіх металічных пласцінах, даўжыня якіх значна перавышае адлегласці паміж імі. Лініі напружанасці такога поля паралельныя адна адной за выключэннем прасторы паблізу краёў пласцін і за межамі іх перакрыцця. Электростатычнае поле ў цэнтральнай частцы паміж рознаіменна зараджанымі металічнымі пласцінамі з'яўляецца прыкладам *аднароднага поля*.

Аднароднае электростатычнае поле — электростатычнае поле, напружанасць якога ва ўсіх пунктах прасторы аднолькавая.

Электростатычныя палі, адлюстраваныя на малюнку 112, *а–в*, з'яўляюцца неаднароднымі, бо ці модуль, ці напрамак (або і тое і другое) напружанасці ў розных пунктах поля розняцца.

Лініі напружанасці электростатычнага поля не перарываюцца ў прасторы (пры адсутнасці ў ёй электрычных зарадаў), ніколі не перасякаюцца і не датыкаюцца адна да адной.

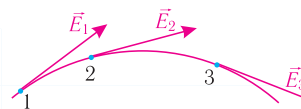
Каб лініі напружанасці паказвалі не толькі напрамак, але і модуль напружанасці поля, на малюнках іх дамовіліся праводзіць з пэўнай гушчынёй. Лініі напружанасці ідуць густа там, дзе модуль напружанасці поля большы, і радзейшыя там, дзе ён меншы. У аднародным электростатычным полі гушчыня ліній напружанасці не мяняецца. Карціну ліній напружанасці прынята будаваць так, каб яна, па магчымасці, перадавала сіметрыю адлюстраванага электростатычнага поля. Колькасць ліній напружанасці, пачаткам або канцом якіх служыць дадзены зарад, прапарцыянальная значэнню гэтага зараду (мал. 113).



Мал. 113



Лініі напружанасці — уяўныя накіраваныя лініі, датычныя да якіх у кожным пункце поля супадаюць па напрамку з напружанасцю электрстатычнага поля



пачынаюцца на дадатным зарадзе і заканчваюцца на адмоўным зарадзе цел

не перасякаюцца, бо ў кожным пункце поля напружанасць мае адзін канкрэтны напрамак

не перарываюцца ў прастору, якая не змяшчае электрычных зарадаў

па гушчынi ліній можна меркаваць пра модуль напружанасці электрстатычнага поля

Аднароднае электрстатычнае поле — электрстатычнае поле, напружанасць якога ў любым яго пункце аднолькавая



1. Што называюць лініямі напружанасці электрстатычнага поля?
2. Якія асаблівасці ліній напружанасці электрстатычнага поля?
3. Як накіраваны лініі напружанасці электрстатычнага поля зараду ў залежнасці ад яго знака? сістэмы двух зарадаў (аднайменных і рознайменных)?
4. Якое электрстатычнае поле называюць аднародным? Прывядзіце прыклады.

§ 21. Работа сілы аднароднага электрстатычнага поля. Патэнцыял

Электрстатычнае поле, дзейнічаючы на змешчаныя ў ім зарады з пэўнай сілай, можа іх перамяшчаць. Вы ведаеце, што пры перамяшчэнні цела дзеючая на яго сіла выконвае работу. Высветлім, ад чаго залежыць работа сілы на перамяшчэнні электрычнага зараду ў электрстатычным полі.

Работа сілы аднароднага электрстатычнага поля. Разлікі і вынікі эксперыментаў даказалі, што работа сілы электрстатычнага поля пры перамяшчэнні зараду паміж двума пунктамі залежыць толькі ад становішча

гэтых пунктаў і не залежыць ад формы траекторыі. Такой самай асаблівасцю, як вы ведаеце, валодае і гравітацыйнае поле. Фізічныя палі, работа сіл якіх не залежыць ад формы траекторыі, называюць *патэнцыяльнымі*.

Высветлім, як можна вызначыць работу сілы аднароднага электростатычнага поля напружанасцю \vec{E} па перамяшчэнні дадатнага пробнага зараду q_0 . Паколькі электростатычнае поле з'яўляецца патэнцыяльным, то пры перамяшчэнні зараду з пункта B у пункт D (мал. 114) работа сілы поля незалежна ад формы траекторыі мае адно і тое значэнне. Вызначым гэтую работу для выпадку, калі зарад перамяшчаецца ўздоўж адрэзка прамой BD .

Вам вядома, што работа сілы $A = F\Delta r \cos\alpha$, дзе F — модуль сілы, якая дзейнічае на цела; Δr — модуль перамяшчэння цела пад дзеяннем гэтай сілы; α — вугал паміж напрамкамі сілы і перамяшчэння. У нашым выпадку модуль электрычнай сілы $F = q_0E$, таму работа сілы поля $A_{BD} = q_0E\Delta r \cos\alpha$. Паколькі $\Delta r \cos\alpha = d$ (гл. мал. 114), дзе d — адлегласць паміж зараджанымі пласцінамі, якія ствараюць поле, то

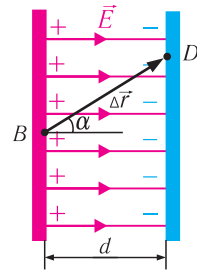
$$A_{BD} = q_0Ed. \quad (21.1)$$

Работа сілы электростатычнага поля можа быць дадатная, адмоўная або роўная нулю. Напрыклад, калі б зарад перамяшчаўся не з пункта B у пункт D , а наадварот — з пункта D у пункт B , то работа сілы была б адмоўная: $A_{DB} = -q_0Ed$. Пры перамяшчэнні зараду перпендыкулярна лініям напружанасці работа сілы поля $A = 0$.

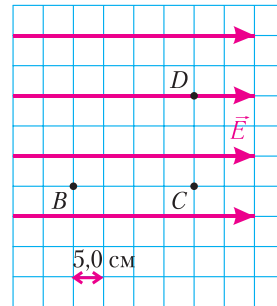
Ад тэорыі да практыкі

Якую работу выканае сіла аднароднага электростатычнага поля, модуль напружанасці якога $E = 20 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$, пры перамяшчэнні зараду $q = 2,4 \text{ нКл}$ па адрэзку прамой (мал. 115), што злучае пункты: а) B і C ; б) C і D ; в) D і B ?

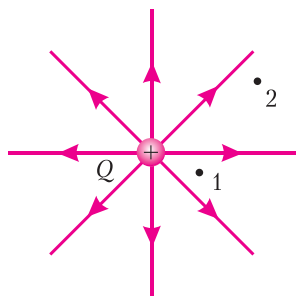
Якую работу выканае сіла поля пры перамяшчэнні зараду па замкнутай траекторыі $BCDB$?



Мал. 114



Мал. 115



Мал. 116

Патэнцыяльная энергія зараду ў электрстатычным полі. Электрстатычнае поле з'яўляецца патэнцыяльным, і, значыць, работа сілы поля па перамяшчэнні электрычнага зараду q з пункта 1 у пункт 2 (мал. 116) можа служыць мерай змены патэнцыяльнай энергіі гэтага зараду ў полі, створаным зарадам Q . Няхай $W_{п1}$ і $W_{п2}$ — патэнцыяльныя энергіі перамяшчанага зараду ў пунктах 1 і 2 электрстатычнага поля. Тады работа сілы поля

$$A_{12} = -\Delta W_{п12} = -(W_{п2} - W_{п1}), \quad (21.2)$$

дзе $\Delta W_{п12}$ — прырашчэнне патэнцыяльнай энергіі зараду q пры яго перамяшчэнні з пункта 1 у пункт 2.

Перапішам выраз (21.2) у выглядзе

$$A_{12} = W_{п1} - W_{п2} \quad (21.3)$$

і прааналізуем яго для выпадку, калі на зарад q дзейнічае толькі сіла з боку электрстатычнага поля:

1) калі работа сілы поля $A_{12} > 0$ (перамяшчэнне дадатнага зараду q адбываецца ў напрамку ліній напружанасці поля), то патэнцыяльная энергія зараду памяншаецца: $\Delta W_{п12} < 0$. Пры гэтым, згодна з законам захавання энергіі, павялічваецца кінетычная энергія цела з зарадам q : $\frac{mv_2^2}{2} > \frac{mv_1^2}{2}$;

2) калі работа сілы поля $A_{12} < 0$ (перамяшчэнне дадатнага зараду адбываецца супрацьлегла напрамку ліній напружанасці поля), то патэнцыяльная энергія зараду павялічваецца: $\Delta W_{п12} > 0$. Пры гэтым кінетычная энергія зараджанага цела змяншаецца: $\frac{mv_2^2}{2} < \frac{mv_1^2}{2}$;

3) калі работа сілы поля $A_{12} = 0$ (перамяшчэнне зараду адбываецца перпендыкулярна напрамку ліній напружанасці поля), то патэнцыяльная энергія зараду не змяняецца.



Ад тэорыі да практыкі

У якім выпадку (гл. мал. 115) пры перамяшчэнні дадатнага (адмоўнага) зараду паміж двума пунктамі поля патэнцыяльная энергія гэтага зараду: а) павялічваецца; б) памяншаецца; в) не змяняецца?

Патэнцыял электрстатычнага поля як яго энергетычная характарыстыка. З выказаў (21.1) і (21.2) вынікае, што патэнцыяльная энергія пробнага зараду q_0 у дадзеным пункце поля прапарцыянальная велічыні гэтага зараду. Такім

чынам, адносіны $\frac{W_{\text{п}}}{q_0}$ не залежаць ад зараду і з'яўляюцца энергетычнай характарыстыкай электростатычнага поля, якая атрымала назву *патэнцыял*.

Патэнцыял электростатычнага поля ў дадзеным пункце прасторы — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам патэнцыяльнай энергіі пробнага зараду, змешчанага ў дадзены пункт поля, да значэння гэтага зараду:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q_0}. \quad (21.4)$$

За адзінку патэнцыялу ў СІ прыняты вольт (В). Адзінка была названая ў гонар італьянскага вучонага Алясандра Вольта (1745–1827), які зрабіў важкі ўклад у вывучэнне электрычных з'яў. 1 В — патэнцыял такога пункта электростатычнага поля, у якім зарад 1 Кл валодаў бы патэнцыяльнай энергіяй 1 Дж.

Патэнцыял φ электростатычнага поля пунктавага зараду Q на адлегласці r ад яго ў вакууме або ў паветры вызначаюць суадносінамі

$$\varphi = k \frac{Q}{r}. \quad (21.5)$$

Знак зараду-крыніцы поля вызначае знак патэнцыялу гэтага поля.

Калі электрычнае поле створана ў аднародным асяроддзі з дыэлектрычнай пранікальнасцю ϵ , то патэнцыял поля

$$\varphi = k \frac{Q}{\epsilon r}.$$

Патэнцыял з'яўляецца скалярнай велічынёй. Таму калі ў дадзеным пункце прасторы электростатычнае поле створана сістэмай пунктавых зарадаў, то патэнцыял рэзультуючага поля ў гэтым пункце роўны алгебраічнай суме патэнцыялаў палёў у гэтым жа пункце прасторы, якія ствараюцца кожным з пунктавых зарадаў сістэмы паасобна:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n,$$

гэта значыць для патэнцыялу выконваецца *прынцып суперпазіцыі*.

Ад тэорыі да практыкі

Электростатычнае поле створана пунктавым нерухомым зарадам Q . Патэнцыял поля ў пункце, размешчаным ад зараду Q на адлегласці $r = 27$ см, $\varphi = 80$ В. У гэты пункт змяшчаюць пробны зарад q_0 . Вызначце: а) значэнне зараду, які стварае поле; б) значэнне пробнага зараду, калі яго патэнцыяльная энергія ў дадзеным пункце поля $W_{\text{п}} = -0,8$ мкДж.





Работа сілы электрстатычнага поля па перамяшчэнні зараду:

- з аднаго пункта поля ў другі не залежыць ад формы траекторыі;
- можа быць дадатная, адмоўная або роўная нулю;
- пры перамяшчэнні зараду па замкнутай траекторыі роўная нулю

Работа сілы аднароднага электрстатычнага поля па перамяшчэнні зараду:

$$A = qEd$$

Работа сілы электрстатычнага поля па перамяшчэнні зараду з пачатковага пункта 1 у канцавы пункт 2 роўная прырашчэнню патэнцыяльнай энергіі зараду ў гэтым полі, узятаму са знакам мінус, або змяншэнню патэнцыяльнай энергіі:

$$A_{12} = -\Delta W_{п12} = -(W_{п2} - W_{п1}) = W_{п1} - W_{п2}$$

Патэнцыял электрстатычнага поля ў дадзеным пункце прасторы — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам патэнцыяльнай энергіі пробнага зараду, змешчанага ў дадзены пункт поля, да значэння гэтага зараду:

$$\varphi = \frac{W_{п}}{q_0}$$

Патэнцыял электрстатычнага поля пунктавага зараду:

- у вакууме

$$\varphi = k \frac{Q}{r};$$

- у аднародным асяроддзі з дыэлектрычнай пранікальнасцю ε

$$\varphi = k \frac{Q}{\varepsilon r}$$

Калі ў дадзеным пункце прасторы электрстатычнае поле створана сістэмай пунктавых зарадаў, то патэнцыял рэзультуючага поля ў гэтым пункце роўны алгебраічнай суме патэнцыялаў палёў у гэтым жа пункце прасторы, якія ствараюцца кожным з пунктавых зарадаў сістэмы паасобна:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n$$





1. Як можна вызначыць работу сілы аднароднага электростатычнага поля па перамяшчэнні электрычнага зараду?
2. Як вы разумееце сцвярджэнне «электростатычнае поле патэнцыяльнае»? Як звязана работа сілы электростатычнага поля па перамяшчэнні электрычнага зараду са змяненнем патэнцыяльнай энергіі зараду ў гэтым полі?
3. Якія дзве фізічныя велічыні характарызуюць электростатычнае поле ў любым яго пункце?
4. Што называюць патэнцыялам электростатычнага поля?
5. Чаму роўны патэнцыял электростатычнага поля пунктавага зараду Q на адлегласці r ад яго?
6. Як вызначаюць патэнцыял электростатычнага поля, створанага некалькімі пунктавымі зарадамі?

**Прыклад рашэння задачы**

Электростатычнае поле створана нерухомым пунктавым зарадам Q . У пункце, які знаходзіцца на адлегласці $r = 80$ см ад зараду, патэнцыял поля $\varphi = 0,42$ кВ. Вызначце модуль сілы, якая дзейнічае з боку поля на пунктавы зарад $q = 1,5$ нКл, змешчаны ў гэты пункт.

Дадзена:

$$r = 80 \text{ см} = 0,80 \text{ м}$$

$$\varphi = 0,42 \text{ кВ} = 4,2 \cdot 10^2 \text{ В}$$

$$q = 1,5 \text{ нКл} = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$F = ?$$

Рашэнне. Модуль сілы, якой электростатычнае поле зараду Q дзейнічае на зарад q_2 , можна вызначыць, выкарыстаўшы закон Кулона:

$$F = k \frac{Qq}{r^2}. \quad (1)$$

З формулы (21.5) для патэнцыялу поля пунктавага зараду знойдзем значэнне зараду:

$$Q = \frac{\varphi r}{k}. \quad (2)$$

Падставіўшы выраз (2) у формулу (1), атрымаем:

$$F = k \frac{q\varphi r}{kr^2} = \frac{q\varphi}{r}.$$

$$F = \frac{1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 4,2 \cdot 10^2 \text{ В}}{0,80 \text{ м}} = 7,9 \cdot 10^{-7} \text{ Н}.$$

Адказ: $F = 7,9 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.



Практыкаванне 15

1. Ці залежыць работа сілы электростатычнага поля ад траекторыі руху зараду? Параўнайце работу сілы электростатычнага поля, утворанага зараджанымі пласцінамі, пры перамяшчэнні зараду q па контуры A і контуры B (мал. 117).

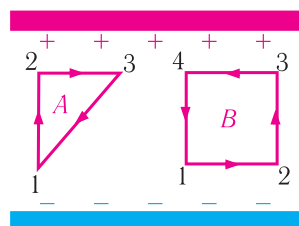
2. Адмоўны зарад, модуль якога $|q| = 0,50$ мкКл, перамясцілі ў аднародным электростатычным полі на адлегласць $d = 10$ см у напрамку ліній напружанасці. Вызначце работу сілы поля, выкананую пры перамяшчэнні зараду, і змену патэнцыяльнай энергіі ўзаемадзеяння зараду з полем, калі модуль яго напружанасці $E = 2,0 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$.

3. Пунктавы зарад $q = 5,0$ нКл перамяшчаюць у аднародным электростатычным полі, модуль напружанасці якога $E = 40 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Перамяшчэнне, модуль якога $\Delta r = 8,0$ см, утварае вугал $\alpha = 60^\circ$ з напрамкамі ліній напружанасці поля. Вызначце работу сілы поля, змены патэнцыяльнай і кінетычнай энергій зараду, калі знешняя сіла забяспечвае толькі прамалінейнасць перамяшчэння зараду.

4. Работа, выкананая сілай электростатычнага поля пры пераносе зараду $q = 2,4$ нКл з бясконцасці ў некаторы пункт поля, $A = 72$ нДж. Вызначце патэнцыял гэтага пункта поля. Што зменіцца, калі работу па пераносе першапачаткова нерухомага зараду выконвае знешняя сіла супраць сілы электростатычнага поля? Мінімальнае значэнне работы знешняй сілы $A_{\text{знешн}} = 72$ нДж.

5. Модулі напружанасці двух пунктаў поля, створанага нерухомым пунктавым зарадам, адрозніваюцца ў $\alpha = 9$ разоў. Вызначце, у колькі разоў адрозніваюцца патэнцыялы гэтых пунктаў поля.

6. Электростатычнае поле створана двума рознаіменнымі пунктавымі зарадамі, што знаходзяцца на адлегласці $r = 80$ см адзін ад аднаго, модулі якіх $|Q_1| = |Q_2| = 6,4$ нКл. Вызначце модуль напружанасці і патэнцыял у пункце прасторы, які знаходзіцца на сярэдзіне адрэзка, што злучае гэтыя зарады.



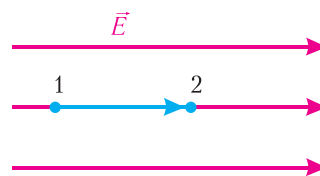
Мал. 117



§ 22. Рознасць патэнцыялаў электростатычнага поля. Напружанне. Сувязь паміж напружаннем і напружанасцю аднароднага электростатычнага поля

Патэнцыяльная энергія любой сістэмы цел, якія ўзаемадзейнічаюць праз патэнцыяльныя сілы, залежыць ад выбару нулявога пункта (нулявога ўзроўню). Аднак змяненне патэнцыяльнай энергіі адназначна характарызуе працэс пераходу сістэмы з аднаго стану ў другі. Гэта датычыцца і змены патэнцыяльнай энергіі зараджанай часціцы (заряду) у электростатычным полі.

Рознасць патэнцыялаў. Перамяшчэнне зараджаных часціц у электростатычным полі, якое суправаджаецца змяненнем іх патэнцыяльнай энергіі, характарызуюць, выкарыстоўваючы паняцце «рознасць патэнцыялаў». Як і прырашчэнне патэнцыяльнай энергіі, рознасць патэнцыялаў не залежыць ад выбару нулявога пункта. Няхай пробны зарад q_0 перамяшчаецца ў электростатычным полі пад дзеяннем сілы поля з пункта 1 у пункт 2, патэнцыялы якіх φ_1 і φ_2 (мал. 118).



Мал. 118

Рознасць патэнцыялаў U_{12} паміж двума пунктамі электростатычнага поля — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам работы, якую выконвае сіла поля пры перамяшчэнні пробнага зараду з пачатковага пункта ў канцавы, да значэння гэтага зараду:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}.$$

З улікам выразаў (21.3) і (21.4) атрымаем:

$$U_{12} = \frac{W_{п1} - W_{п2}}{q_0} = \frac{\varphi_1 q_0 - \varphi_2 q_0}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (22.1)$$

З выразу (22.1) вынікае, што рознасць патэнцыялаў лікава роўная змяншэнню патэнцыяльнай энергіі перамяшчанага ў полі адзінкавага пробнага зараду.

Супрацьлеглую па знаку рознасці патэнцыялаў велічыню называюць прырашчэннем патэнцыялу $\Delta\varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 = -(\varphi_1 - \varphi_2) = -U_{12}$.

За адзінку рознасці патэнцыялаў у СІ прымаюць вольт (В). 1 В — рознасць патэнцыялаў U_{12} такіх двух пунктаў поля, для якіх пры перамяшчэнні зараду 1 Кл з пункта 1 у пункт 2 сіла, што дзейнічае на зарад з боку поля, выканала б работу 1 Дж.

Адзначым, што калі гавораць пра «патэнцыял поля ў некаторым пункце», то пад гэтым заўсёды разумеюць рознасць патэнцыялаў паміж дадзеным пунктам і пунктам, патэнцыял поля ў якім прынялі роўным нулю.

Патэнцыял правадніка можна вымераць пры дапамозе электромметра. Для гэтага праваднік злучаюць са стрэлкай электромметра, корпус якога зязямляюць. Адхіленне стрэлкі электромметра пакажа наяўнасць рознасці патэнцыялаў паміж правадніком і Зямлёй. Калі прыняць патэнцыял Зямлі роўным нулю, то можна лічыць, што электромметр вымярае патэнцыял правадніка.

Калі ёсць два зараджаныя праваднікі, то, далучыўшы адзін з іх да стрэлкі, а другі — да корпуса электромметра, вымяраюць рознасць патэнцыялаў паміж зараджанымі праваднікамі.

Сувязь паміж напружаннем і напружанасцю аднароднага электрстатычнага поля. Тэрмін «напружанне» ўвёў у 1792 г. Вольта. Адзначым, што для электрстатычных палёў паняцці «электрычнае напружанне» і «рознасць патэнцыялаў» тоесныя.

Работу, выкананую сілай аднароднага электрстатычнага поля напружанасцю \vec{E} пры перамяшчэнні пробнага дадатнага зараду q_0 з пункта 1 з патэнцыялам φ_1 у пункт 2 з патэнцыялам $\varphi_2 < \varphi_1$, можна вызначыць паводле выразу (22.1)

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2),$$

а ў адпаведнасці з выразам (21.1)

$$A_{12} = q_0Ed,$$

дзе d — модуль перамяшчэння зараду ўздоўж лініі напружанасці аднароднага электрстатычнага поля.

Прыраўняем адпаведныя часткі роўнасцей і знойдем выраз, які ўстанаўлівае сувязь паміж модулем напружанасці аднароднага электрстатычнага поля і рознасцю патэнцыялаў, гэта значыць паміж дзвюма характарыстыкамі электрстатычнага поля: $q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0Ed$, адкуль

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = -\frac{\Delta\varphi_{12}}{d}. \quad (22.2)$$

З выразу (22.2) вынікае: чым большая рознасць патэнцыялаў паміж двума пунктамі аднароднага электрстатычнага поля, тым большы модуль напружанасці поля. Калі рознасць патэнцыялаў роўная нулю (патэнцыял поля не мяняецца), то модуль напружанасці поля таксама роўны нулю.

Прымаючы пад увагу, што $U_{12} = -\Delta\varphi_{12}$, атрымаем:

$$E = \frac{U_{12}}{d}. \quad (22.3)$$

На падставе формулы (22.3) уводзяць адзінку напружанасці СІ вольт на метр $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$. 1 $\frac{\text{В}}{\text{м}}$ — модуль напружанасці такога аднароднага электростатычнага поля, у якім напружанне паміж двума пунктамі, размешчанымі на адной і той лініі напружанасці на адлегласці 1 м, складае 1 В.

Выкарыстоўваючы тэрмін «напружанне», на практыцы пункты 1 і 2 поля выбіраюць так, каб $U_{12} > 0$.



Рознасцю патэнцыялаў паміж двума пунктамі электростатычнага поля называюць фізічную скалярную велічыню, роўную адносінам работы, якую выконвае сіла поля пры перамяшчэнні пробнага зараду з пачатковага пункта ў канцавы пункт, да значэння перамяшчанага зараду:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0}$$

Рознасць патэнцыялаў лікава роўная змяншэнню патэнцыяльнай энергіі перамяшчанага ў полі адзінкавага пробнага зараду:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\Delta W_{п12}}{q_0}$$

Работа, выкананая сілай поля пры перамяшчэнні зараду:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U_{12}$$

Модуль напружанасці аднароднага электростатычнага поля і рознасць патэнцыялаў (напружанне) звязаны паміж сабой суадносінамі:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U_{12}}{d},$$

калі пункты 1 і 2 поля выбраны так, што $U_{12} > 0$



1. Што называюць рознасцю патэнцыялаў?
2. Як рознасць патэнцыялаў паміж двума пунктамі поля залежыць ад работы сілы электростатычнага поля?
3. У якіх адзінках вымяраюць рознасць патэнцыялаў?
4. Як звязана напружанне з напружанасцю аднароднага электростатычнага поля?

5. Запоўніце таблицу ў шытку і зрабіце выснову.

№ п/п	Пытанне	Аб'екты для параўнання	
		Напружанасць	Патэнцыял
1	З'яўляецца вектарнай або скалярнай фізічнай велічынёй?		
2	Што характарызуе дадзеная фізічная велічыня?		
3	Як вызначаюць дадзеную фізічную велічыню?		
4	Як вызначаюць дадзеную фізічную велічыню для электростатычнага поля пунктавага зараду?		
5	Чаму роўная работа па перамяшчэнні зараду ў аднародным полі?		
6	Ці выконваецца прынцып суперпазіцыі для дадзенай велічыні?		
7	Як звязаны напружанасць і патэнцыял (рознасць патэнцыялаў)?		

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Электростатычнае поле створана пунктавым зарадам $Q = 2,4$ нКл. Вызначце работу сілы поля па пераносе пробнага зараду $q_0 = 3,0$ пКл з пункта A ў пункт B , калі пункты знаходзяцца на адлегласцях $r_A = 1,0$ м і $r_B = 4,0$ м ад зараду-крыніцы поля, а асяроддзе — аднароднае рэчыва з дыэлектрычнай пранікальнасцю $\epsilon = 2,0$.

Дадзена:

$$Q = 2,4 \text{ нКл} = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_0 = 3,0 \text{ пКл} = 3,0 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$$

$$r_A = 1,0 \text{ м}$$

$$r_B = 4,0 \text{ м}$$

$$\epsilon = 2,0$$

$$A_{AB} = ?$$

Рашэнне. Поле электростатычнае, таму работа сілы поля пры пераносе пробнага зараду q_0 з пункта A ў пункт B не залежыць ад формы траекторыі і яе можна вызначыць па формуле $A_{AB} = q_0(\varphi_A - \varphi_B)$. Патэнцыялы

$$\text{пунктаў } A \text{ і } B \text{ у дадзеным асяроддзі } \varphi_A = \frac{kQ}{\epsilon r_A}$$

$$\text{і } \varphi_B = \frac{kQ}{\epsilon r_B} \text{ адпаведна.}$$

Тады

$$A_{AB} = q_0 \left(\frac{kQ}{\epsilon r_A} - \frac{kQ}{\epsilon r_B} \right) = \frac{kQq_0}{\epsilon} \cdot \frac{r_B - r_A}{r_A r_B}.$$

Падставіўшы лікавыя значэнні, атрымаем

$$A_{AB} = \frac{9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 3,0 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \cdot (4,0 \text{ м} - 1,0 \text{ м})}{2,0 \cdot 1,0 \text{ м} \cdot 4,0 \text{ м}} = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.$$

Адказ: $A_{AB} = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$.

Прыклад 2. Электрон пачынае рухацца ў электрычным полі ад пункта 1 да пункта 2. Вызначце модуль скорасці руху электрона ў пункце 2, калі ён па-скараецца рознасцю патэнцыялаў $\varphi_1 - \varphi_2 = -40 \text{ В}$. Модуль зараду электрона $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, а яго маса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

Дадзена:

$$v_1 = 0$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -40 \text{ В}$$

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

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v_2 = ?$$

Рашэнне. Сіла электрычнага поля выконвае работу па змяненні кінетычнай энергіі электрона: $A_{12} = \Delta W_k$. Работу сілы поля таксама можна вызначыць па формуле $A_{12} = e(\varphi_1 - \varphi_2)$. Тады

$$\Delta W_k = e(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1)$$

Змена кінетычнай энергіі электрона

$$\Delta W_k = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2}, \text{ дзе } \frac{m_e v_1^2}{2} = 0.$$

Тады з улікам формулы (1) модуль скорасці руху электрона ў пункце 2:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta W_k}{m_e}} = \sqrt{\frac{2e(\varphi_1 - \varphi_2)}{m_e}}.$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot (-40 \text{ В}) \cdot 2}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 3,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Адказ: $v_2 = 3,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Практыкаванне 16

1. Сіла электростатычнага поля выконвае работу $A = 1,0 \text{ мкДж}$, перамяшчаючы зараджаную часціцу з пункта з патэнцыялам $\varphi_1 = 100 \text{ В}$ у пункт з патэнцыялам $\varphi_2 = 75 \text{ В}$. Вызначце значэнне электрычнага зараду часціцы.

2. Каб у паветры пры атмасферным ціску праскочыла іскра, у ім павінна быць электрстатычнае поле, модуль напружанасці якога не меншы за $E = 3,00 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$. Вызначце рознасць патэнцыялаў паміж воблакам і паверхняй

Зямлі падчас навальніцы, калі даўжыня «іскры» — маланкі — $d = 480 \text{ м}$.

3. Напружанне паміж двума пунктамі, размешчанымі на адной лініі напружанасці аднароднага электрстатычнага поля, $U = 4,8 \text{ кВ}$. Вызначце модуль напружанасці поля, калі адлегласць паміж пунктамі $d = 12 \text{ см}$.

4. Напружанне паміж двума пунктамі, якія знаходзяцца на адной лініі напружанасці аднароднага электрстатычнага поля на адлегласці $r_1 = 1,5 \text{ см}$ адзін ад аднаго, $U_{12} = 18 \text{ В}$. Вызначце напружанне паміж двума пунктамі, размешчанымі на гэтай жа лініі напружанасці на адлегласці $r_2 = 20 \text{ см}$ адзін ад аднаго.

5. Пылінка масай $m = 4,0 \cdot 10^{-9} \text{ кг}$ знаходзіцца ва ўзважаным стане паміж рознаіменна зараджанымі гарызантальнымі пласцінамі, напружанне паміж якімі $U = 12 \text{ В}$, а адлегласць $d = 4,0 \text{ см}$. Вызначце электрычны зарад пылінкі.

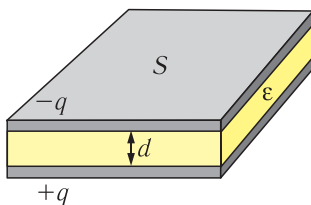
6. Электрон са стану спакою паскараецца ў электрстатычным полі, рухаючыся з пункта 1 у пункт 2. Вызначце напружанне паміж гэтымі пунктамі, калі модуль скорасці руху электрона ў пункце 2 складае $v_2 = 2,7 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Маса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.



§ 22-1
§ 22-2
§ 22-3

§ 23. кандэнсатары. Электраёмістасць кандэнсатара. Электраёмістасць плоскага кандэнсатара

У многіх электратэхнічных і радыётэхнічных прыборах выкарыстоўваюць прылады, здольныя пры малых памерах назапашваць значныя рознаіменныя электрычныя зарады і звязаную з імі электрычную энергію. Якія гэтыя прылады і ад чаго залежаць назапашаныя імі зарады і энергія?



Мал. 119

Кандэнсатары. Для назапашвання значных рознаіменных зарадаў выкарыстоўваюць прыладу, якая называецца *кандэнсатарам* (ад лац. *condensator*, літаральна — той, хто ўшчыльняе, згушчае). Найбольш просты кандэнсатар — сістэма, якая складаецца з двух праваднікоў, падзеленых слоём дыэлектрыка, таўшчыня d якога малая ў параўнанні з памерамі праваднікоў (мал. 119). Праваднікі, якія ўтвараюць

кандэнсатар, называюць яго *абкладкамі*. На абкладках кандэнсатара назапашваюцца супрацьлеглыя па знаку электрычныя зарады, модулі якіх роўныя. Працэс назапашвання зарадаў на абкладках называюць *зарадкай кандэнсатара*, а працэс нейтралізацыі зарадаў пры злучэнні абкладак кандэнсатара правадніком — *разрадкай кандэнсатара*. Модуль зараду, які знаходзіцца на адной з абкладак кандэнсатара, называюць *зарадам кандэнсатара*.

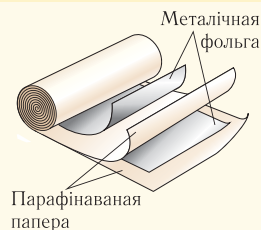


3 гісторыі фізікі

У 1745–1746 гг. нямецкі фізік Эвальд фон Клейст (1700–1748) і нідэрландскі фізік Пітэр ван Мушэнбрук (1692–1761) незалежна адзін ад аднаго вынайшлі першы кандэнсатар — лейдэнскую банку. Вынаходства кандэнсатара спрыяла вывучэнню электрычных з’яў, бо дазволіла назапашваць вялікія электрычныя зарады.

Цікава ведаць

Шырока распаўсюджаны тып кандэнсатараў уяўляе з сябе дзве стужкі металічнай фольгі, падзеленыя тонкай парафінаванай паперай, полістыролам, слюдой або іншым дыэлектрыкам. Усё гэта згорнута ў тугі рулон і запаяна (мал. 120). Выкарыстоўваюць і так званыя паветраныя кандэнсары, у якіх ізалявальным слоём, што аддзяляе праваднікі, з’яўляецца паветра.



Мал. 120

Электраёмістасць кандэнсатара. У працэсе зарадкі найбольш простага кандэнсатара яго абкладкі набываюць супрацьлеглыя па знаку зарады q і $-q$, модулі якіх роўныя. Гэтыя зарады ствараюць паміж абкладкамі электростатычнае поле, лініі напружанасці якога пачынаюцца на дадатна зараджанай абкладцы і заканчваюцца на адмоўна зараджанай. Шматлікія эксперыменты сведчаць, што пры нязменных памерах і форме праваднікоў (абкладак кандэнсатара), а таксама дыэлектрычных уласцівасцях асяроддзя, у якім яны знаходзяцца, захоўваецца прамая прапарцыянальная залежнасць паміж зарадам кандэнсатара і напружаннем паміж яго абкладкамі.

Такім чынам, велічыня, роўная адносінам $\frac{q}{U}$ зараду кандэнсатара да напружання паміж яго абкладкамі, з’яўляецца пастаяннай для дадзенага кандэнсатара і не залежыць ні ад зараду, ні ад напружання. Гэтую велічыню назвалі *электрычнай ёмістасцю* C (электраёмістасцю). Электраёмістасць колькасна характарызуе здольнасць кандэнсатара назапашваць электрычныя зарады.

Электрычная ёмістасць кандэнсатара — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам зараду кандэнсатара да напружання паміж яго абкладкамі:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (23.1)$$

Прааналізаваўшы формулу (23.1), можна зрабіць выснову: чым меншае напружанне U на абкладках кандэнсатара пры перадачы ім зарадаў q і $-q$, тым большая электраёмістасць кандэнсатара.

Адзінкай электрычнай ёмістасці ў СІ з'яўляецца фарад (Ф).

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

1 Ф — вельмі вялікая электраёмістасць. Электраёмістасцю $C = 1 \text{ Ф}$ валодаў бы змешчаны ў вакууме адасоблены шар радыусам $R = 9 \cdot 10^9 \text{ м}$ (для параўнання: радыус зямнога шара $R_3 = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$). Таму на практыцы прымяняюць дзельныя адзінкі: мікрафарад ($1 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$), нанафарад ($1 \text{ нФ} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$) і пікафарад ($1 \text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$).

Напрыклад, электраёмістасць такога вялізнага правадніка, як зямны шар, роўная $C = 0,71 \text{ мФ}$, а электраёмістасць чалавечага цела прыкладна $C = 50 \text{ пФ}$.

Ад тэорыі да практыкі

1. Ці зменіцца электраёмістасць кандэнсатара, калі: а) павялічыць напружанне паміж яго абкладкамі; б) паменшыць зарад кандэнсатара?
2. Электраёмістасць кандэнсатара $C = 10 \text{ нФ}$. Які зарад кандэнсатара, калі напружанне паміж яго абкладкам $U = 150 \text{ В}$?

3 гісторыі фізікі

У XVII–XVIII стст. вучоныя разглядалі электрычнасць як «нематэрыяльную вадкасць». Гэтая «вадкасць» магла «ўлівацца» ў праваднік і «вылівацца» з яго. Так з'явіўся тэрмін «электрычная ёмістасць».

Цікава ведаць

На схемах намінальную электраёмістасць кандэнсатараў звычайна паказваюць у мікрафарадах і пікафарадах. Аднак рэальная электраёмістасць кандэнсатара можа значна мяняцца ў залежнасці ад многіх фактараў. Яшчэ адной, не менш важнай,

характарыстыкай кандэнсатараў з’яўляецца намінальнае напружанне — значэнне напружання, пазначанае на кандэнсатары, пры якім яго можна выкарыстоўваць у задзеных умовах на працягу тэрміну службы. Гэтае напружанне можа знаходзіцца ў межах ад некалькіх вольт да некалькіх соцень кілавольт. Намінальнае напружанне залежыць ад канструкцыі кандэнсатара і ўласцівасцей выкарыстаных матэрыялаў. Для многіх тыпаў кандэнсатараў з павелічэннем тэмпературы дапушчальнае напружанне памяншаецца.

Электраёмістасць плоскага кандэнсатара.

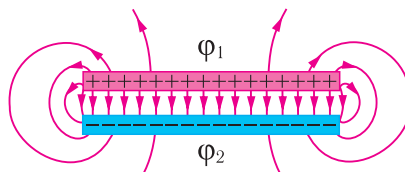
Калі абкладкі кандэнсатара з’яўляюцца дзве аднолькавыя паралельныя адна адной пласціны, то кандэнсатар называюць *плоскім*. Электростатычнае поле зараджанага плоскага кандэнсатара ў асноўным засяроджана паміж яго абкладкамі і з’яўляецца практычна аднародным. Паблізу краёў пласцін аднароднасць поля парушаецца, аднак гэта часта не прымаюць пад увагу, калі адлегласць паміж пласцінамі значна меншая за іх памеры (мал. 121).

Каб вызначыць, ад чаго залежыць электраёмістасць плоскага кандэнсатара, правядзём некалькі доследаў. У якасці абкладак кандэнсатара выкарыстаем дзве металічныя пласціны, размешчаныя ў паветры на некаторай адлегласці паралельна адна адной.

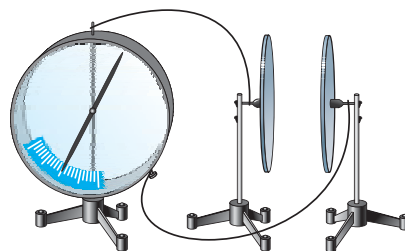
Злучым стрыжань электрометра з адной з пласцін, а яго корпус — з другой (мал. 122). Зарадзім кандэнсатар, падключыўшы яго да крыніцы току на пэўны прамежак часу. Калі паміж пласцінамі кандэнсатара ўзнікне напружанне (стрэлка электрометра адхіліцца), адключым яго ад крыніцы току.

Калі перамяшчаць пласціны адносна адна адной, памяншаючы плошчу іх узаемнага перакрыцця пры нязменнай адлегласці паміж імі, то паказанні электрометра павялічваюцца, нягледзячы на тое што нададзены пласцінам пры зарадцы кандэнсатара зарад не змяняецца. Паколькі напружанне паміж пласцінамі павялічваецца пры памяншэнні плошчы перакрыцця пласцін кандэнсатара, то яго электраёмістасць павінна змяншацца ($S \downarrow \Rightarrow C \downarrow$).

Павялічваючы адлегласць паміж пласцінамі кандэнсатара і пры гэтым не змяняючы плошчу іх перакрыцця, будзем назіраць узрастанне паказанняў электрометра, гэта значыць павелічэнне напружання паміж пласцінамі кандэнсатара, што магчыма пры памяншэнні яго электраёмістасці. Значыць, чым большая адлегласць паміж пласцінамі кандэнсатара, тым меншая яго электраёмістасць ($d \uparrow \Rightarrow C \downarrow$).



Мал. 121



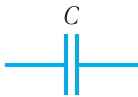
Мал. 122

Калі паміж абкладкамі кандэнсатара змясціць пласціну з дыэлектрыка, напрыклад са шкла, то паказанні электромэтра зменшацца. Напружанне паміж абкладкамі ў гэтым выпадку памяншаецца, значыць, электраёмістасць кандэнсатара павялічваецца ($\epsilon \uparrow \Rightarrow C \uparrow$).

У СІ каэфіцыентам прапарцыянальнасці паміж электраёмістасцю кандэнсатара і велічынямі (S , d , ϵ), якія яе вызначаюць, з'яўляецца электрычная пастаянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$.

Вынікі эксперыментаў дазваляюць запісаць формулу для вызначэння электраёмістасці плоскага кандэнсатара:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$



Мал. 123

дзе S — плошча адной з абкладак кандэнсатара (плошча ўзаемнага перакрыцця абкладак кандэнсатара); d — адлегласць паміж абкладкамі; ϵ — дыэлектрычная пранікальнасць асяроддзя, якое знаходзіцца паміж яго абкладкамі.

Умоўная выява кандэнсатара пастаяннай электраёмістасці на электрычных схемах прыведзена на малюнку 123.

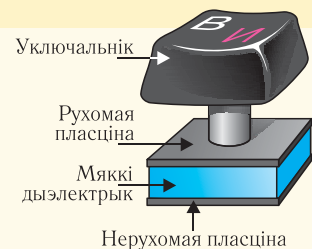
Ад тэорыі да практыкі

1. Адзін з двух адасобленых праводных шароў суцэльны, а другі — мае ўнутры поласць. Калі дыяметры шароў аднолькавыя, то ў якога з іх большая электраёмістасць?

2. Адлегласць паміж абкладкамі плоскага паветранага кандэнсатара паменшылі ў два разы. Пры гэтым зарад кандэнсатара застаўся ранейшы. Ці змяніліся напружанне паміж абкладкамі і напружанасць поля? Калі змяніліся, то як?

Цікава ведаць

Залежнасць электраёмістасці кандэнсатара ад адлегласці паміж яго абкладкамі выкарыстоўваюць у схемах кадзіравання клавiятуры персанальнага камп'ютара. Пад кожнай клавiшай знаходзіцца кандэнсатар, электраёмістасць якога змяняецца пры націсканні на клавiшу. Мікрасхема, падключаная да кожнай клавiшы, пры змене электраёмістасці выдае кадзіраваны сігнал, які адпавядае дадзенай літары (мал. 124).



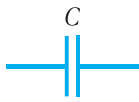
Мал. 124



Электрычная ёмістасць кандэнсатара — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам зараду кандэнсатара да напружання паміж яго абкладкамі:

$$C = \frac{q}{U}$$

Умоўнае абзначэнне:



Электраёмістасць плоскага кандэнсатара:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

Залежыць ад плошчы ўзаемнага перакрыцця абкладак, адлегласці паміж імі і дыэлектрычнай пранікальнасці асяроддзя, якое знаходзіцца паміж абкладкамі



1. Што ўяўляе з сябе кандэнсатар? Якое яго прызначэнне?
2. Які працэс называюць зарадкай кандэнсатара? разрадкай кандэнсатара?
3. Што разумеюць пад зарадам кандэнсатара?
4. Якую фізічную велічыню называюць электраёмістасцю кандэнсатара? У якіх адзінках яе вымяраюць?
5. Ад чаго залежыць электраёмістасць плоскага кандэнсатара?
6. Плоскі паветраны кандэнсатар далучаны да крыніцы пастаяннага току. Ці змяняцца зарад кандэнсатара і напружанне на ім, калі прастору паміж абкладкамі кандэнсатара запоўніць дыэлектрыкам?

Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Плоскаму кандэнсатару электраёмістасцю $C = 0,4$ мкФ перададзены электрычны зарад $q = 2$ нКл. Вызначце модуль напружанасці электростатычнага поля паміж абкладкамі кандэнсатара, калі адлегласць паміж імі $d = 5$ мм.

Дадзена:

$$C = 0,4 \text{ мкФ} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

$$q = 2 \text{ нКл} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$d = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

E — ?

Рашэнне. Модуль напружанасці аднароднага электростатычнага поля вызначым па формуле

$E = \frac{U}{d}$. Паколькі напружанне паміж абкладкамі

кандэнсатара $U = \frac{q}{C}$, то $E = \frac{q}{Cd}$.

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Адказ: $E = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$

Прыклад 2. Прастора паміж абкладкамі плоскага кандэнсатара запоўнена дыэлектрыкам. Кандэнсатар зарадзілі да напружання $U_1 = 1$ кВ і адключылі ад крыніцы току. Вызначце дыэлектрычную пранікальнасць дыэлектрыка, калі пасля яго выдалення з кандэнсатара напружанне павялічылася да $U_2 = 3$ кВ.

Дадзена:

$$U_1 = 1 \text{ кВ} = 1 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$U_2 = 3 \text{ кВ} = 3 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\epsilon_2 = 1$$

$$\epsilon_1 = ?$$

Рашэнне. У абодвух выпадках зарад кандэнсатара будзе аднолькавым $q_1 = q_2$, бо ён быў адключаны ад крыніцы току. Паколькі $q_1 = C_1 U_1$, $q_2 = C_2 U_2$, то

$$C_1 U_1 = C_2 U_2. \quad (1)$$

Электраёмістасць плоскага кандэнсатара вызначаюць па формуле

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}.$$

Для дадзеных выпадкаў электраёмістасці адпаведна роўныя:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 S}{d}. \quad (2)$$

Падставіўшы формулы (2) у роўнасць (1), атрымаем: $\epsilon_1 U_1 = \epsilon_2 U_2$, $\epsilon_1 = \frac{U_2}{U_1} \epsilon_2$.

$$\epsilon_1 = \frac{3 \cdot 10^3 \text{ В}}{1 \cdot 10^3 \text{ В}} \cdot 1 = 3.$$

Адказ: $\epsilon_1 = 3.$

Практыкаванне 17

1. Вызначце электраёмістасць кандэнсатара, калі напружанне паміж яго абкладкамі $U = 20$ В, а зарад $q = 5,0 \cdot 10^{-4}$ Кл.

2. Электраёмістасць плоскага паветранага кандэнсатара $C = 54$ пФ. Вызначце адлегласць паміж яго абкладкамі, калі плошча іх перакрыцця $S = 300$ см².

3. Вызначце, як зменіцца электраёмістасць плоскага кандэнсатара, калі плошчу перакрыцця яго абкладак павялічыць у $\alpha = 2$ разы, а адлегласць паміж імі паменшыць у $\beta = 3$ разы.

4. Абкладкі плоскага кандэнсатара плошчай $S = 100 \text{ см}^2$ кожная размешчаны на адлегласці $d = 2,0 \text{ мм}$. Прастора паміж імі запоўнена слюдой, дыэлектрычная пранікальнасць якой $\epsilon = 6,0$. Вызначце зарад кандэнсатара, калі напружанне паміж яго абкладкамі $U = 3,0 \text{ кВ}$.

5. Вызначце модуль напружанасці электростатычнага поля паміж абкладкамі плоскага паветранага кандэнсатара, зарад якога $q = 20 \text{ нКл}$, а плошча перакрыцця абкладак $S = 50 \text{ см}^2$.

6. Модуль напружанасці электростатычнага поля ў прасторы паміж абкладкамі плоскага паветранага кандэнсатара $E_1 = 2,1 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Не адключаючы кандэнсатар ад крыніцы току, адлегласць паміж яго абкладкамі зменшылі ў $\alpha = 4,0$ раза. Вызначце модуль напружанасці поля пасля збліжэння абкладак.

7. Кропля, маса якой $m = 1,5 \text{ г}$, знаходзіцца ў раўнавазе паміж гарызантальна размешчанымі абкладкамі плоскага паветранага кандэнсатара, зараджанага да напружання $U = 500 \text{ В}$. Вызначце адлегласць паміж абкладкамі, калі зарад кроплі $q = 0,15 \text{ мкКл}$.

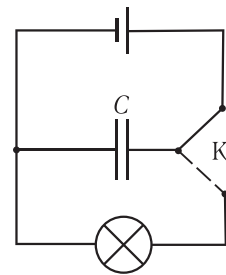


§ 23-1

§ 24. Энергія электростатычнага поля кандэнсатара

Працэс зарадкі кандэнсатара можна ўявіць як перанос зараду q з адной абкладкі на другую, у выніку чаго адна з іх набывае зарад $-q$, а другая — $+q$. Работа, выкананая пры гэтым знешняй сілай, роўная энергіі электростатычнага поля зараджанага кандэнсатара.

Пераканацца ў тым, што зараджаны кандэнсатар валодае энергіяй, можна з дапамогай доследу. Збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, кандэнсатара і электрычнай лямпы. Схема ланцуга прыведзена на малюнку 125. Зарадзім кандэнсатар, далучыўшы яго да крыніцы току. Затым адключым кандэнсатар ад крыніцы току і падключым яго да лямпы. Пры гэтым назіраем кароткачасовую ўспышку святла. У дадзеным выпадку падчас разрадкі кандэнсатара энергія, назапашаная ім пры зарадцы, ператвараецца ва ўнутраную энергію спіралі лямпы, частка гэтай энергіі расходуюецца на выпраменьванне святла. У час праходжання электрычнага току па ланцугу з крыніцай току кандэнсатар зараджаўся, гэта значыць на яго абкладках назапашваліся электрычныя зарады. Пры гэтым паміж абкладкамі кандэнсатара і ў прасторы вакол яго ўзнікла электростатычнае поле.



Мал. 125



Сумарны электрычны зарад абедзвюх абкладак кандэнсатара да яго зарадкі, падчас зарадкі і пасля разрадкі роўны нулю. Адзіная змена, якая адбылася пры разрадцы кандэнсатара, заключаецца ў тым, што знікла электрстатычнае поле, якое стваралася зарадамі абедзвюх абкладак кандэнсатара. Такім чынам, энергіяй валодала электрстатычнае поле, утворанае зарадамі абкладак зараджанага кандэнсатара.

Разлікі пацвярджаюць, што формулу для вызначэння энергіі электрстатычнага поля зараджанага кандэнсатара можна запісаць у выглядзе:

$$W = \frac{qU}{2}, \text{ або } W = \frac{CU^2}{2}, \text{ або } W = \frac{q^2}{2C}.$$

Ад тэорыі да практыкі

Як зменіцца энергія электрстатычнага поля зараджанага кандэнсатара пры павелічэнні адлегласці паміж яго абкладкамі, калі: а) кандэнсатар адключаны ад крыніцы току; б) кандэнсатар падключаны да крыніцы току?

Прымяненне кандэнсатараў. Кандэнсатары знаходзяць шырокае прымяненне ў электратэхніцы, радыётэхнічнай і тэлевізійнай апаратуры, радыёлакацыйнай тэхніцы, тэлефаніі, тэхніцы лічыльна-рашальных прылад, лазернай тэхніцы, электраэнергетыцы (напрыклад, для паляпшэння каэфіцыента магутнасці прамысловых устаноў, рэгулявання напружання ў размеркавальных сетках, у прыладах асвятлення люмінесцэнтнымі лямпамі), металапрамысловасці (напрыклад, для плаўкі і тэрмічнай апрацоўкі металаў), здабыўной прамысловасці (напрыклад, у электравыбуховых прыладах), медыцынскай тэхніцы (напрыклад, у рэнтгенаўскай апаратуры, прыборах электратэрапіі), фотатэхніцы (для атрымання ўспышкі святла пры фатаграфаванні).

У сувязі з гэтым разам з мініяцюрнымі кандэнсатарамі (мал. 126, а), якія маюць масу менш як грам і памеры каля некалькіх міліметраў, існуюць кандэнсатары з масай у некалькі тон (мал. 126, б).



б



Мал. 126



Енергія електростатичнаго поля кандэнсатара

$$W = \frac{qU}{2}$$

$$q = CU$$

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

$$U = \frac{q}{C}$$

$$W = \frac{q^2}{2C}$$



1. Якія факты дазваляюць зрабіць выснову, што електростатичнае поле валодае энергіяй?
2. Якім чынам можна пераканацца ў тым, што зараджаны кандэнсатар валодае энергіяй?
3. Як можна разлічыць энергію електростатичнаго поля зараджанага кандэнсатара?



Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. Вызначце, як і ў колькі разоў зменіцца энергія електростатичнаго поля зараджанага плоскага паветранага кандэнсатара, калі прастору паміж яго абкладкамі запоўніць газай, дыэлектричная пранікальнасць якой $\epsilon_2 = 2$. Разгледзьце выпадкі: а) кандэнсатар адключаны ад крыніцы току; б) кандэнсатар падключаны да крыніцы току.

Дадзена:

$$\epsilon_1 = 1$$

$$\epsilon_2 = 2$$

Рашэнне. Электраёмістасць паветранага кандэнсатара

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d} = \frac{\epsilon_0 S}{d}.$$

Электраёмістасць гэтага кандэнсатара пасля запоўнення

прасторы паміж абкладкамі газай $C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S}{d}$. Значыць, $C_2 = \epsilon_2 C_1$.

У выпадку а) кандэнсатар адключаны ад крыніцы току, таму $q_2 = q_1$. Тады калі энергія електростатичнаго поля паветранага кандэнсатара $W_1 = \frac{q^2}{2C_1}$, то энергія електростатичнаго поля гэтага кандэнсатара, запоўненага газай:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{q^2}{2\epsilon_2 C_1} = \frac{W_1}{\epsilon_2}.$$

Таким чином, енергія електростатичного поля зменшилася ў 2 рази.

У випадку б) конденсатор не був'аю адключаны ад крыніцы току, таму напружанне паміж яго абкладкамі роўнае напружанню паміж полюсамі крыніцы току $U_2 = U_1 = U$. Тады калі энергія електростатичного поля паветранага конденсатора $W_1 = \frac{C_1 U^2}{2}$, то энергія електростатичного поля гэтага конденсатора, запоўненага газай:

$$W_2 = \frac{C_2 U^2}{2} = \frac{\epsilon_2 C_1 U^2}{2} = \epsilon_2 W_1.$$

Таким чином, енергія електростатичного поля павялічылася ў 2 рази.

Адказ: а) энергія електростатичного поля паменшылася ў 2 рази; б) энергія електростатичного поля павялічылася ў 2 рази.

Прыклад 2. Плоскі паветраны конденсатор, плошча перакрыцця абкладак якога $S = 100 \text{ см}^2$, змясцілі ў газу з дыэлектрычнай пранікальнасцю $\epsilon = 2,0$ і падключылі да крыніцы току з напружаннем на полюсах $U = 120 \text{ В}$. Вызначце мінімальную работу, якую неабходна выканаць знешняй сіле, каб пасля адключэння конденсатора ад крыніцы току павольна павялічыць адлегласць паміж яго абкладкамі ад $d_1 = 1,0 \text{ см}$ да $d_2 = 2,0 \text{ см}$.

Дадзена:

$$S = 100 \text{ см}^2 = 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\epsilon = 2,0$$

$$U = 120 \text{ В}$$

$$d_1 = 1,0 \text{ см} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_2 = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$A_{\text{знеш}}^{\text{мін}} \text{ — ?}$$

Рашэнне. Модуль зараду кожнай з абкладак конденсатора

$$q = C_1 U = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U}{d_1}.$$

Энергія електростатичного поля конденсатора да змены адлегласці паміж яго абкладкамі

$$W_1 = \frac{qU}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d_1}.$$

Пасля адключэння конденсатора ад крыніцы току зарады на яго абкладках не змяняюцца.

Энергію електростатичного поля конденсатора пасля павелічэння адлегласці паміж яго пласцінамі вызначым наступным чынам:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{(\epsilon \epsilon_0 S U)^2 d_2}{2d_1^2 \epsilon \epsilon_0 S} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2 d_2}{2d_1^2}.$$

Мінімальная работа, якую неабходна выканаць знешняй сіле, каб павялічыць адлегласць паміж абкладкамі кандэнсатара, роўная прырашчэнню энергіі електростатичнаго поля кандэнсатара, бо пры павольным павелічэнні адлегласці паміж абкладкамі кандэнсатара іх кінетычная энергія застаецца блізкай да нуля.

$$A_{\text{знеш}}^{\min} = W_2 - W_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2 d_2}{2d_1^2} - \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d_1} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d_1} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right).$$

$$A_{\text{знеш}}^{\min} = \frac{2,0 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 120^2 \text{ В}^2}{2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \cdot \left(\frac{2,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}}{\text{м}}}{1,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}}{\text{м}}} - 1 \right) =$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 0,13 \text{ мкДж}.$$

Адказ: $A_{\text{знеш}}^{\min} = 0,13 \text{ мкДж}.$

Практыкаванне 18

1. Вызначце энергію електростатичнаго поля кандэнсатара электраёмістасцю $C = 0,20 \text{ мкФ}$, калі напружанне на ім $U = 200 \text{ В}$.

2. Модуль напружанасці аднароднаго електростатичнаго поля паміж абкладкамі плоскага паветранаго кандэнсатара $E = 200 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Вызначце адлегласць паміж абкладкамі, калі плошча іх перакрыцця $S = 100 \text{ см}^2$, а энергія електростатичнаго поля кандэнсатара $W = 35,4 \text{ мкДж}$.

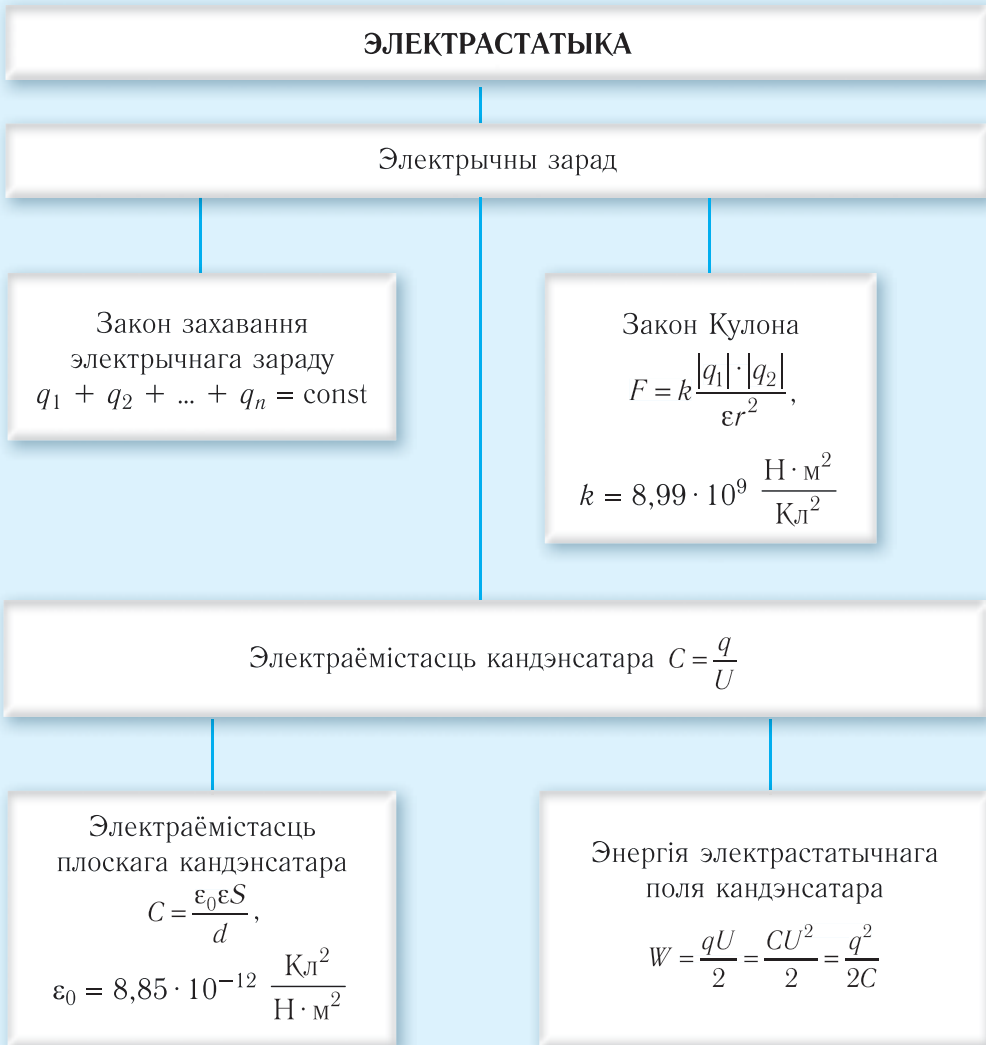
3. Энергія електростатичнаго поля зараджанаго плоскаго кандэнсатара $W_1 = 5 \text{ мкДж}$, калі паміж яго абкладкамі знаходзіцца газа, дыэлектрычная пранікальнасць якой $\epsilon_1 = 2$. Вызначце энергію поля гэтага кандэнсатара, калі прастора паміж яго абкладкамі будзе запоўнена трансфарматарным алеем, дыэлектрычная пранікальнасць якога $\epsilon_2 = 2,5$.

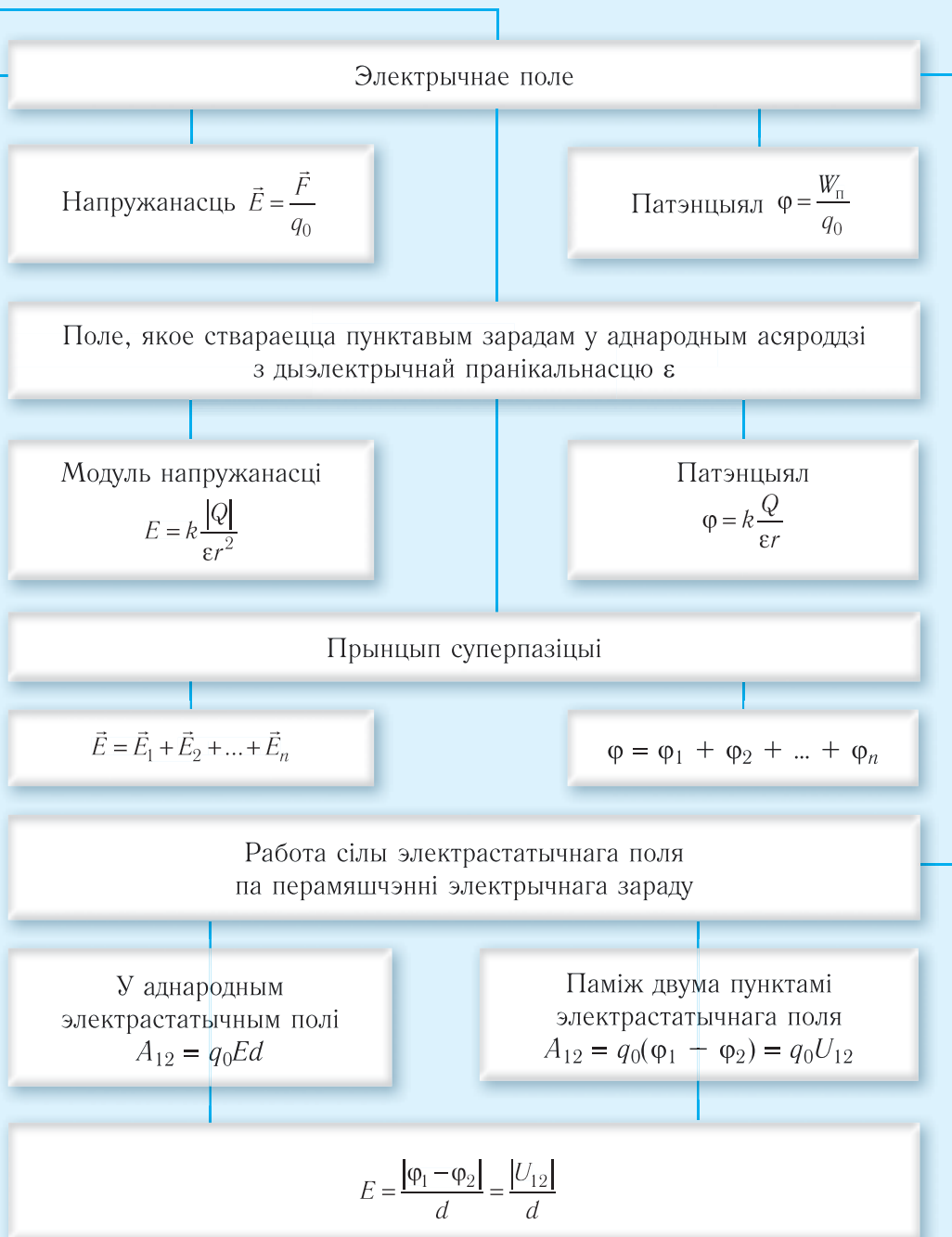
4. Плоскі кандэнсатар, плошча перакрыцця абкладак якога $S = 40 \text{ см}^2$, а адлегласць паміж імі $d = 8,0 \text{ мм}$, запоўнены трансфарматарным алеем з дыэлектрычнай пранікальнасцю $\epsilon = 2,5$. Вызначце энергію і модуль напружанасці електростатичнаго поля кандэнсатара, калі напружанне на ім $U = 200 \text{ В}$.

5. Плоскі кандэнсатар падключылі да крыніцы току і зарадзілі да напружання $U_1 = 220 \text{ В}$. Адключыўшы кандэнсатар ад крыніцы току, павялічылі адлегласць паміж яго абкладкамі ад $d_1 = 1,0 \text{ см}$ да $d_2 = 3,0 \text{ см}$. Вызначце модуль напружанасці електростатичнаго поля і напружанне паміж абкладкамі кандэнсатара пасля іх рассоўвання.



Абагульненне і сістэматызацыя ведаў





Заданні для самакантролю

1. Эбанітавай палачка, пацёртая аб шарсцяную тканіну, атрымала электрычны зарад $q = -8 \cdot 10^{-14}$ Кл. Выберыце правільнае сцвярджэнне.

- 1) На шэрсць з эбанітавай палачкі перайшло $8 \cdot 10^{14}$ электронаў.
- 2) На эбанітавую палачку з шэрсці перайшло $8 \cdot 10^{14}$ электронаў.
- 3) На шэрсць з эбанітавай палачкі перайшло $5 \cdot 10^5$ электронаў.
- 4) На эбанітавую палачку з шэрсці перайшло $5 \cdot 10^5$ электронаў.
- 5) На шэрсць з эбанітавай палачкі перайшло $8 \cdot 10^5$ электронаў.
- 6) На эбанітавую палачку з шэрсці перайшло $8 \cdot 10^5$ электронаў.

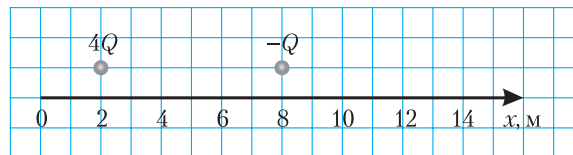
2. Металічны шар, зарад якога $q = -4,8 \cdot 10^{-11}$ Кл, прывялі ў судакрананне з такім самым незараджаным шарам. Вызначце колькасць залішніх электронаў, якія засталіся на першым шары.

3. Вызначце, як і ў колькі разоў зменіцца модуль сіл электрстатычнага ўзаемадзеяння шарыкаў, калі зарад аднаго з іх павялічыць у $\alpha = 5,0$ раза, а адлегласць паміж імі паменшыць у $\beta = 2,0$ раза.

4. Пунктавыя зарады $Q_1 = 50$ нКл і $Q_2 = 80$ нКл замацаваны на адлегласці $r = 2,0$ м адзін ад аднаго ў вакууме. У пункце прасторы, які знаходзіцца на сярэдзіне адрэзка прамой, што злучае зарады, размешчаны трэці пунктавы зарад $Q_3 = 1,0$ нКл. Вызначце рэзультуючую электрстатычную сілу, якая дзейнічае на трэці зарад.

5. Два маленькія шарыкі масай $m = 0,04$ кг кожны падвешаны ў адным пункце на нітках даўжынёй $l = 0,2$ м. Пасля перадачы шарыкам аднолькавых зарадаў ніткі разышліся на вугал $\alpha = 60^\circ$. Вызначце модуль зарадаў шарыкаў.

6. Пунктавыя зарады замацаваны ў прасторы адносна восі Ox (мал. 127). Вызначце каардынату пункта, у якім напружанасць рэзультуючага электрстатычнага поля, ствараемага гэтымі зарадамі, набывае нулявое значэнне.



Мал. 127

7. Шарык, маса і зарад якога $m = 0,040$ г і $q = 34$ пКл адпаведна, падвешаны на шаўковай нітцы. Шарык змяшчаюць у электрстатычнае поле, напружанасць якога аднолькавая ва ўсіх пунктах поля і накіравана гарызонтальна. Вызначце вугал α адхілення ніткі з шарыкам ад вертыкалі, калі модуль напружанасці поля $E = 1,01 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

8. Адлегласць паміж пунктавымі зарадамі $Q_1 = 3,2 \cdot 10^{-9}$ Кл і $Q_2 = -3,2 \cdot 10^{-9}$ Кл складае $r_0 = 12$ см. Вызначце модуль напружанасці электростатычнага поля ў пунктах, аддаленых ад абодвух зарадаў на адлегласць $r = 8,0$ см.

9. У дзвюх вяршынях роўнастаронняга трохвугольніка са стараной даўжынёй $a = 25$ см знаходзяцца зарады, модулі якіх $|Q_1| = |Q_2| = 5,0$ нКл. Вызначце патэнцыял поля ў трэцяй вяршыні трохвугольніка, калі: а) абодва зарады дадатныя; б) абодва зарады адмоўныя; в) зарады супрацьлеглыя па знаку.

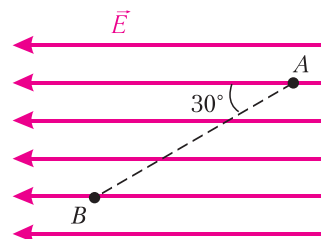
10. Электрон, рухаючыся ў аднародным полі, модуль напружанасці якога $E = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$, перамясціўся на адлегласць $d = 25$ см. Вызначце змяненне патэнцыяльнай і кінетычнай энергій электрона, калі напрамак руху электрона: а) супадае з напрамкам ліній напружанасці поля; б) супрацьлеглы напрамку ліній напружанасці поля; в) перпендыкулярны напрамку ліній напружанасці поля.

11. Электрон і пратон са стану спакою паскараюцца ў адным і тым аднародным электростатычным полі да скорасцей, модулі якіх значна меншыя за скорасць святла. Вызначце адносіны модуля скорасці электрона да модуля скорасці пратона пасля праходжання імі аднолькавых адлегласцей. Маса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, а маса пратона $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг.

12. Два супрацьлеглыя па знаку пунктавыя зарады, модулі якіх роўныя, знаходзяцца ў паветры. У пункце прасторы, які знаходзіцца на працягу прамой, што злучае зарады, і размешчаны на адлегласцях $r_1 = 10$ мм і $r_2 = 30$ мм ад зарадаў, патэнцыял электростатычнага поля $\phi = 75$ мВ. Вызначце модуль напружанасці рэзультуючага поля ў гэтым пункце.

13. Адлегласць паміж пунктамі A і B аднароднага электростатычнага поля (мал. 128), модуль напружанасці якога $E = 40 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, складае $r = 4,0$ см. Вызначце напружанне паміж гэтымі пунктамі.

14. Два маленькія шарыкі, электрычныя зарады якіх $q_1 = 3,20$ нКл і $q_2 = 7,20$ нКл, знаходзяцца на адлегласці $r_1 = 40,0$ см адзін ад аднаго. Вызначце мінімальнае значэнне работы, якую трэба выканаць, каб зблізіць шарыкі да адлегласці $r_2 = 25,0$ см.



Мал. 128

15. Модулі сіл электрстатычнага ўзаемадзеяння пунктавых зарадаў, якія знаходзяцца на адлегласці $r_1 = 20,0$ см у паветры, $F_1 = F_2 = F = 90,0$ мкН, а модулі сіл электрстатычнага ўзаемадзеяння гэтых жа зарадаў у некаторым асяроддзі на адлегласці $r_2 = 40,0$ см складаюць $F'_1 = F'_2 = F' = 10,0$ мкН. Вызначце дыэлектрычную пранікальнасць асяроддзя.

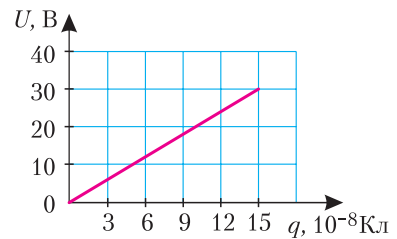
16. У аднародным электрстатычным полі, напружанасць якога накіравана вертыкальна ўверх, а яе модуль $E = 8,0 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, на лёгкай непроводнай нітцы падвешаны незараджаны шарык. Вызначце, у колькі разоў зменіцца модуль сілы пругкасці ніткі пасля надання шарыку зараду $q = -1,8 \cdot 10^{-10}$ Кл, калі яго маса $m = 1,2$ мг.

17. Модуль напружанасці аднароднага электрстатычнага поля $E = 120 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. Вызначце, за які прамежак часу электрон, пачынаючы рухацца са стану спакою, выканае ў гэтым полі перамяшчэнне, модуль якога $\Delta r = 30$ мм. Выпраменьванне электрамагнітнай энергіі не прымаць пад увагу.

18. На малюнку 129 прыведзены графік залежнасці напружання паміж абкладкамі кандэнсатара ад модуля зараду на іх. Вызначце электраёмнасць кандэнсатара.

19. Плоскі паветраны кандэнсатар замянілі іншым кандэнсатарам такой самой электрычнай ёмістасці. У другога кандэнсатара плошча абкладак у $\alpha = 4$ разы меншая, чым плошча абкладак першага. Вызначце дыэлектрычную пранікальнасць дыэлектрыка, які запаўняе прастору паміж абкладкамі другога кандэнсатара, калі адлегласці паміж абкладкамі ў кандэнсатараў аднолькавыя.

20. Паміж абкладкамі плоскага кандэнсатара знаходзіцца дыэлектрык, дыэлектрычная пранікальнасць якога $\epsilon = 2,0$. Кандэнсатар зарадзілі да напружання $U_1 = 1,4$ кВ, пасля чаго адключылі ад крыніцы току. Механічная работа, якую трэба выканаць супраць электрычных сіл, каб выдаліць дыэлектрык з кандэнсатара, $A_{\text{знеш}} = 10$ Дж. Вызначце электраёмнасць кандэнсатара пры адсутнасці дыэлектрыка.



Мал. 129



РАЗДЗЕЛ 4

ПАСТАЯННЫ ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК

Пастаянны ток — мадэль электрычнага току, у якой сіла току не залежыць ад часу пры нязменным размеркаванні зараду ў правадніку.

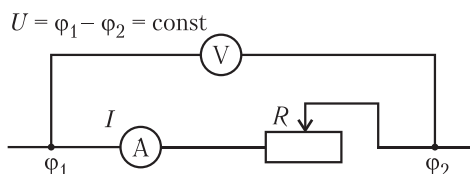
Тэрмін «электрычны ток» і азначэнне напрамку току ўведзены Андрэ Мары Амперам у 1820 г.

Электрычны ток — накіраваны (упарадкаваны) рух зараджаных часціц — носбітаў зараду.

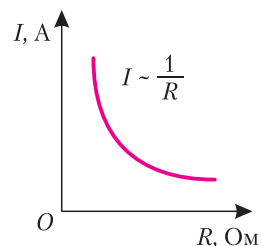
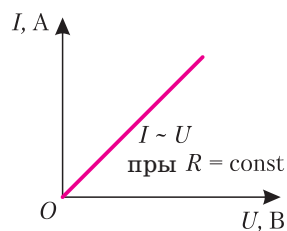
- Сіла току — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам зараду, які прайшоў праз папярочнае сячэнне правадніка за некаторы прамежак часу, да гэтага прамежку часу.
- За напрамак электрычнага току ўмоўна прыняты напрамак упарадкаванага руху дадатна зараджаных часціц.
- Сіла току на аднародным участку ланцуга прама прапарцыянальная напружанню, прыкладзенаму да гэтага ўчастка, і адваротна прапарцыянальная яго супраціўленню:

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

(Закон Ома для ўчастка электрычнага ланцуга.)

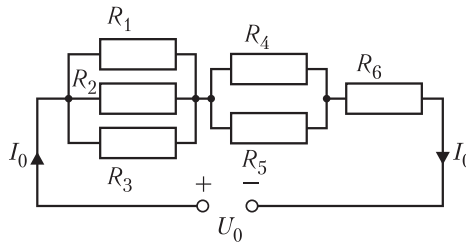


$$I = \frac{q}{t}$$



Супраціўленне правадніка прама прапарцыянальнае яго даўжыні і адваротна прапарцыянальнае плошчы папярочнага сячэння: $R = \rho \frac{l}{S}$.

Злучэнне праваднікоў



паслядоўнае

$$I_0 = I_{123} = I_{45} = I_6$$

$$U_0 = U_{123} + U_{45} + U_6$$

$$R_0 = R_{123} + R_{45} + R_6$$

паралельнае

$$I_{123} = I_1 + I_2 + I_3; I_{45} = I_4 + I_5$$

$$U_{123} = U_1 = U_2 = U_3; U_{45} = U_4 = U_5$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{123}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \\ \Rightarrow R_{123} &= \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \\ \frac{1}{R_{45}} &= \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \Rightarrow R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \end{aligned}$$

У 8-м класе вы навучыліся збіраць электрычныя ланцугі і ведаеце, што абавязковымі іх зв'язамі з'яўляюцца крыніца току і спажывец. Крыніца току забяспечвае патрэбнае напружанне на спажывацы — прыладзе, у якой трэба стварыць электрычны ток і выкарыстаць нейкія з яго дзеянняў: цеплавае, хімічнае, магнітнае, светлавае. У дадзеным раздзеле мы разгледзім умовы існавання току і працэсы, якія адбываюцца ў электрычным ланцугу, уявім характарыстыкі крыніцы току. Гэта стала магчымым пасля вывучэння характарыстык электростатычнага поля.

§ 25. Умовы існавання пастаяннага электрычнага току. Пабочныя сілы. ЭРС крыніцы току

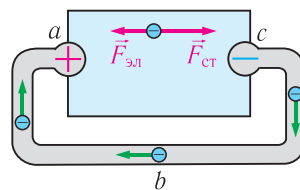
Для ўзнікнення электрычнага току патрэбна наяўнасць свабодных зараджаных часціц, здольных перамяшчацца па правадніку пад дзеяннем сілы электрычнага поля. Такія электрычны ток называюць токам праваднасці. Што ж забяспечвае існаванне электрычнага току ў правадніку на працягу доўгага прамежку часу?

Умовы існавання пастаяннага электрычнага току. Для падтрымання ў правадніку пастаяннага электрычнага току неабходна, каб праваднік з'яўляўся часткай замкнутага ланцуга. Але вы ведаеце, што работа электростатычнага поля пры перамяшчэнні электрычнага зараду па замкнутым контуры роўная нулю. Значыць, у ланцугу павінен быць участак, на якім ажыццяўляецца работа па перамяшчэнні зараду супраць сіл электрычнага поля. Такім участкам з'яўляецца крыніца току.

Разгледзім замкнуты электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току (участак ac) і металічнага правадніка (участак abc) (мал. 130).

У правадніку abc свабодныя электроны пад дзеяннем сіл электрычнага поля перамяшчаюцца ад пункта c да пункта a . Каб рух носбітаў зараду ў ланцугу быў працяглым, электроны ад пункта a павінны перамяшчацца да пункта c . Самаадвольна такое перамяшчэнне электронаў адбывацца не можа, бо на іх у супрацьлеглым напрамку (ад пункта c да пункта a) дзейнічае сіла электрычнага поля $\vec{F}_{эл}$ (гл. мал. 130). Рух электронаў у напрамку, супрацьлеглым напрамку сілы электрычнага поля, магчымы толькі пад дзеяннем сілы $\vec{F}_{паб}$ неэлектростатычнага паходжання, якая атрымала назву *пабочная сіла*.

Пабочныя сілы. Пабочныя сілы дзейнічаюць на зараджаныя часціцы толькі ўнутры крыніцы току, выконваючы работу па раздзяленні дадатных і адмоўных зарадаў. У выніку такога падзелу на адным полюсе крыніцы току назапашваюцца дадатныя зарады, а на другім — адмоўныя, што прыводзіць да ўзнікнення электрычнага поля. Гэтае поле, дзейнічаючы сілай на свабодныя электроны, прымушае іх рухацца ў электрычным ланцугу па-за крыніцай току. Такім чынам, дзеянне электрычнай сілы прыводзіць да злучэння рознаіменных



Мал. 130

а



б



в



Мал. 131

зарадаў і памяншэння рознасці патэнцыялаў, тады як дзеянне пабочнай сілы прыводзіць да раздзялення рознаіменных зарадаў і падтрымання рознасці патэнцыялаў на полюсах крыніцы току.

У хімічных крыніцах току (гальванічных элементах, акумулятарах) (мал. 131, а) раздзяленне зарадаў адбываецца падчас хімічных рэакцый, у электрамеханічных індукцыйных генератарах (мал. 131, б) — пры выкананні механічнай работы, у сонечных батарэях (мал. 131, в) — пад уздзеяннем энергіі сонечнага выпраменьвання і г. д.

Участак ланцуга, дзе зарады рухаюцца пад дзеяннем толькі электрычнай сілы, называюць *знешнім* (розныя спажывыцы электрычнага току, злучальныя правады, вымяральныя прыборы). Участак ланцуга, дзе зарады рухаюцца пад дзеяннем пабочнай і электрычнай сіл, называюць *унутраным* (крыніца току).

Электрарухаючая сіла крыніцы току. Асноўнай характарыстыкай крыніцы току з'яўляецца *электрарухаючая сіла* (ЭРС)*. Абазначаюць яе \mathcal{E} .

ЭРС — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам работы пабочнай сілы па перамяшчэнні дадатнага электрычнага зараду ўнутры крыніцы току ад яго адмоўнага полюса да дадатнага да значэння гэтага зараду:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{паб}}}{q}. \quad (25.1)$$

Параўнаўшы формулы $U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}$ і (25.1), можна зрабіць выснову, што адзінкай вымярэння ЭРС у СІ з'яўляецца вольт (В).

Такім чынам, ЭРС лікава роўная рабоце пабочнай сілы па перамяшчэнні адзінкавага зараду ўнутры крыніцы току паміж яго полюсамі (дадатнага зараду ад адмоўнага полюса да дадатнага, адмоўнага зараду, наадварот, ад дадатнага полюса да адмоўнага).



* Тэрмін «электрарухаючая сіла» не зусім удалы, бо ў дадзеным выпадку гаворка не ідзе ні пра якую сілу, вымераную ў ньютанах. Таму надалей мы будзем выкарыстоўваць толькі скарачаную назву ЭРС.

Ад тэорыі да практыкі

Сіла току ў ланцугу $I = 1,5$ А. Якую работу выконвае пабочная сіла за прамяжак часу $t = 1,0$ мін, калі ЭРС крыніцы току $\mathcal{E} = 6,0$ В?



Для існавання пастаяннага электрычнага току ў правадніку патрэбна, каб:

- праваднік з'яўляўся часткай замкнутага ланцуга;
- ланцуг змяшчаў крыніцу току, якая стварае і падтрымлівае ў правадніку электрычнае поле на працягу доўгага прамежку часу

Унутры крыніцы току перанос носьбітаў зараду супраць сілы электрычнага поля ажыццяўляе сіла неэлектростатычнага паходжання, якую называюць пабочнай сілай

Участак ланцуга, дзе носьбіты зараду рухаюцца пад дзеяннем толькі электрычнай сілы, называюць знешнім

Участак ланцуга, дзе носьбіты зараду рухаюцца пад дзеяннем пабочнай і электрычнай сіл, называюць унутраным

ЭРС — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам работы пабочнай сілы па перамяшчэнні дадатнага электрычнага зараду ўнутры крыніцы току ад яго адмоўнага полюса да дадатнага да значэння гэтага зараду:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{паб}}}{q}$$



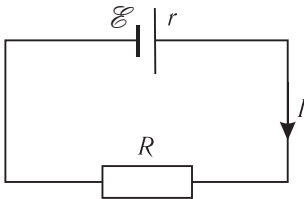
1. Якія ўмовы існавання электрычнага току?
2. Якія сілы называюць пабочнымі?
3. Якая роля крыніцы току ў электрычным ланцугу?
4. Што называюць знешнім участкам электрычнага ланцуга? унутраным?
5. Які напрамак упарадкаванага руху свабодных электронаў на знешнім і ўнутраным участках ланцуга?
6. Што называюць ЭРС крыніцы току?



§ 26. Закон Ома для поўнага електричнага ланцуга. ККД крыніцы току

У 1826 г. нямецкі фізік Георг Сымон Ом (1787–1854) доследным шляхам вызначыў, што пры пастаяннай тэмпературы адносіны напружання паміж канцамі металічнага правадніка да сілы току ў ім з'яўляюцца велічыняй пастаяннай. На падставе гэтага быў сфармуляваны закон, названы законам Ома для ўчастка електричнага ланцуга:

$I = \frac{U}{R}$, дзе R — супраціўленне ўчастку ланцуга. Ад чаго і як залежыць сіла току ў замкнутым ланцугу, які змяшчае крыніцу току, гэта значыць у поўным електричным ланцугу?



Мал. 132

Закон Ома для поўнага електричнага ланцуга. Разгледзім електричны ланцуг, які складаецца з крыніцы току (гальванічнага элемента, акумулятара або генератара) і рэзістара з супраціўленнем R . Вядомыя ЭРС \mathcal{E} крыніцы току і яго супраціўленне r , якое называюць унутраным. Схема ланцуга прыведзена на малюнку 132. Няхай сіла току ў ланцугу I , а напружанне паміж канцамі правадніка U .

Закон Ома для поўнага ланцуга звязвае сілу току I ў ланцугу, ЭРС \mathcal{E} крыніцы току і поўнае супраціўленне ланцуга $R + r$, якое складаецца з супраціўлення знешняга (рэзістар) і ўнутранага (крыніца току) участкаў ланцуга (супраціўленне злучальных правадоў не прымаем пад увагу). Гэтую сувязь можна ўстанавіць тэарэтычна на падставе закона захавання энергіі.

Калі праз папярочнае сячэнне правадніка за прамежак часу t праходзіць зарад q , то работу пабочнай сілы па перамяшчэнні електричнага зараду можна вызначыць па формуле

$$A_{\text{паб}} = \mathcal{E}q.$$

Паколькі сіла току $I = \frac{q}{t}$, то

$$A_{\text{паб}} = \mathcal{E}It. \quad (26.1)$$

У нерухомах правадніках нязменнага хімічнага саставу ў выніку работы пабочных сіл адбываецца павелічэнне толькі ўнутранай энергіі знешняга і ўнутранага ўчастку ланцуга. Такім чынам, пры праходжанні электрычнага току ў рэзістары і крыніцы току выдзяляецца колькасць цеплаты Q , якую можна вызначыць паводле закона Джоўля — Ленца:

$$Q = I^2 R t + I^2 r t. \quad (26.2)$$

На падставе закона захавання энергіі:

$$A_{\text{паб}} = Q. \quad (26.3)$$

Падставім формулы (26.1) і (26.2) у роўнасць (26.3) і ў выніку матэматычных пераўтварэнняў атрымаем:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (26.4)$$

Здабытак сілы току і супраціўлення ўчастка ланцуга часта называюць падзеннем напружання на гэтым участку. Таму $IR = U$ — падзенне напружання (напружанне) на знешнім участку ланцуга, Ir — падзенне напружання на ўнутраным участку ланцуга.

Выразіўшы сілу току з формулы (26.4), атрымаем:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (26.5)$$

Формула (26.5) з'яўляецца матэматычным выразам **закона Ома для поўнага электрычнага ланцуга**, згодна з якім **сіла току ў поўным электрычным ланцугу прама прапарцыяльная ЭРС крыніцы току і адваротна прапарцыяльная поўнаму супраціўленню ланцуга**.

Ад тэорыі да практыкі

Акумулятар, унутранае супраціўленне якога $r = 0,80$ Ом, далучаны да рэзістара. Чаму роўная ЭРС акумулятара, калі напружанне на яго полюсах $U = 6,0$ В, а сіла току ў ланцугу $I = 0,50$ А?

Розныя рэжымы работы электрычнага ланцуга. Пераўтворым формулу (26.4):

$$IR = \mathcal{E} - Ir,$$

паколькі $IR = U$, то

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (26.6)$$

З выразу (26.6) вынікае, што пры разамкнутым ланцугу ($I = 0$) напружанне паміж полюсамі крыніцы току роўнае яго ЭРС: $U = \mathcal{E}$. Значыць, вымераць ЭРС крыніцы току можна, падключыўшы да яе полюсаў вальтметр з бясконца вялікім уласным супраціўленнем (каб не парушаць рэжым разамкнутага ланцуга).

У выпадку, калі супраціўленне знешняга ўчастка ланцуга імкнецца да нуля ($R \rightarrow 0$), сіла току ўзрастае і дасягае максімальнага значэння. Падзенне напружання на крыніцы току пры гэтым роўнае ЭРС, а напружанне паміж яго полюсамі — нулю.

Такі рэжым работы крыніцы току называюць кароткім замыканнем, а максімальна магчымую для дадзенай крыніцы сілу току называюць сілай току кароткага замыкання:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

дзе r — унутранае супраціўленне крыніцы току.

Для крыніц току з нязначным унутраным супраціўленнем (напрыклад, у аўтамабільных акумулятараў $r \approx 0,01$ Ом) рэжым кароткага замыкання надзвычай небяспечны, бо можа прывесці да пашкоджання крыніцы току і нават з'явіцца прычынай пажару.

Ад тэорыі да практыкі

Сіла току пры кароткім замыканні батарэйкі $I_{\text{к.з}} = 2$ А. Калі да батарэйкі падключылі рэзістар з супраціўленнем $R = 3$ Ом, сіла току стала $I = 1$ А. Як змянілася роўнае супраціўленне ланцуга? Чаму роўнае ўнутранае супраціўленне батарэйкі?

Кэфіцыент карыснага дзеяння крыніцы току. Пры перамяшчэнні зараду q на знешнім участку ланцуга, напружанне на якім U , за прамежак часу t сіла электрычнага поля выконвае работу:

$$A = Uq.$$

Выкарыстаўшы выраз $I = \frac{q}{t}$, атрымаем формулу для разліку работы электрычнага току, выкананай на знешнім участку ланцуга:

$$A = IUt.$$



Калі знешнім участкам ланцуга з'яўляецца награвальны элемент (або рэзістар), то з улікам закона Джоўля — Ленца формула для разліку карыснай работы электрычнага току на знешнім участку ланцуга:

$$A_{\text{карысн}} = I^2 R t.$$

Улічваючы, што магутнасць $P = \frac{A}{t}$, атрымаем выраз для вызначэння карыснай магутнасці току на цеплавым спажывы, які з'яўляецца знешнім участкам ланцуга:

$$P_{\text{карысн}} = I^2 R = IU.$$

Паколькі работа пабочных сіл крыніцы току:

$$A_{\text{паб}} = A_{\text{карысн}} = I \mathcal{E} t,$$

то магутнасць, якая развіваецца пабочнымі сіламі крыніцы току пры наяўнасці ў ланцугу толькі награвальнага элемента:

$$P_{\text{паб}} = P_{\text{поўн}} = I \mathcal{E} = IU + I^2 r.$$

Такім чынам, $P_{\text{поўн}} = P_{\text{карысн}} + I^2 r$.

Каэфіцыент карыснага дзеяння (ККД) крыніцы току — адносіны карыснай магутнасці току на знешнім участку ланцуга да поўнай магутнасці, якая развіваецца пабочнымі сіламі крыніцы току:

$$\eta = \frac{P_{\text{карысн}}}{P_{\text{поўн}}} \cdot 100 \ %.$$



Калі знешні ўчастак ланцуга — награвальны элемент, то

$$P_{\text{карысн}} = I^2 R,$$

$$P_{\text{поўн}} = I^2 (R + r).$$

Тады ККД крыніцы току

$$\eta = \frac{R}{R + r} \cdot 100 \ %.$$



Закон Ома для поўнага электрычнага ланцуга: сіла току ў поўным ланцугу прама прапарцыянальная ЭРС крыніцы току і адваротна прапарцыянальная поўнаму супраціўленню ланцуга: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$

*Ланцуг
разамкнуты*
($R \rightarrow \infty; I = 0$)
 $U = \mathcal{E}$

Напружанне паміж полюсамі крыніцы току роўнае яго ЭРС

*Ланцуг
замкнуты*
 $U + Ir = \mathcal{E}$

Сума напружання на знешнім участку ланцуга і падзення напружання (Ir) на ўнутраным участку ланцуга роўная ЭРС крыніцы току

*Рэжым кароткага
замыкання*

(супраціўленне знешняга ўчастка ланцуга імкнецца да нуля $R \rightarrow 0$, а сіла току дасягае максімальнага для дадзенай крыніцы току значэння)

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Кэфіцыент карыснага дзеяння (ККД) крыніцы току — адносіны карыснай магутнасці току на знешнім участку ланцуга да поўнай магутнасці, якая развіваецца пабочнымі сіламі крыніцы току:

$$\eta = \frac{P_{\text{карысн}}}{P_{\text{поўн}}} \cdot 100 \%$$



1. Сфармулюйце закон Ома для поўнага ланцуга.
2. Як можна вымераць ЭРС крыніцы току?
3. Які рэжым работы электрычнага ланцуга адпавядае кароткаму замыканню?
4. Што разумеюць пад сілай току кароткага замыкання?
5. Што разумеюць пад карыснай работай электрычнага току? поўнай работай крыніцы току?
6. Як вызначаюць карысную магутнасць электрычнага току? пад поўную магутнасць крыніцы току?
7. Што называюць кэфіцыентам карыснага дзеяння (ККД) крыніцы току?

Прыклад рашэння задачы

Рэзістар з супраціўленнем $R = 3,0$ Ом падключаны да крыніцы току з ЭРС $\mathcal{E} = 8,0$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 1,0$ Ом. Вызначце карысную магутнасць току і ККД крыніцы току ў дадзеным ланцугу.

Дадзена:
 $R = 3,0$ Ом
 $\mathcal{E} = 8,0$ В
 $r = 1,0$ Ом

$P_{\text{карысн}}$ — ?
 η — ?

Рашэнне. Карыснай з'яўляецца магутнасць току на знешнім участку ланцуга, гэта значыць на рэзістары:
 $P_{\text{карысн}} = I^2 R$. З улікам закона Ома для поўнага ланцуга

$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ атрымаем:

$$P_{\text{карысн}} = \mathcal{E}^2 \frac{R}{(R+r)^2}.$$

$$P_{\text{карысн}} = \frac{64 \text{ В}^2 \cdot 3,0 \text{ Ом}}{(3,0 \text{ Ом} + 1,0 \text{ Ом})^2} = 12 \text{ Вт}.$$

ККД крыніцы току ў дадзеным ланцугу вызначым па формуле

$$\eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100 \ %.$$

$$\eta = \frac{3,0 \text{ Ом}}{3,0 \text{ Ом} + 1,0 \text{ Ом}} \cdot 100 \ \% = 75 \ %.$$

Адказ: $P_{\text{карысн}} = 12$ Вт, $\eta = 75 \ %$.

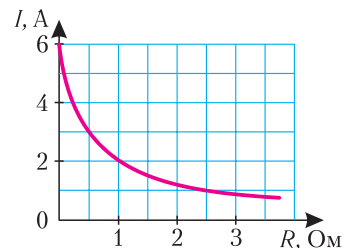
**Практыкаванне 19**

1. Рэзістар з супраціўленнем $R = 2$ Ом падключаны да крыніцы току з ЭРС $\mathcal{E} = 5$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 0,5$ Ом. Вызначце сілу току ў ланцугу і падзенне напружання на знешнім і ўнутраным участках электрычнага ланцуга.

2. Рэаэстат падключаны да крыніцы току з ЭРС $\mathcal{E} = 4$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 1$ Ом. Пабудуйце графік залежнасці сілы току ад супраціўлення той часткі рэаэстата, па якой праходзіць ток, $I = I(R)$.

3. Пры падключэнні да крыніцы току з ЭРС $\mathcal{E} = 2,2$ В рэзістара з супраціўленнем $R = 4,0$ Ом сіла току ў ланцугу $I = 0,50$ А. Вызначце сілу току пры кароткім замыканні крыніцы току.

4. На малюнку 133 прыведзены графік залежнасці сілы току ў рэаэстате ад яго супраціўлення. Вызначце сілу току пры кароткім замыканні крыніцы току і яе ўнутранае супраціўленне.

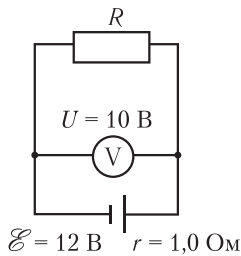


Мал. 133

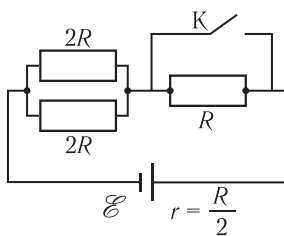
5. Вызначце поўную магутнасць, якую развівае крыніца току з унутраным супраціўленнем $r = 0,50$ Ом, пры падключэнні да яе рэзістара з супраціўленнем $R = 2,0$ Ом, калі напружанне на рэзістары $U = 4,0$ В.

6. Спіраль нагрэвальнага элемента, супраціўленне якой $R = 38$ Ом, падключана да крыніцы току з ЭРС $\mathcal{E} = 12$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 2,0$ Ом. Вызначце колькасць цеплаты, якая выдзеліцца ў спіралі за прамежак часу $t = 10$ мін.

7. Два паралельна злучаныя рэзістары, супраціўленні якіх $R_1 = 4,0$ Ом і $R_2 = 6,0$ Ом, падключылі да крыніцы току з ЭРС $\mathcal{E} = 12$ В і ўнутраным супраціўленнем $r = 0,60$ Ом. Вызначце напружанне на рэзістарах і сілу току ў кожным з іх.



Мал. 134



Мал. 135

8. На малюнку 134 паказана схема электрычнага ланцуга, якая складаецца з крыніцы току, рэзістара і ідэальнага вальтметра. Вызначце работу электрычнага току на знешнім участку ланцуга за прамежак часу $t = 10$ мін і ККД крыніцы току.

9. На малюнку 135 паказана схема электрычнага ланцуга, які складаецца з крыніцы току, ключа і трох рэзістараў. Выберыце з прапанаванага пераліку тры верныя сцвярджэнні. Пазначце ў сшытку іх нумары.

1) Карысную магутнасць току на знешнім участку ланцуга пры разамкнутым ключы можна вызначыць па формуле $P_{\text{карысн}} = \frac{8\mathcal{E}^2}{25R}$.

2) Магутнасць, якая развіваецца пабочнымі сіламі крыніцы току пры замкнутым ключы, можна вызначыць па формуле $P_{\text{паб}} = \frac{\mathcal{E}^2}{3R}$.

3) Карысную работу току на знешнім участку ланцуга пры замкнутым ключы можна вызначыць па формуле $A_{\text{карысн}} = \frac{4\mathcal{E}^2}{9R}t$.

4) Работу пабочных сіл крыніцы току пры разамкнутым ключы можна вызначыць па формуле $A_{\text{паб}} = \frac{2\mathcal{E}^2}{3R}t$.

5) ККД крыніцы току пры разамкнутым ключы $\eta = 80$ %.



РАЗДЗЕЛ 5

МАГНІТНАЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЯ ІНДУКЦЫЯ

Як вы ўжо ведаеце, паміж зараджанымі цэламі (часціцамі), акрамя гравітацыйнага, існуе і электрамагнітнае ўзаемадзеянне. Калі зарады знаходзяцца ў спакоі адносна пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку, электрамагнітнае ўзаемадзеянне паміж імі называюць *электростатычным*. Пры руху электрычна зараджаных цел (часціц) праяўляецца складнік электрамагнітнага ўзаемадзеяння — *магнітнае ўзаемадзеянне*.

У гэтым раздзеле вы пазнаёміцеся са з’явамі, у якіх важную ролю адыгрывае магнітнае ўзаемадзеянне, абумоўленае існаваннем магнітнага поля, створанага пастаяннымі магнітамі, электрычным токам або зменлівым у часе электрычным полем.

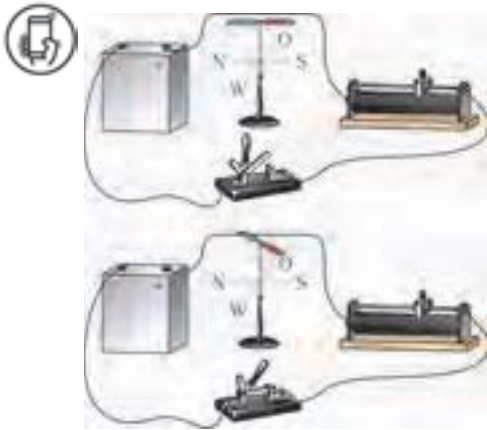
§ 27. Дзеянне магнітнага поля на праваднік з токам. Узаемадзеянне праваднікоў з токам

З’явы ўзаемадзеяння аднайменных і рознайменных электрычных зарадаў нагадваюць з’явы адштурхвання аднайменных полюсаў і прыцяжэння рознайменных полюсаў магнітаў (мал. 136). Электрычныя ўзаемадзеянні ажыццяўляюцца дзякуючы электрычным палям, а чым абумоўлены магнітныя ўзаемадзеянні і чым вызначаюцца магнітныя ўласцівасці цел?

Магнітнае поле. Тое, што магніты ўзаемадзейнічаюць адзін з адным, што распілены па паалам магніт ператвараецца ў два магніты, а жалеза пры судакрананні з магнітам намагнічваецца, было выяўлена дастаткова даўно. Значна пазней знайшлі сувязь паміж электрычнымі і магнітнымі з’явамі, хоць намагнічанасць жалезных прадметаў, перамагнічванне стрэлкі компаса падчас навальнічных электрычных



Мал. 136



Мал. 137



Мал. 138

зрадаў і многія іншыя назіранні і доследы прымусалі вучоных задумацца над гэтым. Першымі гэтую сувязь даследавалі ў 1820 г. дацкі фізік Ханс Крысціян Эрстэд (1777–1851) і ўжо вядомы вам французскі фізік і матэматык Андрэ Мары Ампер.

Эрстэд заўважыў, што магнітная стрэлка, размешчаная паблізу правадніка, паварочвалася на некаторы вугал падчас праходжання па правадніку электрычнага току (мал. 137). Адкрыццё Эрстэда дазволіла Амперу зрабіць выснову, што магнітныя ўласцівасці любога цела вызначаюцца замкнутымі электрычнымі токамі, якія цыркулююць унутры гэтага цела; яны атрымалі назву «амперавы токі» або «малекулярныя токі» (мал. 138). Гэта азначала, што магнітнае ўзаемадзеянне абумоўлена не асаблівымі магнітнымі зарадамі, а рухам электрычных зарадаў — электрычным токам.

Узаемадзеянне правадніка з токам і магнітнай стрэлкі ў доследзе Эрстэда з'яўляецца ўзаемадзеяннем электрычнага току

правадніка з «амперавымі токамі» ў магнітнай стрэлцы (гіпотэза Ампера). Гэтае ўзаемадзеянне ажыццяўляецца дзякуючы *магнітнаму полю*.

Магнітнае поле — форма матэрыі, створаная электрычнымі зарадамі, якія рухаюцца адносна пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку, або пераменнымі электрычнымі палямі.



Доследы сведчаць, што магнітнае поле ўзнікае пры руху любых электрычных зарадаў.

У магнітным полі ажыццяўляецца ўзаемадзеянне паміж электрычнымі зарадамі, якія рухаюцца (а таксама магнітамі). Прычым кожны электрычны зарад, які рухаецца ў дадзенай інерцыяльнай сістэме адліку, стварае ў навакольнай прасторы магнітнае поле. Гэтае поле дзейнічае пэўнымі сіламі на любыя іншыя рухомыя электрычныя зарады, а таксама на магніты, якія ў ім знаходзяцца.

Такім чынам, пра існаванне магнітнага поля можна меркаваць па наяўнасці сілы, што дзейнічае на электрычны зарад, які рухаецца адносна абранай інерцыяльнай сістэмы адліку, або на магніт, які знаходзіцца ў гэтым полі.

Ад тэорыі да практыкі

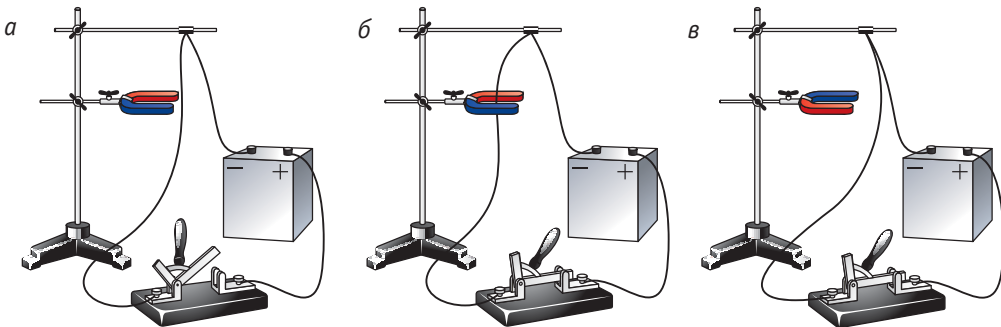
Магнітная стрэлка, размешчаная пад медным правадніком, паварочваецца на некаторы вугал падчас праходжанні па ім электрычнага току. Ці будзе стрэлка паварочвацца, калі медны праваднік замяніць водным растворам шчолачы, змешчаным у тонкую шкляную трубку?

Цікава ведаць

Сучасныя навуковыя ўяўленні не адваргаюць, а, наадварот, прадказваюць часціцы з магнітным зарадам — магнітныя манапалі. Аднак такія часціцы пакуль эксперыментальна не назіралі.

Дзеянне магнітнага поля на праваднік з токам. Паколькі магнітнае поле правадніка з токам дзейнічае пэўнай сілай на магніт (у доследзе Эрстэда — на магнітную стрэлку), то натуральна дапусціць, што з боку магнітнага поля магніта на праваднік з токам павінна дзейнічаць сіла. Гэтае дапушчэнне можна правесці эксперыментальна.

Збяром электрычны ланцуг, паказаны на малюнку 139, *а*. Пры разамкнутым ланцугу дзеянне з боку магнітнага поля дугападобнага магніта на гнуткі праваднік не назіраецца. Пры замыканні ланцуга праваднік пыходзіць у рух: ён або ўцягваецца ў прастору паміж полюсамі дугападобнага магніта (мал. 139, *б*), або выштурхваецца з яе (мал. 139, *в*) пры адваротным размяшчэнні полюсаў магніта (або пры змене напрамку току). Гэты дослед яшчэ раз даказвае, што магнітнае поле дзейнічае толькі на зарады, якія рухаюцца.



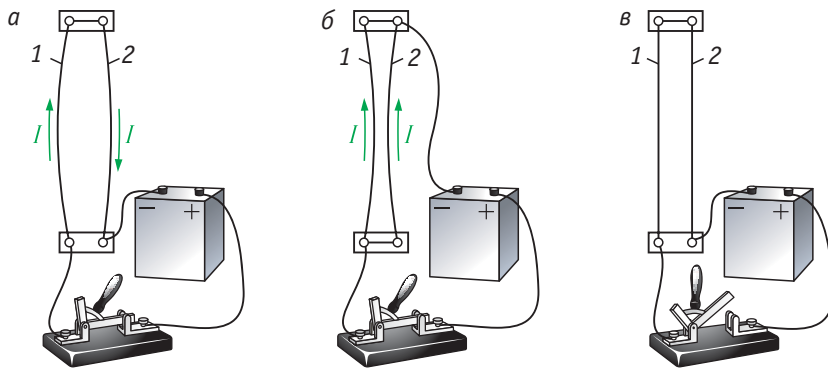
Мал. 139



Ва ўсіх разгледжаных выпадках на праваднікі з токам (зараджаныя часціцы, што рухаюцца) дзейнічалі *магнітныя сілы*, якія можна разглядаць як вынік узаемадзеяння магнітнага поля пастаяннага магніта з магнітнымі палямі праваднікоў з токам (зараджаных часціц, што рухаюцца).

Магнітныя сілы — сілы, што дзейнічаюць з боку магнітнага поля на змешчаныя ў ім магніты, праваднікі з токам або зарады, якія рухаюцца.

Узаемадзеянне праваднікоў з токам. Адкрыццё Эрстэда дало штуршок даследаванням па выяўленні сувязі паміж электрычнымі і магнітнымі з'явамі. Ампер у 1820 г. правёў шэраг эксперыментаў па вывучэнні ўзаемадзеяння двух гнуткіх першапачаткова прамалінейных і паралельных праваднікоў з токам. Ён выявіў, што калі ток у правадніках праходзіць у супрацьлеглых напрамках, яны адштурхваюцца (мал. 140, а), а калі ў аднолькавых напрамках — прыцягваюцца (мал. 140, б). Пры адсутнасці току ў правадніках яны не праяўляюць магнітнага ўзаемадзеяння (мал. 140, в).



Мал. 140

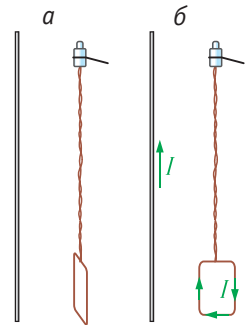
Узаемадзеянне магнітнага поля аднаго правадніка з токам другога правадніка абумоўлена магнітнай сілай.

Магнітнае ўзаемадзеянне двух паралельных праваднікоў з токам выкарыстоўваюць у СІ для азначэння адзінкі сілы току — ампера.

1 ампер — гэта сіла нязменнага току, які пры праходжанні па кожным з двух паралельных прамалінейных праваднікоў бясконцай даўжыні і мізэрна малага кругавога сячэння, размешчаных на адлегласці 1 м адзін ад аднаго ў вакууме, выклікаў бы паміж гэтымі праваднікамі сілу магнітнага ўзаемадзеяння, модуль якой роўны $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожны метр даўжыні.

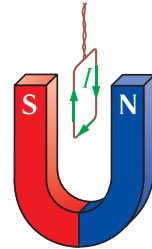


Дзеянне магнітнага поля на рамку з токам. Дзеянне магнітнага поля на праваднік з токам праяўляецца не толькі ў прыцяжэнні або адштурхванні. Правядзём дослед. Каля доўгага тонкага вертыкальна размешчанага правадніка падвесім на тонкіх і гнуткіх падводзячых правадах маленькую (у параўнанні з адлегласцю, на якой магнітнае поле прыкметна змяняецца, гэта значыць далей ад правадніка) драцяную рамку (мал. 141, а). Пры прапусканні па правадніку і рамцы электрычнага току рамка павернецца і размесціцца так, што апынецца ў адной плоскасці з правадніком з токам (мал. 141, б). Такім чынам, магнітнае поле аказвае на рамку з токам *арыентуючае дзеянне*, аналагічнае дзеянню на стрэлку компаса.



Мал. 141

Правядзём яшчэ адзін дослед. Змесцім драцяную рамку паміж полюсамі пастаяннага дугападобнага магніта. Калі па рамцы праходзіць ток, яна размяшчаецца так, што яе плоскасць знаходзіцца перпендыкулярна прамой, якая злучае полюсы магніта (мал. 142). У дадзеным выпадку магнітнае поле дугападобнага магніта таксама аказвае на рамку з токам *арыентуючае дзеянне*.



Мал. 142



Магнітнае поле — форма матэрыі, створаная электрычнымі зарадамі, якія рухаюцца адносна пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку, або пераменнымі электрычнымі палямі

Кожны электрычны зарад пры сваім руху стварае ў навакольнай прасторы магнітнае поле, якое дзейнічае пэўнымі сіламі на любыя іншыя рухомыя электрычныя зарады

Магнітныя сілы — сілы, што дзейнічаюць з боку магнітнага поля на змешчаныя ў ім магніты, праваднікі з токам або зарады, якія рухаюцца

Магнітнае поле аказвае арыентуючае дзеянне на рамку з токам і на магнітную стрэлку



1. Якія палі існуюць у прасторы вакол электрычнага зараду, што рухаецца?
2. Што ўяўляе з сябе магнітнае поле? Як яго можна выявіць?
3. Які дослед даказвае, што магнітнае поле дзейнічае толькі на зарады, якія рухаюцца?
4. Што называюць магнітнай сілай?
5. Якую з'яву выкарыстоўваюць для вызначэння адзінкі сілы току ў СІ?
6. У чым праяўляецца дзеянне магнітнага поля на рамку з токам?
7. У кнізе французскага прыродазнаўца Араго «Гром і маланка» прыведзены прыклады перамагнічвання стрэлкі компаса і намагнічвання сталёвых прадметаў дзеяннем маланкі. Як можна растлумачыць гэтыя з'явы?

§ 28. Індукцыя магнітнага поля. Лініі індукцыі магнітнага поля

Для апісання электростатычнага поля выкарыстоўваюць яго асноўную характарыстыку — напружанасць \vec{E} . Ці існуе аналагічная характарыстыка для апісання магнітнага поля?

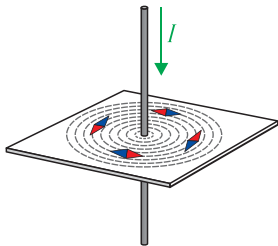


Мал. 143

Напрамак індукцыі магнітнага поля. Асноўнай характарыстыкай, якая выкарыстоўваецца для апісання магнітнага поля, з'яўляецца фізічная вектарная велічыня — індукцыя магнітнага поля \vec{B} . Ведаючы індукцыю магнітнага поля, можна вызначыць сілу, якая дзейнічае на прадмет з токам (зарад, што рухаецца) у магнітным полі.

Для вызначэння напрамку індукцыі магнітнага поля \vec{B} выкарыстоўваюць арыентуючае дзеянне магнітнага поля на магнітную стрэлку або рамку з токам.

За напрамак індукцыі магнітнага поля ў пэўным пункце поля прымаюць напрамак ад паўднёвага полюса S да паўночнага полюса N магнітнай стрэлкі, якая свабодна ўстанавіваецца пры размяшчэнні ў дадзеным пункце (мал. 143).

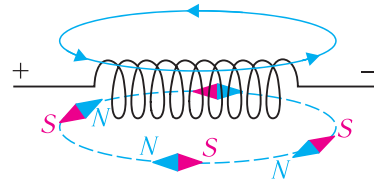


Мал. 144

У магнітным полі прамалінейнага прадметнага з токам магнітнага стрэлкі размяшчаюцца па датычных да акружнасцей (мал. 144), цэнтры якіх ляжаць на восі прадметнага.



На практиці часто доводиться мати справу з магнітними полями електричних токів, які проходять по шпудлях (соліноїдах). У магнітному полі шпудлі з током магнітні стрілки розмишаються по дотичних до замкнутих кривих, які охоплюють витки шпудлі (мал. 145).



Мал. 145

Лінії індукції магнітного поля. Розмеркування електростатичного поля у просторі можна зробити «бачним», використовуючи уявлення про лінії напруженості. Досліджуючи магнітне поле, яке створюється провідником з током або постійним магнітом, з допомогою магнітної стрілки у кожному пункті простору можна визначити напрям індукції магнітного поля. Таке дослідження дозволяє графічно адлюструвати магнітне поле у вигляді *ліній магнітної індукції*.

Лінії індукції магнітного поля — уявні лінії у просторі, дотичні до яких у кожному пункті супадають з напрямком індукції магнітного поля (мал. 146).

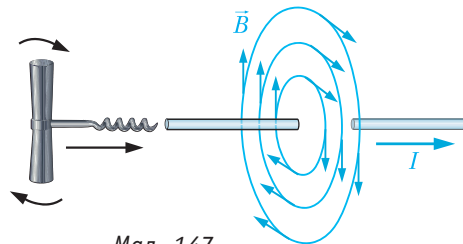


Мал. 146

Лінії індукції магнітного поля безперервні (не мають ні початку, ні кінця), замикаються самі на собі. Це характерно для будь-яких магнітних полів. Полі, які володають такою властивістю, називають *вихровими*.

Відомо, що в будь-якому пункті у магнітному полі можна провести тільки одну лінію індукції. Паколькі індукція магнітного поля у будь-якому пункті простору має певний напрям, то і напрям лінії індукції у кожному пункті цього поля може бути тільки один. Це означає, що лінії магнітної індукції, як і лінії напруженості електричного поля, не перетинаються.

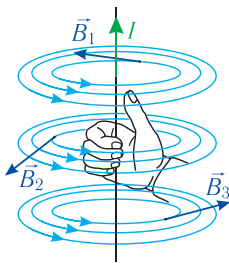
Напрямок ліній індукції магнітного поля. Визначити напрям ліній індукції магнітного поля можна, використовуючи **правило свярдзёлка**: калі поступальний рух свярдзёлка супадає з напрямом току, то ручка свярдзёлка паверочвається у напрямку ліній індукції магнітного поля. У випадку прамалінейного провідника з током лінії індукції магнітного поля уявляються з себе канцентрічними акружностями, які знаходяться у площинах, перпендикулярних до провідника (мал. 147).



Мал. 147

Визначить напрямки ліній індукції магнітного поля прамалінейного провідника з током можна таксама з допомогою *правил правої руки*: калі уяїна абхаїць провідник правої рукої так, каб вялікі палець паказваў напрамак току, то астатнія пальцы будуць сагнутыя ў напрамку ліній індукції магнітного поля (мал. 148).

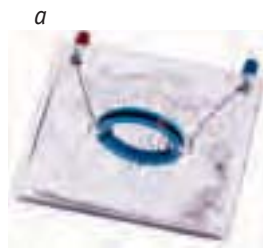
Карціну ліній індукції магнітного поля можна атрымаць, выкарыстоўваючы дробныя жалезныя апілки, якія ў магнітным полі паводзяць сябе як магнітныя стрэлкі. На малюнку 149 паказана карціна магнітного поля прамалінейнага ўчастка провідніка з токам. Карціна магнітного поля кругавога вітка з токам і графічная выява ліній індукції адлюстраваны на малюнку 150, а, б.



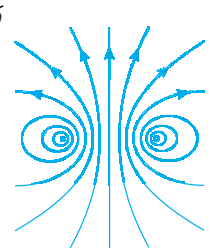
Мал. 148



Мал. 149



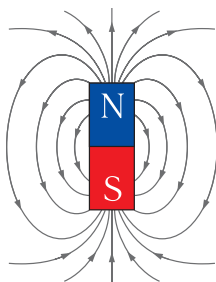
Мал. 150



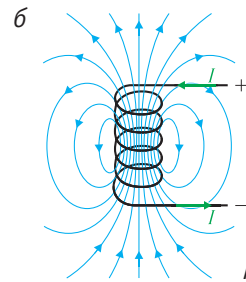
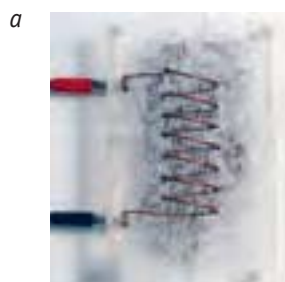
Мяркуюць, што лініі індукції магнітнага поля, створанага пастаянным магнітам, накіраваны ўнутры магніта ад яго паўднёвага полюса S да паўночнага N (мал. 151).

Магнітнае поле саленоіда падобнае на поле паласавога магніта. На малюнку 152, а, б паказана карціна магнітнага поля саленоіда з токам і дадзена графічная выява ліній індукції. Саленоід уяўляе з сябе цыліндрычную шпулю, на якую віток да вітка намотаны провад, ізаляваны тонкім слоём лаку. Калі даўжыня саленоіда значна большая за яго дыяметр, то ўнутры цэнтральнай часткі саленоіда лініі індукції магнітнага поля практычна паралельныя і накіраваны ўздоўж яго восі.

Аднароднае магнітнае поле — поле, індукцыя якога ва ўсіх пунктах прасторы аднолькавая.



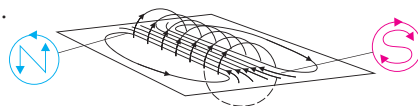
Мал. 151



Мал. 152

Лініі індукцыі такога поля паралельныя. У адваротным выпадку поле называюць неаднародным. Магнітнае поле ўнутры доўгага саленоіда практычна аднароднае, а паблізу краёў — неаднароднае. Неаднароднае і магнітнае поле прамалінейнага правадніка з токам (гл. мал. 148).

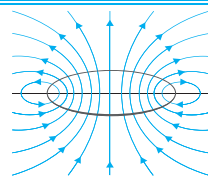
Для нагляднасці на малюнках лініі індукцыі паказваюць гусцей у тых месцах магнітнага поля, дзе значэнне індукцыі магнітнага поля большае (мал. 152, б). Пры гэтым на лініі індукцыі пазначаюць стрэлкай напрамак індукцыі магнітнага поля. Для крайніх віткаў саленоіда *магнітнае поле кругавога вітка з токам, які праходзіць у напрамку руху гадзіннікавай стрэлкі, эквівалентнае полю паўночнага полюса пастаяннага магніта, а магнітнае поле кругавога вітка з токам, які праходзіць супраць напрамку руху гадзіннікавай стрэлкі, эквівалентнае полю паўночнага полюса пастаяннага магніта* (правіла гадзіннікавай стрэлкі) (мал. 153).



Мал. 153

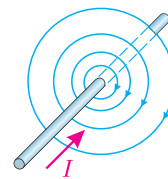
Ад тэорыі да практыкі

На малюнку 154 схематычна паказана магнітнае поле кругавога вітка з токам. Ці аднароднае такое магнітнае поле? Чаму?

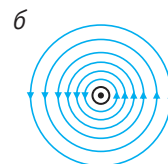
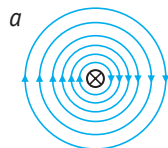


Мал. 154

Вызначэнне напрамку індукцыі магнітнага поля. Для вызначэння напрамку індукцыі магнітнага поля можна выкарыстаць любое з правілаў, сфармуляваных вышэй. Прычым, карыстаючыся правілам свярдзёлка, трэба памятаць, што напрамак току — гэта напрамак упарадкаванага руху дадатных зарадаў. Калі на малюнку прамалінейны праваднік з токам паказаны перпендыкулярна плоскасці старонкі (мал. 155) і пры гэтым ток накіраваны ад чытача, то яго ўмоўна пазначаюць крыжыкам (мал. 156, а); у выпадку, калі ток накіраваны да чытача, — кропкай (мал. 156, б). Такімі ж значкамі (кропкай або крыжыкам) пазначаюць напрамкі вектараў (індукцыі магнітнага поля, сілы і інш.), размешчаных перпендыкулярна плоскасці малюнка.



Мал. 155



Мал. 156

Полюсы саленоіда, а значыць, і напрамак індукцыі магнітнага поля можна вызначыць паводле правіла гадзіннікавай стрэлкі (гл. мал. 153) або правіла свярдзёлка: калі напрамак вярчэння ручкі свярдзёлка супадае з напрамкам току ў вітку,

то паступальны рух вастрэя свярдзёлка пакажа напрамак індукцыі магнітнага поля ўнутры саленоіда, а значыць, і становішча яго паўночнага полюса.



Лініі індукцыі магнітнага поля — уяўныя лініі ў прасторы, датычныя да якіх у кожным пункце супадаюць з напрамкам індукцыі магнітнага поля



Лініі індукцыі магнітнага поля

бесперапынныя
(не маюць
ні пачатку,
ні канца),
замыкаюцца
самі на сябе

не перасякаюцца,
бо ў любым
пункце прасторы
індукцыя магнітнага
поля мае пэўны
напрамак

напрамак індукцыі магнітнага
поля вызначаюць паводле:
— правіла свярдзёлка,
— правіла правай рукі,
— правіла гадзіннікавай стрэлкі

Магнітнае поле, індукцыя якога ва ўсіх пунктах прасторы аднолькавая, называюць аднародным магнітным полем



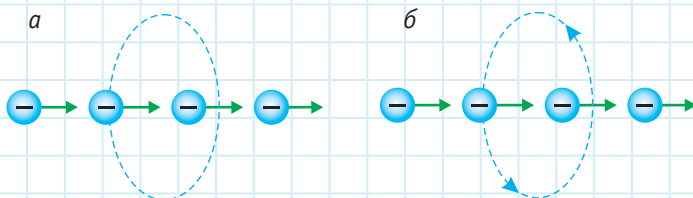
1. Якія правілы выкарыстоўваюць для вызначэння напрамку індукцыі магнітнага поля?
2. Як графічна адлюстроўваюць магнітнае поле? Што называюць лініямі індукцыі магнітнага поля?
3. Якая карціна ліній індукцыі магнітнага поля прамалінейнага правадніка з токам? кругавога вітка з токам? шпулі з токам? Як вызначаюць напрамак ліній індукцыі магнітнага поля?
4. Якія палі называюць віхравымі?
5. У чым адрозненне магнітнага поля ад электростатычнага?
6. Якое магнітнае поле называюць аднародным?

Прыклады рашэння задач

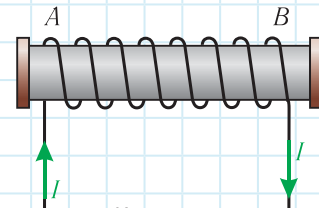
Прыклад 1. Электроны, якія ўтвараюць «электронны прамень», рухаюцца так, як паказана на малюнку 157, а. Вызначце напрамак ліній індукцыі магнітнага поля, створанага гэтымі электронамі.

Рашэнне. Вызначыць напрамак ліній індукцыі магнітнага поля, створанага электронамі, якія рухаюцца, можна як паводле правіла свярдзёлка, так і паводле правіла правай рукі. Аднак трэба памятаць, што гэтыя правілы сфармуляваны для дадатных зарадаў, якія рухаюцца. Таму ў дадзеным выпадку трэба

ўлічыць, што за напрамак электрычнага току прыняты напрамак, супрацьлеглы руху электронаў. Тады, калі глядзець на лінію індукцыі па напрамку руху электронаў, яна будзе зарыентавана супраць напрамку руху гадзіннікавай стрэлкі (мал. 157, б).



Мал. 157



Мал. 158

Прыклад 2. На малюнку 158 паказаны напрамак электрычнага току ў саленоідзе. Вызначце магнітныя полюсы саленоіда.

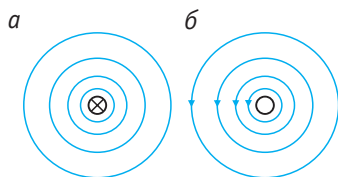
Рашэнне. Для вызначэння магнітных полюсаў саленоіда можна выкарыстаць як правіла свярдзёлка, так і правіла гадзіннікавай стрэлкі. У першым выпадку будзем уяўна паварочваць свярдзёлка па напрамку току ў вітках саленоіда. Вастрыё свярдзёлка пры гэтым перамяшчаецца ўздоўж восі саленоіда ад тарца *A* да тарца *B*. Паколькі лініі індукцыі ўнутры магніта накіраваны ад паўднёвага полюса да яго паўночнага полюса, то па аналогіі можна зрабіць выснову, што каля тарца *A* — паўднёвы полюс саленоіда, а каля тарца *B* — паўночны.

Праверым сваю выснову, прымяніўшы правіла гадзіннікавай стрэлкі. Калі глядзець з боку тарца *A* саленоіда, то відаць, што напрамак току ў вітку супадае з напрамкам руху гадзіннікавай стрэлкі. Значыць, каля тарца *A* — паўднёвы полюс, а каля тарца *B* — паўночны.

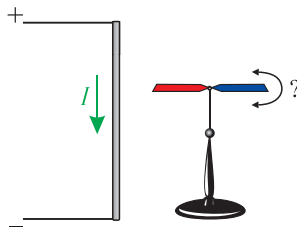
Практыкаванне 20

1. Як накіраваны лініі індукцыі магнітнага поля, створанага прамалінейным правадніком з токам, паказаныя на малюнку 159, *a*? У якім напрамку праходзіць электрычны ток у правадніку, адлюстраваным на малюнку 159, *б*?

2. Як будзе паводзіць сябе магнітная стрэлка, калі побач з ёй размясціць прамалінейны праваднік з электрычным токам (мал. 160)?



Мал. 159

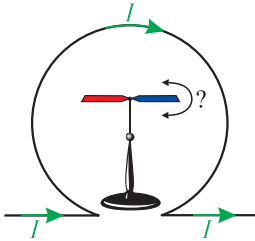


Мал. 160

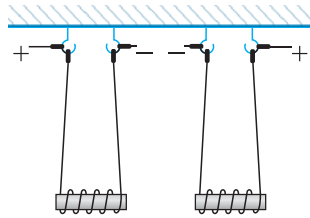
3. Па кругавым вітку праходзіць электрычны ток (мал. 161). Як установіцца магнітная стрэлка, калі яе змясціць у цэнтр вітка? Дзеянне магнітнага поля Зямлі не ўлічваць.

4. Як будуць узаемадзейнічаць дзве шпулі, падвешаныя на тонкіх правадах, калі іх падключыць да крыніцы току так, як паказана на малюнку 162?

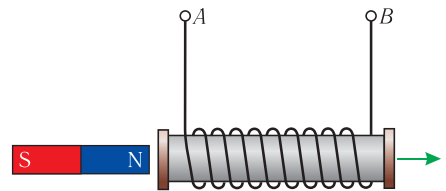
5. Пры падключэнні саленоіда да полюсаў крыніцы току ён адштурхваецца ад размешчанага паблізу пастаяннага магніта (мал. 163). У яким напрамку ідзе ток у саленоідзе?



Мал. 161



Мал. 162



Мал. 163

§ 29. Сіла Ампера.

Прынцып суперпазіцыі магнітных палёў

Для колькаснага апісання магнітнага поля неабходна ведаць не толькі напрамак індукцыі магнітнага поля, але і яе модуль. Характарыстыкі электростатычнага поля выяўляюць з дапамогай пробнага зараду. Для вызначэння характарыстык магнітнага поля выкарыстоўваюць «пробны» ток, які адпавядае малому ўчастку правадніка (з'яўляецца элементам току).

Модуль індукцыі магнітнага поля. Дзеянне магнітнага поля на размешчаны ў ім малы ўчастак правадніка з токам эксперыментальна даследаваў Ампер, ажыццявіўшы доследы з рознымі праваднікамі, якія ўваходзілі ў замкнутыя электрычныя ланцугі. У 1820 г. Ампер вызначыў, што модуль сілы, якой аднароднае магнітнае поле дзейнічае на прамалінейны ўчастак правадніка з токам, залежыць ад велічынь, якія характарызуюць гэты праваднік. Гэтымі велічынямі з'яўляюцца сіла току I , які праходзіць па правадніку, і даўжыня l прамалінейнага ўчастка правадніка. Акрамя таго, выявілася, што модуль магнітнай сілы залежыць ад вугла паміж напрамкамі току ў правадніку і індукцыі магнітнага поля \vec{B} . Прычым пры пэўных сіле току і даўжыні правадніка модуль магнітнай



сілы максімальны, калі праваднік размешчаны перпендыкулярна напрамку індукцыі магнітнага поля.

З доследаў вынікае, што модуль сілы, якая дзейнічае з боку аднароднага магнітнага поля на прамалінейны ўчастак правадніка з токам, прапарцыянальны сіле току I , даўжыні гэтага ўчастка Δl і сінусу вугла α паміж напрамкамі току ў правадніку і індукцыі магнітнага поля:

$$F \sim I \Delta l \sin \alpha.$$

Гэтая сіла названа ў гонар А. М. Ампера *сілай Ампера*.

Паколькі $F_{\max} \sim I \Delta l$, то адносіны $\frac{F_{\max}}{I \Delta l}$ для дадзенай часткі магнітнага поля не залежаць ні ад сілы току I ў правадніку, ні ад даўжыні Δl прамалінейнага ўчастка правадніка, які цалкам знаходзіцца ў аднародным магнітным полі. Таму дадзеныя адносіны могуць з'яўляцца характарыстыкай той часткі магнітнага поля, у якой знаходзіцца ўчастак правадніка. Гэта дазваляе даць наступнае азначэнне індукцыі магнітнага поля.

Індукцыя магнітнага поля — фізічная вектарная велічыня, модуль якой роўны адносінам максімальнага значэння сілы, што дзейнічае з боку магнітнага поля на прамалінейны ўчастак правадніка з токам, да здабытку сілы току ў ім і даўжыні гэтага ўчастка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}. \quad (29.1)$$

Такім чынам, у кожным пункце магнітнага поля можна вызначыць як напрамак індукцыі магнітнага поля, так і яе модуль.

У СІ індукцыю магнітнага поля вымяраюць у тэслах (Тл) у гонар сербскага інжынера і вынаходніка Ніколы Тэслы (1856–1943), які з 1884 г. працаваў у ЗША.

1 Тл — індукцыя аднароднага магнітнага поля, у якім на прамалінейны ўчастак правадніка даўжынёй 1 м пры сіле току ў ім 1 А дзейнічае з боку поля максімальная сіла, модуль якой 1 Н.

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}.$$

Ад тэорыі да практыкі

Прамалінейны праваднік даўжынёй $\Delta l = 40$ см знаходзіцца ў аднародным магнітным полі. Сіла току, які праходзіць па правадніку, $I = 4,0$ А. Чаму роўны модуль магнітнай індукцыі, калі модуль максімальнай сілы, якая дзейнічае на праваднік з боку магнітнага поля, $F_{\max} = 48$ мН?



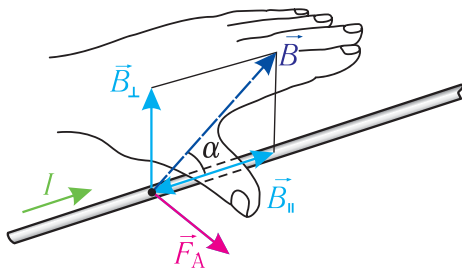
Закон Ампера. З выразу (29.1) вынікае, што максімальнае значэнне сілы Ампера:

$$F_{\max} = BIl.$$

Эксперыментальна даказана, што ў агульным выпадку модуль сілы Ампера можна разлічыць па формуле

$$F_A = BIl \sin \alpha. \quad (29.2)$$

Выраз (29.2) называюць *законам Ампера*.



Мал. 164

Напрамак сілы Ампера вызначаюць паводле правіла левай рукі: калі левую руку размясціць так, каб перпендыкулярны да правадніка складнік індукцыі магнітнага поля \vec{B}_{\perp} уваходзіў у далонь, чатыры выцягнутыя пальцы былі накіраваныя па току, то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Ампера, якая дзейнічае на прамалінейны ўчастак правадніка з токам (мал. 164).

Ад тэорыі да практыкі

1. На прамалінейны праваднік з токам, размешчаны перпендыкулярна лініям магнітнай індукцыі аднароднага магнітнага поля з індукцыяй \vec{B} , дзейнічае магнітная сіла \vec{F} .

а) Як змяняцца модулі індукцыі аднароднага магнітнага поля B і сілы Ампера F_A , калі сілу току ў правадніку павялічыць у 2,5 раза?

б) Як зменіцца модуль сілы F_A , калі праваднік размясціць паралельна лініям магнітнай індукцыі?

2. У аднародным магнітным полі перпендыкулярна лініям індукцыі размешчаны праваднік з токам, сагнуты пад прамым вуглом. Пад якім вуглом адна да адной накіраваны сілы Ампера, што дзейнічаюць на стораны гэтага вугла?



Прынцып суперпазіцыі магнітных палёў. У выпадку, калі магнітнае поле ствараецца некалькімі крыніцамі, індукцыю рэзультуючага магнітнага поля можна вызначыць паводле **прынцыпу суперпазіцыі:** калі магнітнае поле ў некаторым пункце прасторы ствараецца не адным, а некалькімі электрычнымі токамі

(або зарадамі, якія рухаюцца), то індукцыя рэзультуючага магнітнага поля ў гэтым пункце роўная вектарнай суме індукцый магнітных палёў, створаных кожным токам (зарадам, які рухаецца):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$



МАГНІТНАЕ ПОЛЕ

Індукцыя магнітнага поля — фізічная вектарная велічыня, модуль якой роўны адносінам максімальнага значэння сілы, што дзейнічае з боку аднароднага магнітнага поля на прамалінейны ўчастак правадніка з токам, да здабытку сілы току ў ім і даўжыні гэтага ўчастка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$$

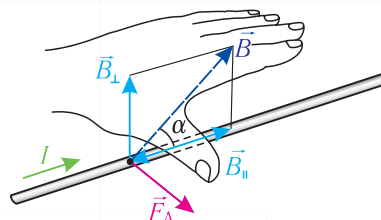
Прынцып суперпазіцыі: калі магнітнае поле ў некаторым пункце прасторы ствараецца не адным, а некалькімі электрычнымі токамі (або зарадамі, якія рухаюцца), то індукцыя рэзультуючага магнітнага поля ў гэтым пункце роўная вектарнай суме індукцый магнітных палёў, створаных кожным токам (або зарадам, які рухаецца):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

Модуль сілы, якая дзейнічае на прамалінейны праваднік з токам з боку аднароднага магнітнага поля (модуль сілы Ампера), можна разлічыць па формуле

$$F_A = B I \Delta l \sin \alpha,$$

дзе α — вугал паміж напрамкамі току і індукцыі магнітнага поля



Напрамак сілы Ампера вызначаюць паводле правіла левай рукі: калі левую руку размясціць так, каб перпендыкулярны да правадніка складнік індукцыі магнітнага поля \vec{B}_\perp уваходзіў у далонь, чатыры выцягнутыя пальцы былі накіраваныя па току, то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Ампера, якая дзейнічае на ўчастак правадніка з токам



1. Якая фізічная велічыня характарызуе магнітнае поле ў кожным яго пункце?
2. Як вызначаюць модуль індукцыі магнітнага поля? У якіх адзінках вымяраюць індукцыю магнітнага поля?
3. Як вызначаюць модуль сілы Ампера? Пры якім значэнні вугла паміж напрамамі току ў правадніку і індукцыі магнітнага поля модуль сілы, якая дзейнічае на праваднік з токам з боку поля, максімальны? роўны нулю?
4. Як можна вызначыць напрамак сілы Ампера?
5. Сфармулюйце прынцып суперпазіцыі магнітных палёў.



Прыклад рашэння задачы

У аднародным магнітным полі, індукцыя якога накіравана вертыкальна ўніз і яе модуль $B = 0,50$ Тл, на лёгкіх правадах гарызантальна падвешаны прамалінейны металічны стрыжань даўжынёй $l = 0,20$ м і масай $m = 50$ г. Сіла току, які праходзіць па стрыжні, $I = 5,0$ А. Вызначце, на які вугал ад вертыкалі адхіліліся правады, якія падтрымліваюць стрыжань. Уздзеянне магнітнага поля на ток у падводзячых правадах не прымаць пад увагу.

Дадзена:
 $B = 0,50$ Тл
 $l = 0,20$ м
 $m = 50$ г =
 $= 0,050$ кг
 $I = 5,0$ А

α — ?

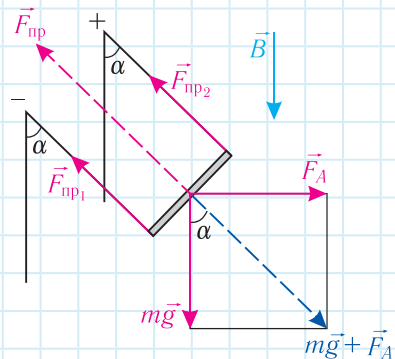
Рашэнне. На стрыжань дзейнічаюць сілы пружкасці правадоў $\vec{F}_{\text{пр}} = \vec{F}_{\text{пр1}} + \vec{F}_{\text{пр2}}$, сіла цяжару $m\vec{g}$ і сіла Ампера \vec{F}_A (мал. 165). Модуль гэтай сілы вызначаюць паводле закона Ампера: $F_A = BIl$. Пры раўнавазе стрыжня вектарная сума сіл роўная нулю: $\vec{F}_{\text{пр}} + m\vec{g} + \vec{F}_A = \vec{0}$. З малюнка 165 вынікае:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{mg} = \frac{BIl}{mg}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,50 \text{ Тл} \cdot 5,0 \text{ А} \cdot 0,20 \text{ м}}{0,050 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 1,0,$$

такім чынам, $\alpha = 45^\circ$.

Адказ: $\alpha = 45^\circ$.



Мал. 165

Практыкаванне 21

1. Прамалінейны праваднік даўжынёй $l = 40$ см знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0,50$ Тл. Сіла току ў правадніку $I = 8,0$ А. Вызначце найбольшае і найменшае значэнні сілы, якая дзейнічае на праваднік з боку магнітнага поля.

2. Прамалінейны праваднік даўжынёй $l = 1,5$ м знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0,20$ Тл. Сіла току ў правадніку $I = 3,0$ А. Вызначце вугал паміж напрамкамі току і індукцыі магнітнага поля, калі на праваднік дзейнічае сіла Ампера, модуль якой $F = 0,64$ Н.

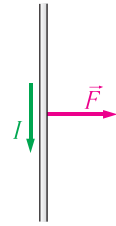
3. Прамалінейны праваднік даўжынёй $l = 50$ см размешчаны перпендыкулярна лініям індукцыі аднароднага магнітнага поля (мал. 166). Сіла току ў правадніку $I = 2,0$ А. На праваднік з боку магнітнага поля дзейнічае сіла, модуль якой $F = 0,40$ Н. Вызначце модуль і напрамак індукцыі магнітнага поля.

4. Сіла току ў прамалінейным правадніку, плошча папярочнага сячэння якога $S = 0,10$ см², складае $I = 3,9$ А. У аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0,20$ Тл, на праваднік дзейнічае максімальна магчымая для дадзенага магнітнага поля сіла Ампера. Вызначце шчыльнасць рэчыва правадніка, калі модуль сілы Ампера роўны модулю сілы цяжару, што дзейнічае на праваднік.

5. Магнітнае поле ўтворана накладаннем двух аднародных магнітных палёў, модулі індукцыі якіх $B_1 = 0,03$ Тл і $B_2 = 0,04$ Тл. Вызначце модуль індукцыі рэзультуючага поля, калі лініі індукцыі гэтых палёў узаемна перпендыкулярныя.

6. Магнітнае поле, модуль індукцыі якога $B = 0,03$ Тл, утворана накладаннем двух аднародных магнітных палёў. Вызначце максімальна магчымае значэнне індукцыі першага поля, калі модуль індукцыі другога поля $B_2 = 0,02$ Тл.

7. Магнітнае поле, модуль індукцыі якога $B = 0,02$ Тл, утворана накладаннем двух аднародных магнітных палёў. Вызначце мінімальна магчымае значэнне модуля індукцыі другога поля, калі модуль індукцыі першага поля $B_1 = 0,05$ Тл.



Мал. 166

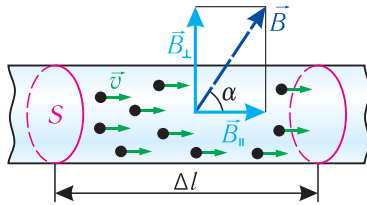


§ 30. Сіла Лорэнца.

Рух зараджаных часціц у магнітным полі

Паколькі электрычны ток уяўляе з сябе ўпарадкаваны рух зараджаных часціц, то гэта азначае, што магнітнае поле, дзейнічаючы на праваднік з токам, дзейнічае тым самым на кожную з гэтых часціц. Такім чынам, сілу Ампера можна разглядаць як вынік складання сіл, што дзейнічаюць на асобныя зараджаныя часціцы, якія рухаюцца. Як можна вызначыць сілу, што дзейнічае з боку магнітнага поля на зараджаную часціцу, якая рухаецца ў гэтым полі?

Сіла Лорэнца. Сілу, якой магнітнае поле дзейнічае на зараджаную часціцу, што рухаецца ў гэтым полі, называюць *сілай Лорэнца* ў гонар выдатнага нідэрландскага фізіка Хендрыка Антона Лорэнца (1853–1928).



Мал. 167

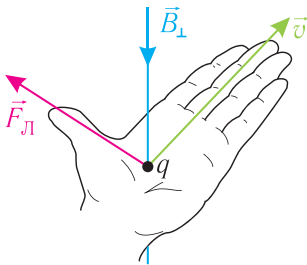
Модуль сілы Лорэнца можна вызначыць па формуле $F_L = \frac{F_A}{N}$, дзе N — агульная колькасць свабодных зараджаных аднолькавых часціц на прамалінейным участку правадніка даўжынёй Δl (мал. 167). Калі модуль зараду адной часціцы q , а модуль сумарнага зараду ўсіх часціц Nq , то згодна з азначэннем сілы току $I = \frac{Nq}{\Delta t}$, дзе Δt — прамежак часу, за які зараджаная часціца праходзіць участак правадніка даўжынёй Δl . Тады

$$F_L = \frac{BI\Delta l \sin \alpha}{N} = \frac{BNq\Delta l \sin \alpha}{\Delta t N} = \frac{Bq\Delta l \sin \alpha}{\Delta t}.$$

Паколькі $\frac{\Delta l}{\Delta t} = v$ — модуль сярэдняй скорасці ўпарадкаванага руху зараджанай часціцы ў стацыянарным* электрычным полі ўнутры правадніка, то формулу для вызначэння модуля сілы Лорэнца можна запісаць у выглядзе:

$$F_L = Bqv \sin \alpha, \quad (30.1)$$

дзе α — вугал паміж напрамкамі індукцыі магнітнага поля \vec{B} і скорасці \vec{v} ўпарадкаванага руху зараджанай часціцы.



Мал. 168

З формулы (30.1) вынікае, што сіла Лорэнца максімальная ў выпадку, калі зараджаная часціца рухаецца перпендыкулярна напрамку індукцыі магнітнага поля ($\alpha = 90^\circ$). Калі часціца рухаецца ўздоўж лініі індукцыі поля ($\alpha = 0^\circ$ або $\alpha = 180^\circ$), сіла Лорэнца на яе не дзейнічае. Сіла Лорэнца залежыць ад выбару інерцыяльнай сістэмы адліку, бо ў розных сістэмах адліку скорасць руху зараджанай часціцы можа адрознівацца.

* Электрычнае поле, якое ствараецца і падтрымліваецца крыніцай току на працягу доўгага прамежку часу і забяспечвае пастаянны электрычны ток у правадніку, называюць стацыянарным электрычным полем.

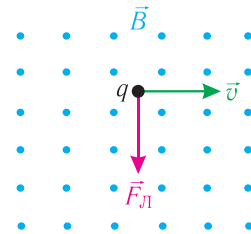
Напрамак сілы Лорэнца, якая дзейнічае на зараджаную часціцу, як і напрамак сілы Ампера, вызначаюць паводле **правіла левай рукі** (мал. 168): калі левую руку размясціць так, каб складнік індукцыі магнітнага поля, перпендыкулярны скорасці руху часціцы, уваходзіў у далонь, а чатыры пальцы былі накіраваныя па руху дадатна зараджанай часціцы (супраць руху адмоўна зараджанай часціцы), то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Лорэнца, якая дзейнічае на часціцу.

Сіла Лорэнца перпендыкулярная як напрамку скорасці \vec{v} руху часціцы, так і напрамку індукцыі \vec{B} магнітнага поля.

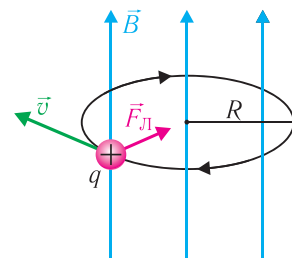
Ад тэорыі да практыкі

На малюнку 169 паказаны напрамкі індукцыі \vec{B} магнітнага поля, скорасці \vec{v} руху часціцы \dot{y} дадзены момант часу і сілы Лорэнца \vec{F}_L , якая дзейнічае на часціцу з боку магнітнага поля. Вызначце знак зараду часціцы.

Мал. 169



Рух зараджаных часціц у аднародным магнітным полі. Пад дзеяннем сілы Лорэнца часціцы, якія маюць электрычны зарад, рухаюцца ў магнітным полі па крывалінейных траекторыях. Прычым калі ў дадзенай інерцыяльнай сістэме адліку напрамак скорасці руху часціцы перпендыкулярны напрамку індукцыі аднароднага магнітнага поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$, $\alpha = 90^\circ$), то траекторыяй руху зараджанай часціцы з'яўляецца акружнасць (мал. 170).



Мал. 170

Няхай у аднародным магнітным полі, індукцыя якога \vec{B} , рухаецца часціца са скорасцю \vec{v} , накіраванай перпендыкулярна лініям індукцыі. Маса часціцы m і зарад q . Паколькі сіла Лорэнца \vec{F}_L перпендыкулярная скорасці \vec{v} руху часціцы (гл. мал. 170), то гэтая сіла змяняе толькі напрамак скорасці, надаючы часціцы цэнтраімклівае паскарэнне, модуль якога згодна з другім законам Ньютана:

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{Bqv}{m}$$

У выніку часціца рухаецца па акружнасці, радыус якой можна вызначыць з формулы $a = \frac{v^2}{R}$:

$$R = \frac{v^2}{a} = \frac{v^2 m}{Bqv} = \frac{mv}{Bq}.$$

Перыяд T абарачэння часціцы, якая рухаецца па акружнасці ў аднародным магнітным полі:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{Bq} = \frac{2\pi m}{Bq}. \quad (30.2)$$

Як вынікае з выразу (30.2), перыяд абарачэння часціцы не залежыць ад модуля скорасці яе руху і радыуса траекторыі, а вызначаецца толькі модулем зараду часціцы, яе масай і значэннем індукцыі магнітнага поля.

Ад тэорыі да практыкі

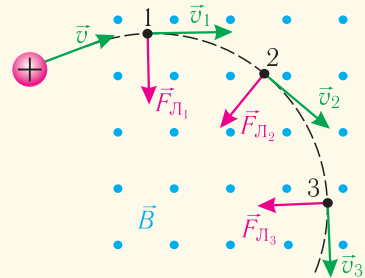
У аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 4,0$ мТл, перпендыкулярна лініям індукцыі поля рухаецца электрон. Чаму роўны модуль паскарэння электрона, калі модуль скорасці яго руху $v = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$? Маса і модуль зараду электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг і $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл адпаведна.



Цікава ведаць

Паколькі сіла Лорэнца накіравана пад вуглом 90° да скорасці руху зараджанай часціцы ў кожным пункце траекторыі (мал. 171), то работа гэтай сілы пры руху зараджанай часціцы ў магнітным полі роўная нулю. Таму кінетычная энергія часціцы, якая рухаецца ў стацыянарным (нязменным у часе) магнітным полі, не змяняецца, гэта значыць стацыянарнае магнітнае поле нельга выкарыстоўваць для паскарэння зараджаных часціц.

Павелічэнне кінетычнай энергіі часціцы, гэта значыць яе разгон, магчыма пад дзеяннем электрычнага поля (у гэтым выпадку змена кінетычнай энергіі часціцы роўная рабоце сілы поля). Таму ў сучасных паскаральніках (мал. 172) зараджаных часціц электрычнае поле выкарыстоўваюць для паскарэння, а магнітнае — для «фарміравання» траекторыі руху зараджаных часціц.



Мал. 171



Мал. 172



Сілу, якой магнітнае поле дзейнічае на зараджаную часціцу, што рухаецца ў гэтым полі, называюць сілай Лорэнца

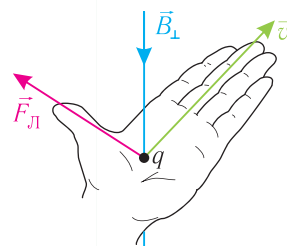
Модуль сілы Лорэнца:

$$F_L = B|q|v\sin\alpha$$

Калі ў дадзенай інерцыяльнай сістэме адліку скорасць руху зараджанай часціцы перпендыкулярная індукцыі аднароднага магнітнага поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$), то траекторыяй руху часціцы з'яўляецца акружнасць

Перыяд абарачэння часціцы не залежыць ад скорасці яе руху і радыуса траекторыі, а вызначаецца толькі модулем яе зараду, масай і значэннем індукцыі магнітнага поля:

$$T = \frac{2\pi m}{B|q|}$$



Напрамак сілы Лорэнца вызначаюць паводле правіла левай рукі: калі левую руку размясціць так, каб складнік індукцыі магнітнага поля, перпендыкулярны скорасці руху часціцы, уваходзіў у далонь, а чатыры пальцы былі накіраваны па руху дадатна зараджанай часціцы (супраць руху адмоўна зараджанай), то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Лорэнца, якая дзейнічае на часціцу



1. Як вызначаюць модуль сілы, што дзейнічае з боку магнітнага поля на зараджаную часціцу, якая ў ім рухаецца?
2. Як вызначаюць напрамак сілы Лорэнца?
3. Зараджаная часціца рухаецца ў аднародным магнітным полі са скорасцю, накіраванай перпендыкулярна лініям індукцыі. Па якой траекторыі рухаецца часціца?
4. Ад чаго залежыць перыяд абарачэння зараджанай часціцы ў аднародным магнітным полі?



Приклад розв'язання задачі

Електрон рухається в однородним магнітним полі по окружності радіусом $R = 12$ см зі швидкістю, модуль якої значно менший за модуль швидкості світла. Визначте модуль імпульсу електрона, коли модуль індукції магнітного поля $B = 0,020$ Тл.

Дано:

$$R = 12 \text{ см} =$$

$$= 0,12 \text{ м}$$

$$B = 0,020 \text{ Тл}$$

$$p = ?$$

Розв'язання. Згідно з означенням модуль імпульсу електрона $p = mv$, де m — маса електрона; v — модуль швидкості його руху.

На електрон у магнітним полі діють сили Лоренца і сили тяжару, модуль якої у шість разів менший за модуль сили Лоренца. Тому діяння сили тяжару на заряджану частинку, яка рухається в магнітним полі, можна не враховувати. Згідно з другим законом Ньютона $\frac{mv^2}{R} = Bev$, звідки $v = \frac{BeR}{m}$, де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — модуль заряду електрона.

$$\text{Значить, } p = m \frac{BeR}{m} = BeR.$$

$$p = 0,020 \text{ Тл} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,12 \text{ м} = 3,8 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

$$\text{Відповідь: } p = 3,8 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

**Практикуваннє 22**

1. Електрон рухається зі швидкістю, модуль якої $v = 2,0 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$, перпендикулярно ліній індукції однородного магнітного поля, модуль індукції якого $B = 1,6$ мТл. Визначте модуль сили, яка діє на електрон у магнітним полі.

2. Електрон рухається в однородним магнітним полі по окружності, радіус якої $R = 8,0$ мм. Визначте модуль індукції магнітного поля, коли модуль швидкості руху електрона $v = 4,0 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Маса електрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

3. Пилінка рухається в однородним магнітним полі, модуль індукції якого $B = 1,0$ Тл, перпендикулярно ліній індукції. Маса і заряд пилінки $m = 0,80$ мг і $q = 1,6$ нКл відповідно. Визначте період обертання пилінки.

4. Електрон рухається в однородним магнітним полі, модуль індукції якого $B = 2,0$ мТл, по окружності радіусом $R = 2,0$ см. Визначте кінетичну енергію електрона. Маса електрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

5. Вызначце, якую паскаральную рознасць патэнцыялаў павінна прайсці са стану спакою часціца, каб у аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 80$ мТл, на яе дзейнічала сіла Лорэнца, модуль якой $F = 20$ мкН. Маса часціцы $m = 12$ мг, яе зарад $Q = 3,0$ мкКл. У магнітнае поле часціца ўлятае перпендыкулярна лініям індукцыі.



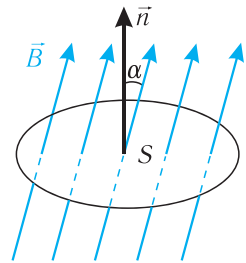
§ 31. Магнітны паток. З'ява электрамагнітнай індукцыі

Доследы Эрстэда і Ампера дапамаглі зразумець, што электрычныя і магнітныя палі маюць адны і тыя крыніцы — электрычныя зарады, якія рухаюцца. Гэта дазволіла выказаць меркаванне, што палі нейкім чынам звязаны адно з адным. Фарадэй быў абсалютна ўпэўнены ў адзінстве электрычных і магнітных з'яў. Неўзабаве пасля адкрыцця Эрстэда Фарадэй запісаў у дзённіку ў снежні 1821 г.: «Ператварыць магнетызм у электрычнасць». На вырашэнне гэтай фундаментальнай задачы яму спатрэбілася дзесяць гадоў. Пасля шматлікіх эксперыментаў Фарадэй зрабіў эпахальнае адкрыццё: замыкаючы і размыкаючы электрычны ланцуг адной шпулі, ён атрымаў у замкнутым ланцугу другой шпулі электрычны ток. Назіраную з'яву Фарадэй назваў электрамагнітнай індукцыяй.

Магнітны паток. Індукцыя магнітнага поля характарызуе магнітнае поле ў канкрэтным пункце прасторы. Каб ахарактарызаваць магнітнае поле ва ўсіх пунктах паверхні, абмежаванай замкнутым контурам, уявілі фізічную велічыню, якую назвалі *магнітным патокам* (патокам індукцыі магнітнага поля).

Магнітны паток праз плоскую паверхню, якая знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, — фізічная скалярная велічыня, роўная здабытку модуля індукцыі магнітнага поля, плошчы паверхні і косінуса вугла паміж напрамкамі нармалі да гэтай паверхні і індукцыі магнітнага поля (мал. 173):

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (31.1)$$



Мал. 173

Адзінкай магнітнага патоку ў СІ з'яўляецца вебер (Вб). 1 Вб — магнітны паток аднароднага магнітнага поля індукцыяй 1 Тл праз плоскую паверхню, размешчаную перпендыкулярна індукцыі магнітнага поля, плошча якой 1 м².

Формула (31.1) дазваляе зрабіць выснову, што магнітны паток залежыць ад узаемнай арыентацыі ліній індукцыі магнітнага поля і нармалі да плоскай паверхні. Магнітны паток максімальны, калі $\alpha = 0$, гэта значыць калі паверхня перпендыкулярная лініям індукцыі магнітнага поля:

$$\Phi_{\max} = BS.$$

Калі плоская паверхня паралельная лініям індукцыі ($\alpha = 90^\circ$), то магнітны паток праз яе роўны нулю.

На практыцы часта сустракаюцца сітуацыі, калі лініі індукцыі магнітнага поля перасякаюць паверхні, абмежаваныя не адным контурам, а некалькімі. Так, напрыклад, лініі індукцыі могуць перасякаць паверхні, абмежаваныя віткамі саленоіда, якія «паралельныя» адзін аднаму і маюць аднолькавую плошчу паверхні. У гэтым выпадку магнітны паток вызначаюць па формуле

$$\Phi = NBS,$$

дзе N — колькасць віткоў саленоіда; S — плошча паверхні, абмежаванай кожным вітком.

Змяніць магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, можна, змяняючы: 1) індукцыю магнітнага поля, у якім знаходзіцца контур; 2) памеры гэтага контуру; 3) арыентацыю контуру ў магнітным полі.

Ад тэорыі да практыкі

Квадратная драцяная рамка са стараной даўжынёй $a = 4$ см змешчана ў аднароднае магнітнае поле, лініі індукцыі якога перпендыкулярныя плоскасці рамкі, а модуль індукцыі $B = 0,5$ Тл. Якім будзе змяншэнне магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную рамкай, пры яе павароце на вугал $\beta = 90^\circ$?

З'ява электрамагнітнай індукцыі. У 1831 г. Фарадэй правёў серыю доследаў, якія дазволілі пацвердзіць наступныя факты:

1) пры руху пастаяннага магніта адносна шпулі, падключанай да гальванометра, у шпулі ўзнікаў электрычны ток (стрэлка гальванометра адхілялася). Прычым напрамак току змяняўся на супрацьлеглы пры змене напрамку руху магніта. Гэтая ж з'ява адбывалася, калі магніт быў нерухомы, а рухалі шпулю (мал. 174);

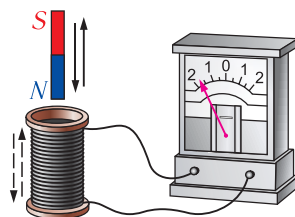
2) у шпулі, падключанай да гальванометра, узнікаў электрычны ток, калі адносна яе рухалі іншую шпулю, якая была падключана да крыніцы пастаяннага току (мал. 175);

3) калі дзве шпулі былі намотаныя на агульны каркас і адну падключалі да гальванометра, а другую — да крыніцы току, то ток у першай шпулі ўзнікаў пры змене току ў другой (мал. 176).

Ва ўсіх разгледжаных выпадках электрычны ток у ланцугу гальванометра ўзнікаў толькі пры змене магнітнага патоку праз паверхні, абмежаваныя віткамі шпулі, падключанай да гальванометра (мал. 177). Прычым значэнне сілы току, які ўзнікаў у контуры, не залежала ад спосабу змянення магнітнага патоку, а вызначалася толькі скорасцю яго змянення. Назвалі такі ток індукцыйным токам.

Індукцыйны ток — электрычны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры пры любой змене магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам.

Для існавання току ў замкнутым электрычным ланцугу неабходна, каб на свабодных зараджаных часціцы дзейнічалі пабочныя сілы, гэта значыць у ланцугу павінна быць крыніца ЭРС. Відавочна, што ў доследах Фарадэя крыніцай гэтых пабочных сіл з'яўляўся магнітны паток, змена якога стварала ў ланцугу ЭРС. Гэтую ЭРС назвалі *электрарухаючая сіла індукцыі* або *ЭРС індукцыі*. Калі ланцуг замкнуты, ЭРС індукцыі стварае індукцыйны ток, гэта значыць узнікненне індукцыйнага току з'яўляецца другасным эфектам.



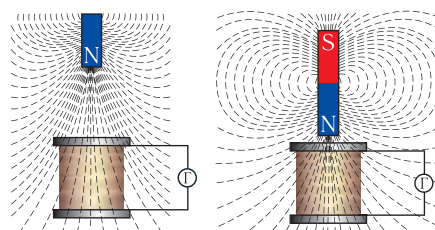
Мал. 174



Мал. 175



Мал. 176



Мал. 177

Электрамагнітная індукцыя — з’ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў контуры, які або знаходзіцца ў зменлівым у часе магнітным полі, або рухаецца ў пастаянным магнітным полі так, што магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, змяняецца.

Ад тэорыі да практыкі

1. Што змянілася б у доследах Фарадэя, калі б ён выкарыстаў шпулі з вялікай колькасцю віткоў?
2. Ці адрозніваецца электрычны ток, індукцыраваны ў правадніку, ад электрычнага току, які ствараецца любой іншай крыніцай, напрыклад гальванічным элементам?



«Ператварыць магнетызм у электрычнасць»

Узнікненне электрычнага току пры адносным руху шпулі і магніта (другой шпулі)

Узнікненне электрычнага току ў адной шпулі пры змене току ў другой шпулі

Індукцыйны ток — электрычны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры пры любой змене магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам

Магнітны паток праз плоскую паверхню, якая знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, — фізічная скалярная велічыня, роўная здабытку модуля індукцыі магнітнага поля, плошчы паверхні і косінуса вугла паміж напрамкамі нармалі да гэтай паверхні і індукцыі магнітнага поля:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Электрамагнітная індукцыя — з’ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў контуры, які або знаходзіцца ў спакоі ў зменлівым у часе магнітным полі, або рухаецца ў пастаянным магнітным полі так, што магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, змяняецца

3 гісторыі фізікі

Адзін з гісторыкаў навукі пісаў: «...працы іншых вучоных — Кулона, Гальвані, Эрстэда, Араго, Ампера — уяўлялі з сябе асобныя пікі, тады як Фарадэй узвёў “горны ланцуг” з узаемазвязаных работ».



1. Што называюць магнітным патокам? Што з’яўляецца адзінкай магнітнага патоку ў СІ?
2. Якімі спосабамі можна змяніць магнітны паток праз паверхню?
3. Пры якіх умовах у замкнутым праводным контуры ўзнікае індукцыйны ток?
4. Што галоўнае ў з’яве электрамагнітнай індукцыі?

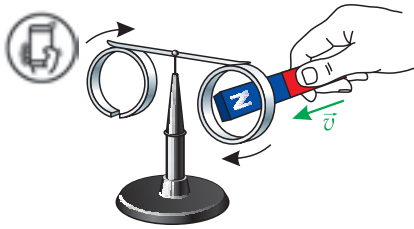


§ 32. Правіла Ленца. Закон электрамагнітнай індукцыі

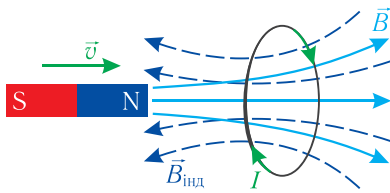
Пасля адкрыцця з’явы электрамагнітнай індукцыі Фарадэй практычна за паўтара месяца выявіў усе яе істотныя заканамернасці. Ён зразумеў сутнасць з’явы, якая адыграла такую важную ролю для чалавецтва: ва ўсіх эксперыментах, праведзеных ім, індукцыйны ток у праводным контуры ўзнікаў у выніку змены магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам. Фарадэй не толькі адкрыў з’яву электрамагнітнай індукцыі, але і першы прадэманстравалі, што «можна стварыць пастаянны ток электрычнасці пры дапамозе звычайных магнітаў», сканструяваўшы прыладу, якая дазваляла пераўтвараць механічную энергію ў электрычную.

Напрамак індукцыйнага току. Доследы Фарадэя паказалі, што напрамак індукцыйнага току, выкліканага ўзрастаннем магнітнага патоку, супрацьлеглы напрамку індукцыйнага току, выкліканага яго змяншэннем. Даследаваўшы з’яву электрамагнітнай індукцыі, пецярбургскі акадэмік Эмілій Хрысціянавіч Ленц (1804–1865) у 1833 г. сфармуляваў **правіла для вызначэння напрамку індукцыйнага току (правіла Ленца)**: індукцыйны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры, мае такі напрамак, што створаны ім магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, супрацьдзейнічае змяненню магнітнага патоку, які выклікае гэты індукцыйны ток. Гэта азначае, што пры ўзрастанні магнітнага патоку магнітнае поле індукцыйнага току накіравана супраць знешняга поля, а пры змяншэнні — магнітнае поле індукцыйнага току накіравана так, як і знешняе поле.

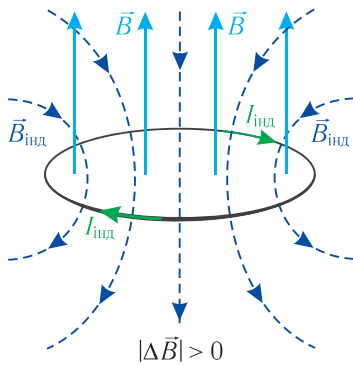
У больш сціслай форме правіла Ленца можна сфармуляваць наступным чынам: індукцыйны ток заўсёды накіраваны так, што яго дзеянне супрацьлеглае дзеянню прычыны, якая выклікала гэты ток.



Мал. 178



Мал. 179



Мал. 180

магнітного потоку $\Delta\Phi < 0$, то напрямки індукції зовнішнього магнітного поля \vec{B} і магнітного поля індукційного току $\vec{B}_{\text{інд}}$ супадають, калі $\Delta\Phi > 0$, то яны супрацьлеглыя;

4) ведаючы напрамак ліній індукції магнітного поля індукційного току $\vec{B}_{\text{інд}}$, паводле правіла свярздэлка (правіла гадзіннікавай стрэлкі) вызначыць напрамак індукційного току.

Ад тэорыі да практыкі

Ці зменіцца напрамак індукційного току (гл. мал. 178), калі магніт набліжаець да кольца паўднёвым полюсам? Калі зменіцца, то як?

Правіла Ленца можна праілюстраваць, выкарыстоўваючы два алюмініевыя кольца (адно з іх з разрэзам), замацаваныя на стрыжні, які свабодна верціцца вакол вертыкальнай восі (мал. 178). З доследу вынікае, што пры набліжэнні пастаяннага магніта да суцэльнага кольца яно адштурхваецца ад магніта; пры аддаленні магніта — кольца прыцягваецца да яго. Адштурхванне і прыцяжэнне суцэльнага кольца тлумачаць узнікненнем у ім індукцыйнага току пры змяненні магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную кольцам. Відавочна, што пры набліжэнні магніта да кольца напрамак індукцыйнага току такі, што індукцыя магнітнага поля току супрацьлеглая індукцыі магнітнага поля пастаяннага магніта (мал. 179). Пры аддаленні магніта індукцыі магнітных палёў току і магніта супадаюць па напрамку. Пры руху магніта адносна кольца з разрэзам узаемадзеянне не назіраецца, бо індукцыйны ток адсутнічае.

Каб вызначыць напрамак індукцыйнага току згодна з правіламі Ленца, неабходна выканаць наступныя аперацыі (мал. 180):

1) вызначыць напрамак ліній індукцыі зовнішняга магнітнага поля \vec{B} ;

2) высветліць, павялічваецца ці памяншаецца магнітны паток праз паверхню, абмежаваную праводным контурам;

3) вызначыць напрамак ліній індукцыі магнітнага поля індукцыйнага току $\vec{B}_{\text{інд}}$: калі прырашчэнне

Правіла Ленца адпавядае закону захавання энергіі ў дачыненні да з'явы електрамагнітнай індукцыі. На самай справе, калі б індукцыйны ток меў іншы напрамак, ён мог бы існаваць без затрат энергіі, што супярэчыць закону захавання энергіі.

Адкрыццё з'явы електрамагнітнай індукцыі мела вялікае значэнне. Была даказаная ўзаемасувязь магнітных і электрычных з'яў, што паслужыла надалей адпраўным пунктам для распрацоўкі тэорыі електрамагнітнага поля.

Закон електрамагнітнай індукцыі. Аналізуючы вынікі доследаў Фарадэя, Максвел у 1873 г. прыйшоў да высновы, што ЭРС індукцыі ў замкнутым праводным контуры прапарцыянальная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, гэта значыць

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (32.1)$$

Каб забяспечыць строгую роўнасць у выразе (32.1), неабходна ўлічыць напрамак індукцыйнага току. Паводле правіла Ленца пры павелічэнні магнітнага патоку $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0\right)$ ЭРС індукцыі адмоўная ($\mathcal{E}_{\text{інд}} < 0$) і, наадварот, пры змяншэнні магнітнага патоку $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0\right)$ ЭРС індукцыі дадатная ($\mathcal{E}_{\text{інд}} > 0$). Тады

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (32.2)$$

Такім чынам, ЭРС електрамагнітнай індукцыі ў контуры роўная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, узятай са знакам «мінус».

Выраз (32.2) называюць **законам електрамагнітнай індукцыі Фарадэя**, чым падкрэсліваюць заслугі вучонага ў вывучэнні гэтай з'явы. Трэба адзначыць, што дадзены закон з'яўляецца ўніверсальным, гэта значыць ЭРС індукцыі не залежыць ад спосабу змянення магнітнага патоку.

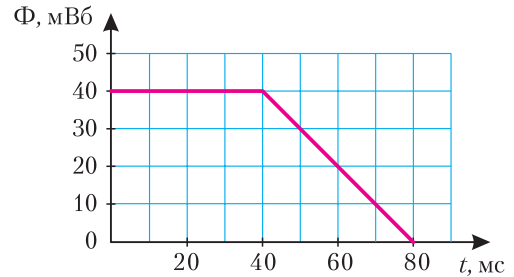
Ведаючы ЭРС індукцыі, можна вызначыць сілу індукцыйнага току. Згодна з законам Ома для поўнага ланцуга:

$$I_{\text{інд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{R},$$

дзе R — супраціўленне правадніка, з якога выраблены замкнуты праводны контур.

Ад тэорыі да практыкі

На малюнку 181 прыведзены графік залежнасці магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, ад часу. Вызначце ЭРС індукцыі ў моманты часу $t_1 = 30$ мс і $t_2 = 60$ мс.



Мал. 181



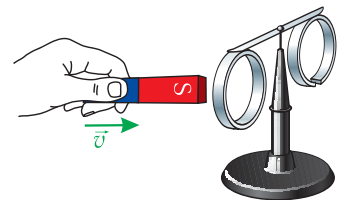
Індукцыйны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры, мае такі напрамак, што створаны ім магнітны патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, супрацьдзейнічае змяненню магнітнага патоку, які выклікае гэты індукцыйны ток (правіла Ленца)

ЭРС электрамагнітнай індукцыі ў контуры роўная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, узятай са знакам «мінус» (закон электрамагнітнай індукцыі Фарадэя):

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



1. Як фармулююць правіла Ленца?
2. Як можна растлумачыць вынікі доследаў з суцэльным алюмініевым кольцам і перамышчэннем пастаяннага магніту?
3. Як вызначаюць напрамак індукцыйнага току?
4. Які напрамак індукцыйнага току ў суцэльным алюмініевым кольцы, да якога падносяць магніт (мал. 182)? Як будзе рухацца кольца? Што будзе, калі магніт паднесці да кольца з разрэзам?
5. Як фармулююць закон электрамагнітнай індукцыі?
6. Чаму ў формуле, якая з'яўляецца матэматычным выразам закона электрамагнітнай індукцыі, стаіць знак «мінус»?



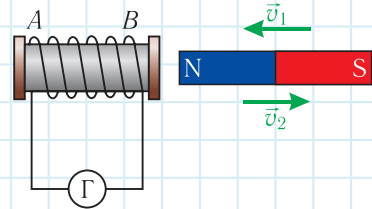
Мал. 182



Прыклад рашэння задачы

Вызначце напрамак індукцыйнага току ў саленоідзе, які паказаны на малюнку 183.

Рашэнне. Пры набліжэнні паўночнага полюса магніта да саленоіда ў ім індукцыруецца электрычны ток такога напрамку, пры якім бліжэйшы да магніта канец саленоіда набывае ўласцівасці паўночнага магнітнага полюса. Вызначыўшы напрамак току паводле правіла свярдзёлка (правіла гадзіннікавай стрэлкі), бачым, што ток у саленоідзе накіраваны ад пункта *A* да пункта *B*. Пры аддаленні паўночнага полюса магніта ад саленоіда ў ім узнікае індукцыйны ток, накіраваны ад пункта *B* да пункта *A*.



Мал. 183

Практыкаванне 23

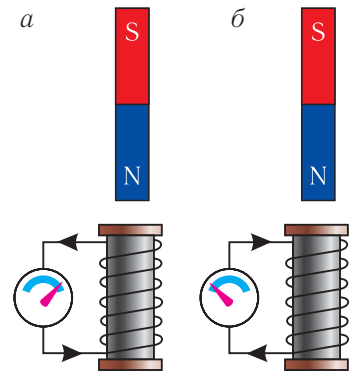
1. На малюнку 184, *a*, *б* стрэлкамі паказаны напрамкі індукцыйных токаў у саленоідзе. Вызначце напрамкі руху магнітаў у кожным выпадку.

2. Кругавы контур радыусам $r = 12$ см знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0,40$ Тл. Вызначце магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, калі: а) лініі індукцыі магнітнага поля паралельныя нармалі да гэтай паверхні; б) паверхня, абмежаваная контурам, паралельная лініям індукцыі магнітнага поля; в) лініі індукцыі магнітнага поля ўтвараюць вугал $\alpha = 30^\circ$ з гэтай паверхняй.

3. Вось саленоіда, які складаецца з $N = 100$ віткаў, паралельная лініям індукцыі аднароднага магнітнага поля, модуль індукцыі якога $B = 0,20$ Тл. Вызначце магнітны паток праз паверхню, абмежаваную ўсімі віткамі саленоіда, калі плошча кожнай з іх $S = 16$ см².

4. Вызначце прамежак часу, на працягу якога магнітны паток праз паверхню, абмежаваную замкнутым правадніком, раўнамерна зменшыўся на $|\Delta\Phi| = 0,20$ Вб, калі індукцыраваная ў правадніку ЭРС $\mathcal{E}_{\text{інд}} = 0,80$ В.

5. Вызначце магнітны паток праз паверхню, абмежаваную вітком саленоіда, які складаецца з $N = 100$ віткаў, калі пры раўнамерным памяншэнні да нуля модуля індукцыі аднароднага магнітнага поля ў саленоідзе на працягу прамежку часу $\Delta t = 5,0$ мс індукцыруецца ЭДС $\mathcal{E}_{\text{інд}} = 20$ В.



Мал. 184



§ 33. З'ява самаіндукцыі. Індуктыўнасць. Энергія магнітнага поля шпулі з токам

Фарадэй доследным шляхам вызначыў, што электрамагнітная індукцыя праяўляецца ва ўсіх выпадках змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам. Сучаснік Фарадэя амерыканскі фізік Джозэф Генры (1797–1878) незалежна ад свайго англійскага калегі адкрыў некаторыя з электрамагнітных эфектаў. У 1829 г. Генры выявіў, што ЭРС індукцыі ўзнікае ў нерухомым контуры і пры адсутнасці змянення знешняга магнітнага поля. Які механізм узнікнення ЭРС індукцыі ў гэтым выпадку?

Самаіндукцыя. Калі электрычны ток, які праходзіць у замкнутым праводным контуры, па якіх-небудзь прычынах змяняецца, то змяняецца і магнітнае поле, створанае гэтым токам. Гэта цягне за сабой змяненне магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам. Паколькі магнітны паток Φ прапарцыянальны модулю магнітнай індукцыі B поля, які, у сваю чаргу, прапарцыянальны сіле току I ў контуры, то

$$\Phi \sim I.$$

Каэфіцыенту прапарцыянальнасці паміж магнітным патокам Φ і сілай току I Томсан (лорд Кельвін) у 1853 г. прапанаваў даць назву «каэфіцыент самаіндукцыі»:

$$\Phi = LI. \quad (33.1)$$

Каэфіцыент самаіндукцыі L часта называюць *індуктыўнасцю* контуру. У СІ індуктыўнасць вымяраюць у генры (Гн). Індуктыўнасць контуру роўная 1 Гн, калі пры сіле току ў контуры 1 А магнітны паток праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам, роўны 1 Вб. Індуктыўнасць залежыць ад памераў і формы контуру, а таксама ад магнітных уласцівасцей асяроддзя, у якім знаходзіцца гэты контур.

Калі электрычны ток, які праходзіць у контуры, змяняецца, то ён стварае зменлівы магнітны паток, што прыводзіць да з'яўлення ЭРС індукцыі. Гэтую з'яву назвалі *самаіндукцыяй*.

Самаіндукцыя — з'ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў электрычным ланцугу ў выніку змены сілы току ў гэтым ланцугу.

ЭРС, якая ўзнікае ў гэтым выпадку, назвалі *электрарухаючай сілай самаіндукцыі*. Згодна з законам электрамагнітнай індукцыі

$$\mathcal{E}_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Калі індуктыўнасць контуру не змяняецца з цягам часу, гэта значыць $L = \text{const}$, то

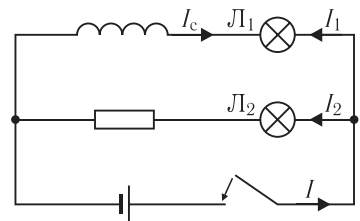
$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Паколькі контур замкнуты, ЭРС самаіндукцыі стварае ў ім ток самаіндукцыі. Сілу току самаіндукцыі можна вызначыць паводле закона Ома $I_c = \frac{\mathcal{E}_c}{R}$, дзе R — супраціўленне контуру. Паводле правіла Ленца ток самаіндукцыі заўсёды накіраваны так, каб супрацьдзейнічаць змене току, створанага крыніцай. Пры ўзрастанні сілы току ток самаіндукцыі накіраваны супраць току крыніцы, а пры памяншэнні — напярэкі току крыніцы і току самаіндукцыі супадаюць.

Ад тэорыі да практыкі

Якой павінна быць скорасць змянення сілы току, каб у шпулі з індуктыўнасцю $L = 0,20$ Гн узнікла ЭРС самаіндукцыі $\mathcal{E}_c = 4,0$ В?

Назіранне самаіндукцыі. Для назірання з'явы самаіндукцыі з'яром электрычны ланцуг, які складаецца са шпулі з вялікай індуктыўнасцю, рэзістара з электрычным супраціўленнем, роўным супраціўленню абмоткі шпулі, дзвюх аднолькавых лямпачак, ключа і крыніцы пастаяннага току. Схема ланцуга прыведзена на малюнку 185. Пры замыканні ключа лямпачка L_2 пачынае святціцца практычна адразу, а лямпачка L_1 — з прыкметным спазненнем. Пры ўзрастанні сілы току I_1 , створанага крыніцай на ўчастку, утвораным шпуляй і лямпачкай L_1 , ЭРС самаіндукцыі ў шпулі мае такую палярнасць, што створаны ёю ток самаіндукцыі I_c накіраваны насустрач току крыніцы. У выніку рост сілы току I_1 крыніцы запавольваецца, і сіла току $I = I_1 - |I_c|$ не адразу дасягае свайго максімальнага значэння.



Мал. 185

Энергія магнітнага поля. З'яву самаіндукцыі можна назіраць і пры размыканні электрычнага ланцуга. Калі ўключыць лямпачку паралельна шпулі



ў электрычным ланцуг пастаяннага току, то пры размыканні ланцуга можна ўбачыць, што лямпачка ярка ўспыхвае. Чаму гэта адбываецца? Пры размыканні ланцуга сіла току ў шпулі памяншаецца, што прыводзіць да ўзнікнення ЭРС самаіндукцыі. Ток самаіндукцыі, які ўзнікае ў ланцугу, паводле правіла Ленца, супадае па напрамку з токам у шпулі, не дазваляючы яму рэзка змяншаць сілу току. Гэта і забяспечвае ўспышку лямпачкі.

Адкуль бярэцца энергія, якая забяспечвае ўспышку лямпачкі? Гэта не энергія крыніцы току, бо яна ўжо адключана. Успышка лямпачкі адбываецца адначасова з памяншэннем сілы току ў шпулі і створанага токам магнітнага поля. Можна меркаваць, што назапашаная ў шпулі ў працэсе самаіндукцыі энергія магнітнага поля ператвараецца ва ўнутраную энергію спіралі лямпачкі і энергію яе выпраменьвання.



Разлікі пацвярджаюць, што энергію магнітнага поля можна вызначыць па формуле

$$W_m = \frac{LI^2}{2},$$

дзе L — індуктыўнасць контуру; I — сіла току.

Ад тэорыі да практыкі

Якая індуктыўнасць шпулі, калі пры сіле току $I = 2,0$ А энергія магнітнага поля шпулі $W_m = 1,2$ Дж?



Самаіндукцыя — з'ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў электрычным ланцугу ў выніку змены сілы току ў гэтым ланцугу

ЭРС самаіндукцыі прама прапарцыянальная індуктыўнасці контуру (шпулі) і скорасці змянення сілы току ў ім:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

З'ява самаіндукцыі адбываецца пры змене сілы току ў ланцугу, які змяшчае індуктыўнасць

Энергія магнітнага поля шпулі з токам прапарцыянальная квадрату сілы току:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

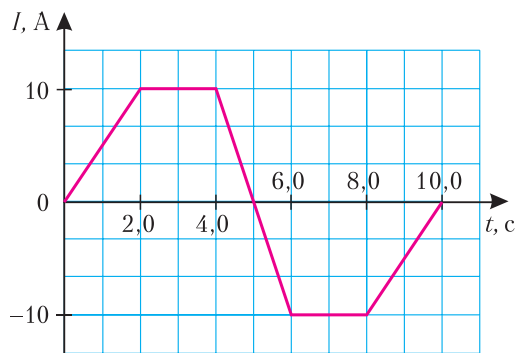


1. Што называюць самаіндукцыяй?
2. У якіх доследах можна назіраць з'яву самаіндукцыі?
3. Ад чаго залежыць ЭРС самаіндукцыі?
4. Што называюць індуктыўнасцю? У якіх адзінках у СІ яе вымяраюць?
5. Як вылічыць энергію магнітнага поля шпулі з токам?



Прыклады рашэння задач

Прыклад 1. На малюнку 186 прыведзены графік залежнасці сілы току, які праходзіць па саленоідзе, ад часу. Вызначце максімальнае значэнне модуля ЭРС самаіндукцыі ў саленоідзе, калі яго індуктыўнасць $L = 40$ мГн.



Мал. 186

Дадзена:

$$L = 40 \text{ мГн} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = ?$$

Рашэнне. ЭРС самаіндукцыі $\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Аналізуючы графік (мал. 186), можна зрабіць выснову, што сіла току, які праходзіць па саленоідзе, змяняецца на трох участках:

1) ад моманту часу $t_1 = 0,0$ с да моманту часу $t_2 = 2,0$ с сіла току змяняецца на $\Delta I_1 = 10$ А за прамежак часу $\Delta t_1 = 2,0$ с;

2) ад моманту часу $t_3 = 4,0$ с да моманту часу $t_4 = 6,0$ с сіла току змяняецца на $\Delta I_2 = -20$ А за прамежак часу $\Delta t_2 = 2,0$ с;

3) ад моманту часу $t_5 = 8,0$ с да моманту часу $t_6 = 10,0$ с сіла току змяняецца на $\Delta I_3 = 10$ А за прамежак часу $\Delta t_3 = 2,0$ с.

Паколькі прамежкі часу $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = 2,0$ с, то відавочна, што максімальнае значэнне модуля скорасці змянення сілы току, а значыць, і

максімальнае значэнне модуля ЭРС самаіндукцыі, створанай у саленоідзе, адпавядае прамежку часу $\Delta t_2 = 2,0$ с (ад $t_3 = 4,0$ с да $t_4 = 6,0$ с):

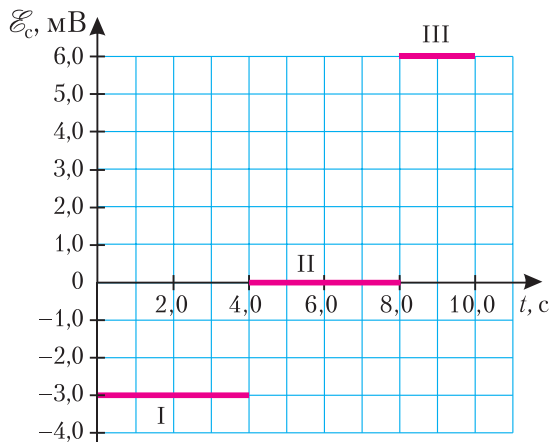
$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = L \left| \frac{\Delta I_2}{\Delta t_2} \right|.$$

Такім чынам,

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн} \cdot \frac{|-20 \text{ А}|}{2,0 \text{ с}} = 0,40 \text{ В}.$$

Адказ: $|\mathcal{E}_c|_{\max} = 0,40 \text{ В}$.

Прыклад 2. На малюнку 187 прыведзены графік залежнасці ЭРС самаіндукцыі, якая ўзнікае ў шпулі з індуктыўнасцю $L = 2,0$ мГн, ад часу. Вызначце змяненне сілы току на ўчастках I, II і III графіка. Чаму роўная энергія магнітнага поля ў момант часу $t = 4,0$ с, калі ў пачатковы момант часу сіла току ў шпулі $I = 0$?



Мал. 187

Дадзена:

$$L = 2,0 \text{ мГн} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$t = 4,0 \text{ с}$$

$$\Delta I_I \text{ — ? } \Delta I_{II} \text{ — ?}$$

$$\Delta I_{III} \text{ — ? } W_M \text{ — ?}$$

Рашэнне. Аналізуючы графік, можна зрабіць выснову, што на ўчастку I ЭРС самаіндукцыі $\mathcal{E}_{сI} = -3,0$ мВ, на ўчастку III — $\mathcal{E}_{сIII} = 6,0$ мВ. Змену сілы току на гэтых участках графіка можна вызначыць, выкарыстаўшы закон электрамагнітнай індукцыі для з'явы самаіндукцыі:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}; \Delta I = -\frac{\mathcal{E}_c \Delta t}{L}.$$

$$\Delta I_I = -\frac{-3,0 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 4,0 \text{ с}}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = 6,0 \text{ А}; \Delta I_{III} = -\frac{6,0 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 2,0 \text{ с}}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = -6,0 \text{ А}.$$

На ўчастку II графіка $\mathcal{E}_{cII} = 0$, значыць, сіла току не змянялася: $\Delta I_{II} = 0$.

У момант часу $t = 4,0$ с энергія магнітнага поля шпулі $W_M = \frac{LI^2}{2}$.

Такім чынам, $W_M = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot (6,0 \text{ А})^2}{2} = 36 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 36 \text{ мДж}$.

Адказ: $\Delta I_I = 6,0 \text{ А}$; $\Delta I_{II} = 0$; $\Delta I_{III} = -6,0 \text{ А}$; $W_M = 36 \text{ мДж}$.



Практыкаванне 24

1. Сіла току, які праходзіць па замкнутым праводным контуры, $I = 1,2$ А. Магнітнае поле гэтага току стварае магнітны паток $\Phi = 3,0$ мВб праз паверхню, абмежаваную контурам. Вызначце індуктыўнасць контуру.

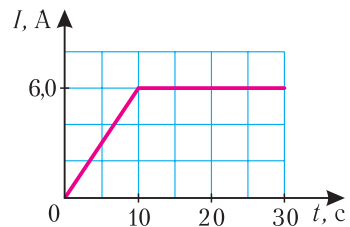
2. Пры раўнамерным змяненні сілы току ў шпулі на $\Delta I = -4,0$ А за прамежак часу $\Delta t = 0,10$ с у ёй узнікае ЭРС самаіндукцыі $\mathcal{E}_c = 20$ В. Вызначце індуктыўнасць шпулі.

3. Вызначце ЭРС самаіндукцыі, якая ўзнікае ў шпулі, індуктыўнасць якой $L = 1,2$ Гн, пры раўнамерным змяненні сілы току ад $I_1 = 2,0$ А да $I_2 = 6,0$ А за прамежак часу $\Delta t = 0,60$ с. Вызначце прырашчэнне энергіі магнітнага поля пры дадзенай змене сілы току.

4. На малюнку 188 прыведзены графік залежнасці сілы току ў шпулі, індуктыўнасць якой $L = 10$ мГн, ад часу. Вызначце ЭРС самаіндукцыі праз прамежкі часу $t_1 = 10$ с і $t_2 = 20$ с ад моманту пачатку адліку часу.

5. Сіла току ў шпулі раўнамерна паменшылася ад $I_1 = 10$ А да $I_2 = 5,0$ А. Пры гэтым энергія магнітнага поля змянілася на $\Delta W_M = -3,0$ Дж. Вызначце індуктыўнасць шпулі і першапачатковае значэнне энергіі магнітнага поля.

6. Вызначце ЭРС самаіндукцыі, што ўзнікае ў шпулі, індуктыўнасць якой $L = 0,12$ Гн, пры раўнамерным памяншэнні сілы току ад $I_1 = 8,0$ А, калі за прамежак часу $t_1 = 0,20$ с энергія магнітнага поля паменшылася ў $\alpha = 2,0$ раза.



Мал. 188



Абагульненне і сістэматызацыя ведаў

МАГНІТНАЕ

Магнітнае поле току

Модуль індукцыі магнітнага поля

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$$

Прынцып суперпазіцыі магнітных палёў

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

Напрамак індукцыі магнітнага поля \vec{B} :

- правіла свядзёлка;
- правіла правай рукі;
- правіла гадзіннікавай стрэлкі

Сіла, якой аднароднае магнітнае поле дзейнічае

на прамалінейны ўчастак
правадніка з токам.

Модуль: $F_A = B I \Delta l \sin \alpha$

Напрамак: правіла левай рукі:

калі левую руку размясціць так, каб перпендыкулярны да правадніка складнік індукцыі магнітнага поля ўваходзіў у далонь, чатыры выцягнутыя пальцы былі накіраваныя па току, то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак сілы Ампера, якая дзейнічае на прамалінейны ўчастак правадніка з токам

на зараджаную часціцу, якая рухаецца.

Модуль: $F_L = |q|vB \sin \alpha$.

Напрамак: правіла левай рукі:

калі левую руку размясціць так, каб складнік індукцыі магнітнага поля, перпендыкулярны скорасці руху зараду, уваходзіў у далонь, а чатыры пальцы былі накіраваныя па руху дадатнага зараду (супраць руху адмоўнага), то адагнуты на 90° у плоскасці далоні вялікі палец пакажа напрамак дзеючай на зарад сілы Лорэнца

ПОЛЕ

Электрамагнітная індукцыя

Магнітны паток

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Каэфіцыент самаіндукцыі
(індуктыўнасць)

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

Закон электрамагнітнай індукцыі

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Сіла індукцыйнага току

$$I_{\text{інд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{R}$$

ЭРС самаіндукцыі

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Напрамак
індукцыйнага току:
правіла Ленца

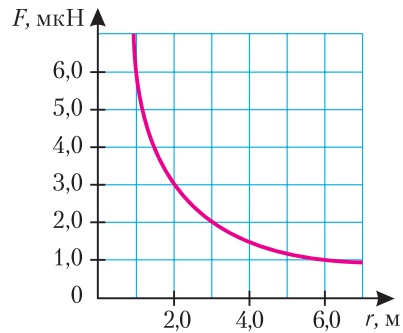
Энергія магнітнага поля контуру з токам

$$W_M = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$



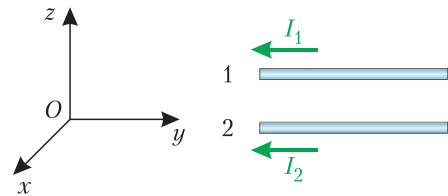
Заданні для самоконтролю

1. На малюнку 189 приведений графік залежності модуля сил магнітного взаємодіяння двох дощіг розміщаних паралельно один одному прамалінейних провідників, по яких проходять постійні електричні токи, адлегласці між ними. Визначте модуль сил магнітного взаємодіяння провідників, калі, не змінюючи сил току у провідниках, павялічте адлегласць між ними да $r = 10$ м, захаваюшы даўжыню прамалінейних паралельних участкаў нязменнай.



Мал. 189

2. Калі тонкія дощігі прамалінейных провідників 1 і 2, по яких проходять постійні електричні токи (мал. 190), паралельно один одному, то напрамак сили Ампера, што дзейнічае на провідник 1 з боку магнітного поля провідника 2:



Мал. 190

1) супадае з дадатным напрамкам восі z ;

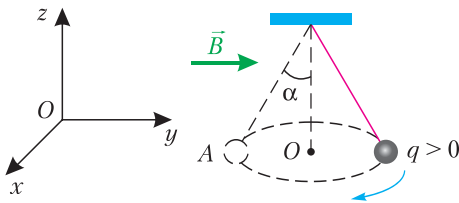
2) супрацьлеглы дадатнаму напрамку восі z ;

3) супадае з дадатным напрамкам восі y ;

4) супрацьлеглы дадатнаму напрамку восі y ;

5) супадае з дадатным напрамкам восі x .

3. Пры перамяшчэнні прамалінейнага участка провідніка на адлегласць $s = 17$ см перпендыкулярна лініям індукцыі аднароднага магнітнага поля знешняй сілай выканана работа $A = 38$ мДж. Модуль індукцыі аднароднага магнітнага поля $B = 0,56$ Тл, а сіла току ў провідніку $I = 4,0$ А. Визначце даўжыню участка провідніка, калі сілу току ў ім і скорасць яго руху падтрымлівалі пастаяннай.



Мал. 191

4. Маленькі дадатна заряджаны шарык, падвешаны на лёгкій нерасцяжній неправоднай нітцы, рухаецца па акружнасці ў гарызонтальнай плоскасці (мал. 191) у аднародным магнітным полі.

Як накіравана сіла Лорэнца, якая дзейнічае на шарык у момант праходжання ім пункта A :

- 1) супадае з дадатным напрамкам восі z ;
- 2) накіравана супрацьлегла дадатнаму напрамку восі z ;
- 3) супадае з дадатным напрамкам восі y ;
- 4) накіравана супрацьлегла дадатнаму напрамку восі y ;
- 5) супадае з дадатным напрамкам восі x ?

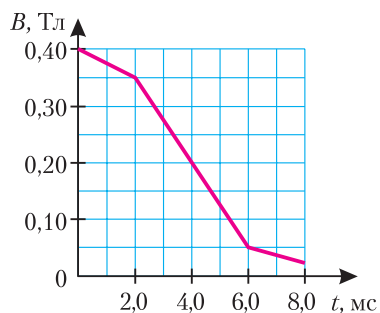
5. Дзве часціцы, масы якіх m_1 і $m_2 = \frac{m_1}{16}$, рухаюцца ў аднародным магнітным полі перпендыкулярна лініям магнітнай індукцыі. Кінетычныя энергіі часціц аднолькавыя, а суадносіны паміж радыусамі траекторый, якія апісваюць часціцы, $R_2 = 2R_1$. Вызначце адносіны модуляў зарадаў часціц.

6. Пратон улятае ў аднароднае магнітнае поле перпендыкулярна лініям магнітнай індукцыі. Вызначце, праз які прамежак часу напрамак скорасці руху пратона зменіцца на вугал $\alpha = 90^\circ$, калі модуль магнітнай індукцыі поля $B = 0,50$ мТл. Маса пратона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

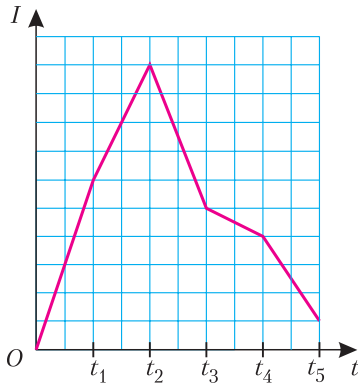
7. Вось саленоіда складае з індукцыяй аднароднага магнітнага поля вугал $\alpha = 30^\circ$. Плошча паверхні, абмежаванай кожным з $N = 100$ вітоў саленоіда, $S_1 = 12$ см². Вызначце ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў саленоідзе, калі модуль індукцыі магнітнага поля раўнамерна змяняецца са скорасцю $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 18 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$.

8. На малюнку 192 прыведзены графік залежнасці модуля індукцыі аднароднага магнітнага поля ад часу. Вызначце максімальнае значэнне ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў вітку, калі лініі індукцыі магнітнага поля перпендыкулярныя плоскасці вітка і плошча паверхні, абмежаванай вітком, $S = 24$ см².

9. Магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, вырабленым з правадніка, змяняецца з цягам часу па законе $\Phi = A - Ct$, дзе $A = 2,5$ Вб, $C = 0,20 \frac{\text{Вб}}{\text{с}}$. Вызначце сілу індукцыйнага току ў контуры, калі яго супраціўленне $R = 5,0$ Ом.



Мал. 192



Мал. 193

10. На малюнку 193 прыведзены графік залежнасці сілы току, які праходзіць па замкнутым праводным контуры з пастаяннай індуктыўнасцю, ад часу. Пакажыце інтэрвал часу, у межах якога значэнне модуля ЭРС самаіндукцыі $|\mathcal{E}_c|$ мінімальнае.

11. Сіла току ў контуры з пастаянным каэфіцыентам самаіндукцыі змяняецца з цягам часу па законе $I = C + Dt$, дзе $C = 5,0 \text{ A}$, $D = -1,0 \frac{\text{A}}{\text{с}}$. Вызначце магнітны паток у канцы чацвёртай секунды, калі ў момант пачатку адліку часу магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, $\Phi_0 = 85 \text{ мВб}$.

12. На працягу прамежку часу $\Delta t = 10 \text{ мс}$ сіла току ў шпулі індуктыўнасці раўнамерна ўзрастала ад $I_1 = 2,0 \text{ A}$ да $I_2 = 6,0 \text{ A}$. Пры гэтым у шпулі ўзнікала ЭРС самаіндукцыі $\mathcal{E}_c = -20 \text{ В}$. Вызначце ўласны магнітны паток у канцы працэсу нарастання сілы току.



РАЗДЗЕЛ 6

ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК У РОЗНЫХ АСЯРОДДЗЯХ

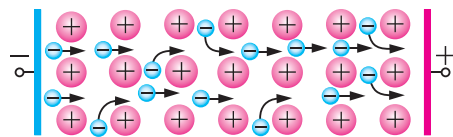
Пры вывучэнні электрычных з'яў неабходна ведаць, ці магчыма існаванне электрычнага току ў разгляданым рэчыве. Усе рэчывы падзяляюць на групы па іх электрычных уласцівасцях: праваднікі, паўправаднікі, дыэлектрикі. Чым гэтыя групы рэчываў адрозніваюцца адна ад адной? Як яны праводзяць электрычны ток?

Праваднікамі электрычнага току могуць быць рэчывы і ў цвёрдым, і ў вадкім, і ў газападобным станах. Вывучаючы дадзеную тэму, знойдзем адказы на наступныя пытанні: якія часціцы з'яўляюцца носьбітамі электрычнага зараду ў пэўным асяроддзі? Як залежыць электрычная праводнасць асяроддзя ад тэмпературы, выпраменьвання і іншых уздзеянняў? Якое тэхнічнае прымяненне электрычнага току ў розных асяроддзях?

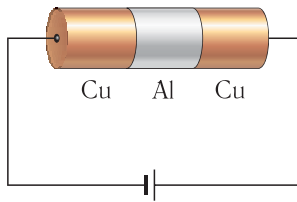
§ 34. Электрычны ток у металах. Звышправоднасць

Тыповымі прадстаўнікамі класа праваднікоў з'яўляюцца металы. Якая прырода электрычнага току ў металах?

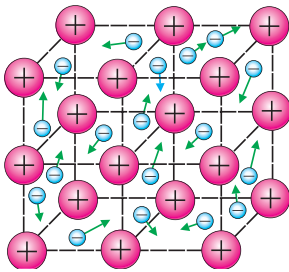
Прырода электрычнага току ў металах. У металічных правадніках носьбіты электрычнага зараду — свабодныя электроны. Пад дзеяннем знешняга электрычнага поля свабодныя электроны ўпарадкавана рухаюцца, ствараючы электрычны ток (мал. 194). Электронная праводнасць металаў была ўпершыню эксперыментальна пацверджана нямецкім фізікам К. Рыке (1845–1915) у 1901 г. Сутнасць доследу Рыке заключалася ў наступным: па правадніку, які складаўся з трох адпаліраваных і шчыльна прыціснутых адзін да аднаго цыліндраў — двух медных і аднаго



Мал. 194



Мал. 195



Мал. 196



алюмініевага (мал. 195), на працягу года праходзіў ток аднаго і таго напрамку. За гэты прамежак часу праз праваднік прайшоў зарад, большы за 3,5 МКл. Пасля завяршэння доследу ўзважванне паказала, што масы цыліндраў засталіся нязменнымі. Гэта з'явілася эксперыментальным доказам таго, што перанос зараду пры праходжанні току ў металах не суправаджаецца хімічнымі працэсамі і пераносам рэчыва, а ажыццяўляецца часціцамі, якія з'яўляюцца аднолькавымі для ўсіх металаў, гэта значыць электронамі.

Рэчывы, якія валодаюць электроннай праводнасцю, называюць *праваднікамі першага роду*.

У адпаведнасці з класічнай электроннай тэорыяй праводнасці металаў, створанай нямецкім фізікам П. Друдэ (1863–1906) у 1900 г., металічны праваднік можна разглядаць як фізічную сістэму, якая складаецца са свабодных электронаў і дадатна зараджаных іонаў, што вагаюцца каля становішчаў раўнавагі (мал. 196).

3 гісторыі фізікі

Пераканаўчы доказ электроннай прыроды току ў металах быў атрыманы ў доследах з праяўленнем інерцыі электронаў. Ідэя такіх доследаў і першыя вынікі (1913 г.) належалі рускім фізікам Л. І. Мандэльштаму (1879–1944) і М. Д. Папалексі (1880–1947).

У 1916 г. амерыканскія вучоныя Р. Толмен (1881–1948) і Т. Сцюарт (1890–1958) удасканалілі метадку гэтых доследаў і выканалі колькасныя вымярэнні, якія неабвержна даказалі, што ток у металічных правадніках абумоўлены рухам свабодных электронаў.

Залежнасць супраціўлення металаў ад тэмпературы. Пры вывучэнні фізікі ў 8-м класе вы даведаліся, што супраціўленне металічных праваднікоў залежыць ад роду рэчыва (удзельнага супраціўлення ρ) і іх геаметрычных памераў (даўжыні l і плошчы папярочнага сячэння S):

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

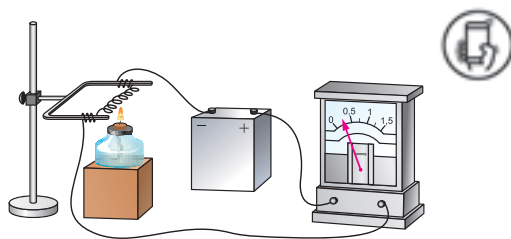
А ці залежыць супраціўленне ад тэмпературы правадніка?

Правядзём дослед. Збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, драцяной спіралі і гальванометра (мал. 197). З доследу вынікае, што пры награванні спіралі паказанні гальванометра памяншаюцца. Выснова відавочная: пры павелічэнні тэмпературы супраціўленне металаў павялічваецца.

Залежнасць супраціўлення металаў ад тэмпературы выкарыстоўваюць у спецыяльных прыборах — тэрмометрах супраціўлення (мал. 198).

Шырокае распаўсюджанне атрымалі тэрмометры супраціўлення з чыстых металаў, асабліва плаціны і медзі, якія канструкцыйна ўяўляюць з сябе металічны дрот, намотаны на цвёрды каркас (з кварцу, фарфору, слюды), змешчаны ў ахоўную абалонку (з металу, кварцу, фарфору, шкла) (мал. 199). Плацінавыя тэрмометры супраціўлення прымяняюць для вымярэння тэмпературы ў межах ад -263 да 1064 °С, медныя — ад -50 да 180 °С.

Звышправоднасць. Пры вельмі нізкіх тэмпературах супраціўленне некаторых металічных праваднікоў рэзка (скачком) памяншаецца да нуля. Упершыню гэта выявіў у 1911 г. нідэрландскі фізік Г. Камерлінг-Онэс (1853–1926). Ён эксперыментальным шляхам вызначыў, што пры тэмпературы $T \leq 4,12$ К (па сучасных вымярэннях $4,15$ К) электрычнае супраціўленне ртуці знікае. Пазней шматлікімі доследамі было пацверджана, што гэтая з’ява характэрна для многіх праваднікоў. Тэмпературу, пры якой электрычнае супраціўленне правадніка памяншаецца да нуля, называюць *крытычнай тэмпературай*. Стан правадніка пры гэтым называюць *звышправодным*, а сам праваднік — *звышправодніком*. Кожны звышправодны метал характарызуецца сваёй крытычнай тэмпературай. З’ява звышправоднасці ўласцівая не толькі некаторым металам, але і сплавам, паўправаднікам і палімерам.



Мал. 197



Мал. 198



Мал. 199

Калі ў звышправадніку стварыць электрычны ток, то ён будзе існаваць у ім неабмежавана доўга. Пры гэтым для падтрымання току няма неабходнасці ў крыніцы току. Гэта паказвае на перспектыву выкарыстання з'явы звышправоднасці ў працэсе перадачы электрычнай энергіі.

Звышправодныя злучэнні знайшлі прымяненне ў якасці матэрыялу абмотак электрамагнітаў для стварэння моцных магнітных палёў у магутных электрычных рухавіках, генераторах, паскаральніках і інш. Распрацоўваюць праекты звышправодных электронна-вылічальных машын. Ужо створаны кампактныя інтэгральныя схемы на звышправадніках, якія маюць шэраг пераваг у параўнанні з наяўнымі аналагамі.



Электрычны ток у металах уяўляе з сябе ўпарадкаваны рух свабодных электронаў

Металічны праваднік можна разглядаць як фізічную сістэму, якая складаецца са свабодных электронаў і дадатна зараджаных іонаў

З'яву, пры якой электрычнае супраціўленне правадніка памяншаецца да нуля, называюць звышправоднасцю, а сам праваднік — звышправадніком



1. Якая прырода электрычнага току ў металах?
2. Як было даказана, што носьбітамі электрычнага зараду ў металах з'яўляюцца электроны?
3. Як змяняецца супраціўленне металічнага правадніка пры павышэнні тэмпературы?
4. На якой уласцівасці праваднікоў заснавана дзеянне тэрмометра супраціўлення?
5. У чым праяўляецца з'ява звышправоднасці?



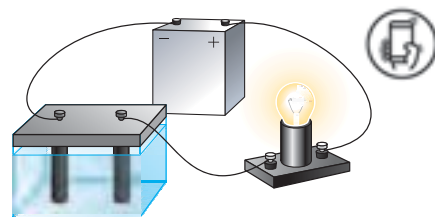
§ 35. Электрычны ток у электралітах

Пры вывучэнні папярэдняга параграфа вы даведаліся, што ў металах перанос зараду не суправаджаецца пераносам рэчыва, а носьбітамі свабодных зарадаў з'яўляюцца электроны. Але існуе клас праваднікоў, праходжанне электрычнага току ў якіх заўсёды суправаджаецца хімічнымі зменамі і пераносам рэчыва. Якая прырода электрычнага току ў такіх правадніках?

Прырода электрычнага току ў электралітах. З доследаў вынікае, што растворы многіх солей, кіслот і шчолачаў, а таксама расплавы солей і аксідаў металаў праводзяць электрычны ток, гэта значыць з'яўляюцца праваднікамі. Такія праваднікі назвалі *электралітамі*.

Электраліты — рэчывы, растворы або расплавы якіх праводзяць электрычны ток.

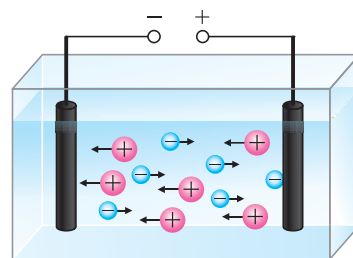
Правядзём дослед. Збяром электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, лямпы напальвання і ванны з дыстыляванай вадой, у якой знаходзяцца два вугальныя электроды. Пры замыканні ланцуга лямпа не свеціцца, значыць, дыстыляваная вада не праводзіць электрычны ток. Паўторым дослед, дадаўшы ў дыстыляваную ваду цукар. Лямпа не свеціцца і ў гэтым выпадку. Раствор цукру ў вадзе таксама не з'яўляецца правадніком. А цяпер дададзім у дыстыляваную ваду невялікую колькасць солі, напрыклад хларыду медзі(II) CuCl_2 . У ланцугу праходзіць электрычны ток, пра што наглядна сведчыць свечэнне лямпы (мал. 200). Такім чынам, раствор солі ў вадзе з'яўляецца правадніком электрычнага току, гэта значыць пры растварэнні хларыду медзі(II) у дыстыляванай вадзе з'явіліся свабодныя носьбіты электрычнага зараду.



Мал. 200

Вывучаючы хімію, вы даведаліся, што пры растварэнні солей, кіслот і шчолачаў у вадзе адбываецца электралітычная дысацыяцыя, гэта значыць распад малекул электраліту на іоны. У праведзеным доследзе хларыд медзі(II) CuCl_2 у водным растворе дысацыіруе на дадатна зараджаныя іоны медзі Cu^{2+} і адмоўна зараджаныя іоны хлору Cl^- .

Іоны Cu^{2+} і Cl^- у растворе пры адсутнасці электрычнага поля рухаюцца хаатычна. Пад дзеяннем знешняга электрычнага поля на хаатычны рух іонаў накладваецца іх накіраваны рух (мал. 201). Пры гэтым дадатна зараджаныя іоны Cu^{2+} рухаюцца да катода (электрода, які падключаны да адмоўнага полюса крыніцы току), адмоўна зараджаныя іоны Cl^- — да анода (электрода, які падключаны да дадатнага полюса крыніцы току). На анодзе будзе адбывацца працэс акіслення іонаў Cl^- да атамаў. Атамы ўтвараюць малекулы хлору, якія выдзяляюцца на анодзе. На катодзе будзе адбывацца працэс аднаўлення іонаў Cu^{2+} да атамаў і асаджэнне медзі. Гэтую з'яву называюць *электrolізам*.



Мал. 201

Электrolіз — працэс выдзялення на электродах рэчыва, звязаны з акісляльна-аднаўленчымі рэакцыямі, якія адбываюцца пры праходжанні электрычнага току праз раствору (расплавы) электралітаў.

Такім чынам, свабодныя носьбіты электрычнага зараду ў электралітах — дадатна і адмоўна зараджаныя іоны, якія ўтвараюцца ў выніку электралітычнай дысацыяцыі, а праводнасць электралітаў з'яўляецца іоннай. Электраліты адносяцца да *праводнікоў другога роду*.

Ад тэорыі да практыкі

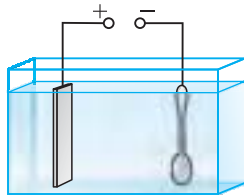
Чаму небяспечна дакранацца голымі рукамі да неізаляваных металічных праводоў, па якіх праходзіць электрычны ток?



Тэхнічнае прымяненне электrolізу. Электrolіз знайшоў розныя прымяненні ў прамысловасці. Разгледзім некаторыя з іх.

1. Нанясенне ахоўных і дэкаратыўных пакрыццяў на металічныя вырабы (гальванастэгія).

Каб засцерагчы металы ад акіслення, а таксама надаць вырабам трываласць і палепшыць знешні выгляд, іх пакрываюць тонкім слоем высакародных металаў (золата, серабра) або малаакісляльнымі металамі (хромам, нікелем).



Мал. 202

Прадмет, які падлягае гальванічнаму пакрыццю, напрыклад лыжку (мал. 202), апускаюць у якасці катода ў электралітычную ванну. Электралітам з'яўляецца раствор солі металу, якім ажыццяўляецца пакрыццё. Анодам служыць пласціна з таго ж металу. Праз электралітычную ванну на працягу пэўнага прамежку часу прапускаюць электрычны ток, і лыжка пакрываецца слоем металу патрэбнай таўшчыні. Для больш раўнамернага пакрыцця лыжкі яе неабходна змясціць паміж дзвюма ці больш аноднымі пласцінамі. Пасля пакрыцця лыжку вымаюць з ванны, сушаць і паліруюць.

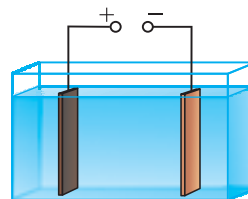
2. Выраб металічных копій з рэльефных мадэлей (гальванопластыка).

Для атрымання копій прадметаў (манет, медалёў, барэльефаў і інш.) робяць злёпкі з якога-небудзь пластычнага матэрыялу (напрыклад, воску). Для надання злёпку электраправоднасці яго пакрываюць графітавым пылам, апускаюць у электралітычную ванну ў якасці катода і атрымліваюць на ім слой металу патрэбнай таўшчыні. Затым шляхам награвання выдаляюць воск.

Працэс гальванопластыкі быў распрацаваны ў 1836 г. рускім акадэмікам Б. С. Якобі (1801–1874).

3. Атрыманне металаў з расплаўленых руд і іх ачыстка, электрахімічная апрацоўка металаў.

Працэс ачыскі металаў адбываецца ў электралітычнай ванне. Анодам служыць метал, які падлягае ачыстцы, катодам — тонкая пласціна з чыстага металу, а электралітам — раствор солі дадзенага металу. Напрыклад, пласціну з неачышчанай медзі змяшчаюць у якасці анода ў ванну з растворам меднага купарвасу, дзе катодам з’яўляецца ліст чыстай медзі (мал. 203). У забруджаных металах могуць утрымлівацца каштоўныя прымесі. Так, медзь часта змяшчае нікель і серабро. Пры прапусканні праз ванну электрычнага току медзь з анода пераходзіць у раствор, з раствора на катодзе выдзяляецца чыстая медзь, а прымесі выпадаюць у выглядзе асадку або пераходзяць у раствор.



Мал. 203



Электраліты — рэчывы, растворы або расплавы якіх праводзяць электрычны ток

Электрычны ток у электралітах уяўляе з сябе ўпарадкаваны рух іонаў, якія ўтвараюцца ў выніку электралітычнай дысацыяцыі растваранага рэчыва

Электrolіз — працэс выдзялення на электродах рэчыва, звязаны з акісляльна-аднаўленчымі рэакцыямі, якія адбываюцца пры праходжанні электрычнага току праз растворы (расплавы) электралітаў

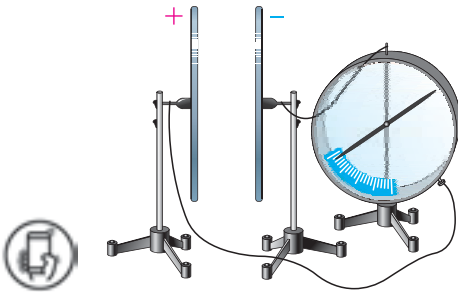


1. Што называюць электралітам?
2. Якая прырода электрычнага току ў электралітах?
3. Які працэс называюць электrolізам?
4. Прывядзіце прыклады прымянення электrolізу.

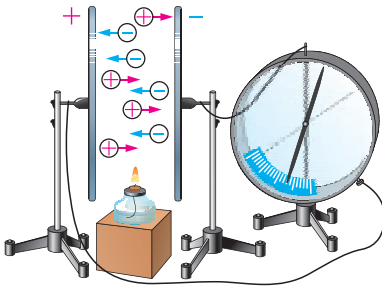


§ 36. Электрычны ток у газах. Плазма

Газы пры нармальных умовах не праводзяць электрычны ток, гэта значыць з'яўляюцца дыэлектрыкамі. Гэта абумоўлена тым, што газы складаюцца з нейтральных атамаў (малекул). Аднак пры пэўных умовах газы, у тым ліку і паветра, становяцца праваднікамі. Пры якіх умовах гэта магчыма?



Мал. 204



Мал. 205

Для адрыву электрона ад атама (малекулы) неабходна энергія, мінімальнае значэнне якой называюць *энергіяй іанізацыі* атама (малекулы). Разам з іанізацыяй можа адбывацца далучэнне ўтвораных пры адрыве электронаў да нейтральных атамаў (малекул) газу. Гэта прыводзіць да ўтварэння адмоўна зараджаных іонаў.

Прырода электрычнага току ў газах. Праведзём дослед і пераканаемся, што электрычная праводнасць газу (паветра) можа змяняцца. Два металічныя дыскі, зараджаныя рознаіменнымі зарадамі і размешчаныя на пэўнай адлегласці адзін ад аднаго, злучым з электрометрам (мал. 204). Стрэлка электрометра пры гэтым адхіліцца на некаторы вугал. Электрометр не разраджаецца, значыць, пры невялікай рознасці патэнцыялаў паміж дыскамі паветра не праводзіць электрычны ток.

Паўтोरым дослед, награвваючы полымем (спіртоўкі, свечкі) паветраны прамежак паміж дыскамі. Электрометр разраджаецца, значыць, праз паветра праходзіць электрычны ток (мал. 205).

Выснова відавочная: у паветраным прамежку паміж дыскамі з'явіліся свабодныя носьбіты электрычнага зараду.

Калі прыбраць полымя, то электрычны ток знікне, і паветра паміж дыскамі зноў стане дыэлектрыкам.

Растлумачым вынікі разгледжанага доследу. Награванне газу полымем прыводзіць да ўзнікнення свабодных электронаў і дадатна зараджаных іонаў, гэта значыць да *іанізацыі газу*.

Пад дзеяннем электрычнага поля ў газе ўзнікае накіраваны рух дадатна зараджаных іонаў да адмоўнага электрода (катода) і накіраваны рух электронаў і адмоўна зараджаных іонаў да дадатнага электрода (анода). У іанізаваным газе ўзнікае электрычны ток, які называюць *газавым разрадам*.

Такім чынам, носьбіты электрычнага зараду ў іанізаваных газах — дадатна і адмоўна зараджаныя іоны і свабодныя электроны, а праводнасць газу з'яўляецца іонна-электроннай.

Калі ліквідаваць знешняе ўздзеянне (у дадзеным выпадку награванне полымем), электрычны ток у газе знікае. Гэта абумоўлена тым, што пры сутыкненні дадатна зараджанага іона з электронам яны ўтвараюць нейтральны атам (малекулу) газу. Іоны супрацьлеглых знакаў пры сутыкненні таксама ператвараюцца ў нейтральныя атамы (малекулы) — рэкамбінуюць. Пры рэкамбінацыі вызваляецца энергія, роўная энергіі, затрачанай на іанізацыю.

Такім чынам, каб у газе з'явіліся свабодныя носьбіты электрычнага зараду, яго атамы (малекулы) неабходна іанізаваць. Гэта можна ажыццявіць награваннем газу да высокай тэмпературы, уздзеяннем на газ ультрафіялетавым, рэнтгенаўскім, радыёактыўным выпраменьваннямі і інш.

Знешнія ўздзеянні, у выніку якіх адбываецца іанізацыя, называюць *іанізатарамі*. Разрад, які ўзнікае ў выніку іанізацыі газу пад уздзеяннем іанізатара, называюць *несамастойным*.

Аднак пры пэўных умовах газавы разрад можа існаваць і пасля спынення дзеяння іанізатара. У гэтым выпадку моцнае электрычнае поле, што існуе паміж электродамі, з'яўляецца прычынай захавання газавога разраду, які называюць *самастойным*.

Віды самастойнага газавога разраду і іх прымяненне. У залежнасці ад напружанасці электрычнага поля, ціску газу, формы і рэчыва электродаў адрозніваюць наступныя віды самастойнага газавога разраду: тлеючы, дугавы, каронны і іскравы.

Тлеючы разрад характарызуецца невялікай сілай току (дзясяткі міліампер), адносна высокім напружаннем (дзясяткі і сотні вольт), нізкім ціскам газу (дзясятыя долі міліметра ртутнага слупка). Тлеючы разрад шырока выкарыстоўваюць у розных газасветлавых трубках (мал. 206), якія прымяняюцца для светлавой рэкламы і дэкарацый, лямпах дзённага святла (мал. 207), неонавых лямпах.



Мал. 206





Мал. 207



Мал. 208



Мал. 209



Мал. 210

Дугавы разрад уяўляе з сябе слуп газу, які ярка свеціцца (мал. 208). Ён характарызуецца вялікай сілай току (дзясяткі і сотні ампер) і параўнальна невялікім напружаннем (некалькі дзясяткаў вольт). Дугавы разрад з'яўляецца магутнай крыніцай святла. Яго выкарыстоўваюць у асвятляльных прыборах, для зваркі і рэзкі металаў (мал. 209), электролізу расплаваў, для плаўкі сталі ў прамысловых электрапечах і інш.

Цікава ведаць

У 1802 г. прафесар фізікі Пецярбургскай медыка-хімічнай акадэміі В. У. Пятроў атрымаў электрычную дугу. Ён выявіў, што калі далучыць да полюсаў вялікай электрычнай батарэі два кавалачкі драўнянага вугалю, прывесці іх у судакрананне, а затым трохі расунуць на невялікую адлегласць, то паміж канцамі вуглёў утворыцца яркае полымя, а самі канцы вуглёў распляцца дабярэ, выпускаючы асяпляльнае святло (электрычная дуга). Упершыню электрычная дуга была выкарыстана ў 1876 г. рускім інжынерам П. М. Яблчкавым для вулічнага асвятлення.

Каронны разрад узнікае паблізу завостранай часткі правадніка пры атмасферным ціску пад дзеяннем вельмі неаднароднага электрычнага поля. Ён суправаджаецца слабым свячэннем, якое нагадвае карону, і характэрным патрэскваннем (мал. 210).

Каронны разрад выкарыстоўваюць у электрафільтрах для ачысткі прамысловых газаў ад цвёрдых і вадкіх прымесей. Аднак узнікненне кароннага разраду вакол высакавольтных ліній электраперадачы непажаданае, бо прыводзіць да страт электрычнай энергіі.

Цікава ведаць

Часта перад навальніцай, падчас шторму ці снежнай буры ў атмасферы рэзка ўзрастае напружанасць электрычнага поля. Гэта прыводзіць да ўзнікнення слабога свячэння вакол завостраных прадметаў, напрыклад паблізу карабельных мачтаў, шпіляў на будынках і інш. (мал. 211). Бывалыя маракі часта назіралі гэтую з’яву (каронны разрад) і далі ёй назву «агні святога Эльма». Адзін з удзельнікаў кругасветнага плавання Магелана пісаў: «Падчас тых штормаў нам шмат разоў з’яўляўся сам святы Эльм у выглядзе святла... надзвычай цёмнымі начамі на грот-мачце, дзе заставаўся на працягу дзвюх і больш гадзін, пазбаўляючы нас ад суму».



Мал. 211

Іскры разрад назіраюць пры высокім напружанні (мал. 212). Ён суправаджаецца яркім свячэннем газу, гукавым эфектам, які ствараецца рэзкім павышэннем ціску паветра. Прыкладам іскрывага разраду ў прыродзе з’яўляецца маланка (мал. 213).



Мал. 212



Мал. 213

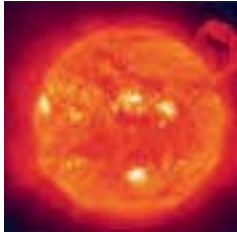
Цікава ведаць

Перад з’яўленнем маланкі напружанне паміж воблакам і паверхняй Зямлі дасягае $U \sim 10^8 - 10^9$ В. Сіла току ў маланцы складае $I \sim 10^5$ А, працягласць разраду маланкі — $t \sim 10^{-6}$ с, дыяметр светлага канала — $d \sim 10 - 20$ см. Звілісты выгляд маланкі тлумачыцца тым, што электрычны разрад праходзіць праз участкі паветра, якія маюць найменшае супраціўленне. А такія ўчасткі размешчаны ў паветры выпадковым чынам.

Плазма. Пры даволі высокай тэмпературы любое рэчыва выпараецца і ператвараецца ў газ. Пры далейшым павелічэнні тэмпературы ўзмацняецца тэрмічная іанізацыя. Нейтральныя малекулы газу распадаюцца на складнікі — атамы, якія потым ператвараюцца ў іоны. Акрамя таго, іанізацыя газу можа быць абумоўлена яго ўзаемадзеяннем з электрамагнітным выпраменьваннем (фотаіанізацыя) або бамбардзіроўкай газу зараджанымі часціцамі (напрыклад, іанізацыя электронным ударам).

Плазма — цалкам або часткова іанізаваны газ, у якім канцэнтрацыі дадатных і адмоўных зарадаў практычна супадаюць, гэта значыць модулі сярэдніх шчыльнасцей дадатных ρ_+ і адмоўных ρ_- зарадаў аднолькавыя: $\rho_+ = |\rho_-|$.

У залежнасці ад ступені іанізацыі адрозніваюць часткова іанізаваную і цалкам іанізаваную плазму. У залежнасці ад скорасці цеплавога руху зараджаных часціц плазму падзяляюць на нізкатэмпературную



Мал. 214

($< 10^5$ К) і высокатэмпературную ($> 10^6$ К). Прыкладам нізкатэмпературнай плазмы з'яўляецца плазма, якая ўтвараецца пры ўсіх відах электрычнага разраду ў газах. Зоркі ўяўляюць з сябе гіганцкія згусткі высокатэмпературнай плазмы.

Плазма запаўняе касмічную прастору паміж зоркамі і галактыкамі і з'яўляецца самым распаўсюджаным станам рэчыва ў Сусвеце (мал. 214). Канцэнтрацыя плазмы ў міжгалактычнай прасторы вельмі малая, у сярэднім адна часціца на кубічны метр. Верхні слой атмасферы Зямлі таксама ўяўляе з сябе слаба іанізаваную плазму. Прычынай іанізацыі з'яўляюцца ультрафіялетавае і рэнтгенаўскае выпраменьванне Сонца і іншых зорак, хуткія зараджаныя часціцы і інш.

Незалежна ад спосабу атрымання плазма ў цэлым з'яўляецца электрычна нейтральнай. Праводнасць плазмы ўзрастае з павелічэннем адносіны колькасці іанізаваных атамаў (малекул) да іх агульнай колькасці. Цалкам іанізаваная плазма па сваёй праводнасці набліжаецца да звышправоднікоў.



Носьбітамі электрычнага зараду ў іанізаваных газах з'яўляюцца дадатна і адмоўна зараджаныя іоны і свабодныя электроны

Газавы разрад — праходжанне электрычнага току праз іанізаваны газ

Плазма — цалкам або часткова іанізаваны газ, у якім канцэнтрацыі дадатных і адмоўных зарадаў практычна супадаюць, гэта значыць модулі сярэдніх шчыльнасцей дадатных ρ_+ і адмоўных ρ_- зарадаў аднолькавыя: $\rho_+ = |\rho_-|$



1. Якая прырода электрычнага току ў газах?
2. Як можна павялічыць электрычную праводнасць газу?
3. Які разрад называюць самастойным?
4. Які разрад называюць самастойным?
5. Якія віды самастойнага разраду вы ведаеце? Прывядзіце прыклады іх выкарыстання.
6. Што такое плазма? Як яе можна атрымаць?

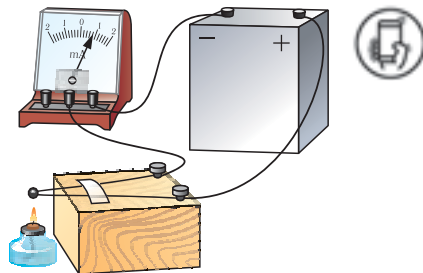


§ 37. Электрычны ток у паўправадніках. Уласная і прымесная праводнасці паўправаднікоў

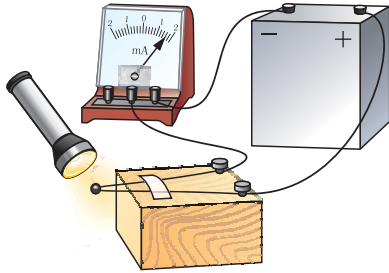
Паўправаднікі — вялікі клас як неарганічных, так і арганічных рэчываў у цвёрдым або вадкім стане. Паўправаднікі валодаюць шматлікімі выдатнымі ўласцівасцямі, дзякуючы якім яны знайшлі шырокае прымяненне ў розных галінах навукі і тэхнікі. Якія асаблівасці будовы паўправаднікоў?

Залежнасць супраціўлення паўправаднікоў ад тэмпературы і асветленасці. Удзельнае супраціўленне паўправаднікоў знаходзіцца ў межах ад 10^{-6} да 10^8 Ом·м (пры $T = 300$ К), гэта значыць яно ў шмат разоў меншае, чым у дыэлектрыкаў, але істотна большае, чым у металаў. У адрозненне ад праваднікоў удзельнае супраціўленне паўправаднікоў істотна змяншаецца пры павелічэнні тэмпературы, а таксама змяняецца пры змене асветлення і ўвядзенні параўнальна невялікай колькасці прымесей. Да паўправаднікоў адносяць шэраг хімічных элементаў (бор, вуглярод, крэмній, германій, фосфар, мыш'як, сурму, серу, селен, тэлур і інш.), мноства аксідаў і сульфідаў металаў, а таксама іншых хімічных злучэнняў.

Вывучыць уласцівасці паўправаднікоў можна шляхам доследаў. Зборам электрычны ланцуг, які складаецца з крыніцы току, паўправадніка і міліамперметра (мал. 215). З доследу вынікае,



Мал. 215



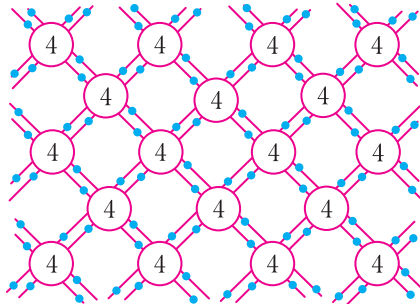
Мал. 216

Такім чынам, зменшыць супраціўленне паўправадніка можна, або награвваючы яго, або ўздзейнічаючы электрамагнітным выпраменьваннем, напрыклад асвятляючы яго паверхню.

Прырода электрычнага току ў паўправадніках. Эксперыментальна ўстаноўлена, што пры праходжанні электрычнага току ў паўправадніках, як і ў металах, ніякіх хімічных змяненняў не адбываецца, гэта значыць перанос зараду пры праходжанні току не суправаджаецца пераносам рэчывы. Гэта сведчыць пра тое, што свабоднымі носьбітамі электрычнага зараду ў паўправадніках, як і ў металах, з'яўляюцца электроны.

Разгледзім механізм праводнасці паўправаднікоў на прыкладзе крышталя германію Ge, валентнасць атамаў якога роўная чатыром.

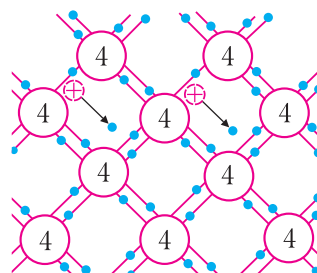
Атамы германію на знешняй абалонцы маюць чатыры валентныя электроны, параўнальна слаба звязаныя з ядром. Пры гэтым кожны атам крышталя звязаны з чатырма суседнімі атамамі кавалентнымі сувязямі. Два суседнія атамы аб'ядноўваюць два свае валентныя электроны (па адным ад кожнага атама), якія ўтвараюць электронную пару. Таму ўсе валентныя электроны атама германію ўдзельнічаюць ва ўтварэнні кавалентных сувязей. На малюнку 217 паказана плоская схема прасторавай рашоткі крышталю германію. Пры тэмпературы, блізкай да абсалютнага нуля, кавалентныя сувязі германію дастаткова трывалыя, таму свабодныя электроны адсутнічаюць і германій з'яўляецца дыэлектрыкам.



Мал. 217

Для таго каб разарваць кавалентную сувязь і зрабіць электрон свабодным, крышталю германію неабходна перадаць некаторую энергію, напрыклад нагрываючы крышталі або апраменьваючы яго паверхню. Пры гэтым частка электронаў атрымлівае энергію, дастатковую для таго, каб пакінуць атамы і стаць свабоднымі.

Нейтральны атам, якому належаў вызвалены электрон, становіцца дадатна зараджаным іонам, а ў кавалентных сувязях утвараецца вакантнае месца з адсутным электронам. Яго называюць *дзіркай* (мал. 218).



Мал. 218

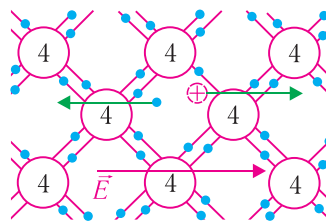


Цікава ведаць

Дзірачная праводнасць абумоўлена «эстафетным» перамяшчэннем па вакансіях ад аднаго атома крышталю паўправадніка да другога электронаў, якія ажыццяўляюць кавалентную сувязь. Дзірак як дадатных зарадаў, якія існуюць рэальна, на самай справе няма. Тым не менш уяўленне пра іх з'яўляецца добрай фізічнай мадэллю, якая дае магчымасць разглядаць электрычны ток у паўправадніках на аснове законаў фізікі.

Дзіркі лічаць рухомымі носьбітамі дадатнага зараду, модуль якога роўны модулю зараду электрона.

Пры наяўнасці знешняга электрычнага поля на хаатычны рух свабодных электронаў і дзірак накладваецца іх упарадкаваны рух, гэта значыць узнікае электрычны ток. Прычым рух свабодных электронаў адбываецца ў напрамку, супрацьлеглым напрамку напружанасці \vec{E} знешняга электрычнага поля, а рух дзірак супадае з напрамкам напружанасці \vec{E} поля (мал. 219).



Мал. 219

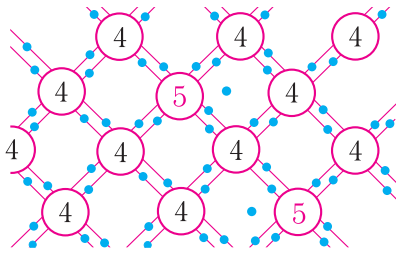
Праводнасць, абумоўленую рухам свабодных электронаў і дзірак у чыстым паўправадніку, называюць *уласнай праводнасцю* паўправадніка.

Прымесная праводнасць паўправаднікоў. Змяніць уласцівасці паўправаднікоў можна не толькі нагрываннем або ўздзеяннем электрамагнітнага



выпраменьвання, але і дабаўленнем у чысты паўправаднік прымесей. Тады ў паўправадніку разам з уласнай праводнасцю ўзнікае прымесная праводнасць.

Праводнасць, абумоўленую наяўнасцю прымесей у паўправадніку, называюць *прымеснай праводнасцю* паўправадніка.

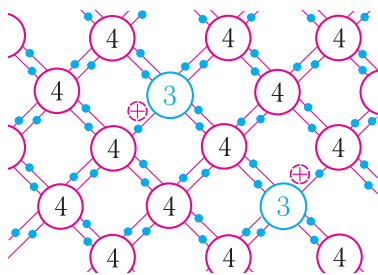


Мал. 220

электронны ў металічным правадніку. Праводнасць такога крышталю будзе пераважна электроннай. Дзіркі, якія ўтвараюцца ў выніку разрыву асобных кавалентных сувязей паміж атамамі германію, з'яўляюцца неасноўнымі носьбітамі электрычнага зараду, бо іх канцэнтрацыя малая ў параўнанні з канцэнтрацыяй свабодных электронаў. Такія паўправаднікі называюць *электроннымі паўправаднікамі* або *паўправаднікамі n-тыпу* (ад лац. *negativus* — адмоўны).



Цяпер разгледзім механізм прымеснай праводнасці паўправадніка на прыкладзе крышталю германію Ge, які змяшчае прымесь атамаў індыею In, валентнасць якіх роўная тром.



Мал. 221

Разгледзім механізм гэтай праводнасці на прыкладзе крышталю германію Ge, які змяшчае прымесь атамаў мыш'яку As, валентнасць якіх роўная пяці.

Чатыры валентныя электроны атама мыш'яку ўтвараюць кавалентныя сувязі з суседнімі атамамі германію (мал. 220). Пятыя электроны атамаў мыш'яку не задзейнічаны ва ўтварэнні кавалентных сувязей і могуць свабодна перамяшчацца, амаль як

валентныя электроны атама індыею ўтвараюць кавалентныя сувязі толькі з трыма суседнімі атамамі германію (мал. 221). На ўтварэнне сувязі з чацвёртым атамам германію ў атама індыею электрона няма. Таму кожнага атама індыею адна з кавалентных сувязей будзе незапоўненая, гэта значыць узнікае дзірка. Электрон, якога не хапае, можа быць захоплены атамам індыею з кавалентнай сувязі суседніх атамаў германію. Тады дзірка ўтвораецца на тым месцы, дзе да гэтага знаходзіўся электрон.

У выніку ўвядзення такой прымесі ў крышталі разрываецца мноства кавалентных сувязей і ўтвараюцца дзіркі. Праводнасць такога крыштала будзе пераважна дзірачная. Свабодныя электроны, якія ўзнікаюць за кошт уласнай праводнасці паўправадніка, з'яўляюцца неасноўнымі носьбітамі электрычнага зараду, бо іх канцэнтрацыя малая ў параўнанні з канцэнтрацыяй дзірак. Такія паўправаднікі называюць *дзірачнымі паўправаднікамі* або *паўправаднікамі p-тыпу* (ад лац. *positivus* — дадатны).



Ад тэорыі да практыкі

Якой праводнасцю будзе валодаць германій пры ўвядзенні ў яго невялікай колькасці фосфару? галію? сурмы?



Тэхнічнае прымяненне паўправаднікоў. Прыборы, работа якіх заснавана на ўласцівасці паўправаднікоў змяняць сваё супраціўленне пры змяненні тэмпературы, называюць *тэрмістарамі* або *тэрмарэзістарамі*.

Тэрмарэзістары (мал. 222) выкарыстоўваюць для аховы тэлефонных станцый і ліній ад токавых перагрузак, для пускаахоўных рэле кампрэсараў халадзільнікаў, запальвання люмінесцэнтных лямпаў, падагрэву дызельнага паліва; у розных электранагравальных прыладах: награвальных рашотках цеплаветылятараў, сушылках для абутку.

Прыборы, работа якіх заснавана на ўласцівасці паўправаднікоў змяняць сваё супраціўленне пры змене асветленасці іх паверхні, называюць *фотарэзістарамі* або *фотасупраціўленнямі* (мал. 223). Іх выкарыстоўваюць для рэгістрацыі слабых патокаў святла, пры сартаванні і падліку гатовай прадукцыі, для кантролю якасці і гатоўнасці самых розных дэталяў; у паліграфічнай прамысловасці для выяўлення абрываў папяровай стужкі, кантролю за колькасцю аркушаў паперы, якія падаюцца ў друкарскую машыну; у медыцыне, сельскай гаспадарцы і іншых галінах.

Шырокае прымяненне знаходзяць паўправадніковыя дыёды, якія з'яўляюцца асноўнымі элементамі выпрамнікоў пераменнага току і дэтэктараў электрамагнітных сігналаў. З дапамогай



Мал. 222



Мал. 223

паўправадніковых дыёдаў можна ажыццявіць непасрэднае ператварэнне энергіі электрамагнітнага выпраменьвання ў электрычную энергію. Такія дыёды называюць фотадыёдамі (мал. 224).

У электрычных прыладах (схемах) выкарыстоўваюць транзістар — прыбор, прызначаны для ўзмацнення, генерацыі, пераўтварэння і камутацыі сігналаў у электрычных ланцугах.

Святловыпраменьваючы дыёд (святлодыёд) — гэта паўправадніковы прыбор, які пераўтварае электрычную энергію непасрэдна ў светлавае выпраменьванне. Ён уяўляе з сябе мініяцюрны паўправадніковы дыёд, змешчаны ў празрысты корпус (мал. 225). Выкарыстоўваючы святлодыёды, вырабляюць, напрыклад, святлодыёдныя святільнікі (мал. 226).



Мал. 224



Мал. 225

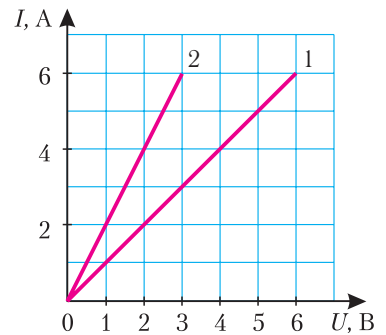


Мал. 226

Ад тэорыі да практыкі

1. Для сартавання і падліку дэталей шырока прымяняюць фотарэзістары. Якой уласцівасцю паўправаднікоў можна растлумачыць дзеянне гэтага прыбора?

2. На малюнку 227 прыведзены графікі залежнасці сілы току ад напружання для тэрмарэзістара. Які з графікаў адпавядае найбольш нізкай тэмпературы тэрмарэзістара? Вызначце супраціўленне тэрмарэзістара пры найбольш высокай тэмпературы.



Мал. 227

3 гісторыі фізікі

У 2000 г. урадзэнцу Беларусі Жарэсу Іванавічу Алфёрававу (1930–2019) і разам з ім амерыканскім вучоным Герберту Крэмеру і Джэку Кілбі была прысуджана Нобелеўская прэмія па фізіцы за «даследаванне паўправадніковых гетэраструктур, лазерных дыёдаў і звышхуткіх транзістараў».



Электрычны ток у паўправадніках уяўляе з сябе ўпарадкаваны рух свабодных электронаў і дзірак

Праводнасць паўправадніка

Уласная: абумоўлена рухам свабодных электронаў і дзірак у чыстым паўправадніку

Прымесная: абумоўлена наяўнасцю прымесей у паўправадніку

Прымесі пастаўляюць свабодныя электроны без узнікнення роўнай ім колькасці дзірак (электронныя паўправаднікі, або паўправаднікі *n*-тыпу)

Прымесі прыводзяць да ўтварэння дзірак без павелічэння колькасці свабодных электронаў (дзірачныя паўправаднікі, або паўправаднікі *p*-тыпу)



1. Якая будова паўправаднікоў (на прыкладзе крышталю германію)?
2. Якая прырода электрычнага току ў паўправадніках?
3. Растлумачце механізм уласнай праводнасці паўправаднікоў.
4. Як залежыць супраціўленне паўправаднікоў ад тэмпературы? ад асветленасці?
5. Што называюць прымеснай праводнасцю паўправаднікоў?
6. Пры якой умове ў прымесным паўправадніку ўзнікае электронная праводнасць? Прывядзіце прыклады.
7. Пры якой умове ў прымесным паўправадніку ўзнікае дзірачная праводнасць? Прывядзіце прыклады.
8. Прывядзіце прыклады выкарыстання паўправадніковых прыбораў.



Абагульненне і сістэматызацыя ведаў

ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК У РОЗНЫХ АСЯРОДДЗЯХ

	Носьбіты электрычнага зараду	Утварэнне носьбітаў зараду	Прымяненне
Металы	Электронны	Узаемадзеянне электронаў, якія знаходзяцца на знешніх абалонках атамаў, не толькі з ядрамі сваіх атамаў, але і з ядрамі суседніх атамаў	Тэрмометры супраціўлення, лініі перадачы электрычнай энергіі, абмотка электрамагніта ў электрычных рухавіках, генератарах, паскаральніках і інш., інтэгральныя схемы
Электраліты	Дадатна і адмоўна зараджаныя іоны	Распад малекул электраліту ў расплаве або водным раствору на іоны (электралітычная дысацыяцыя)	Гальванастэгія, гальванопластыка, атрыманне металаў з расплаўленых руд і іх ачыстка, электрахімічная апрацоўка металаў
Газы	Дадатна і адмоўна зараджаныя іоны, электроны	Страта атамамі (малекуламі) электронаў у выніку награвання, апраменьвання і далучэнне некаторых утвораных пры адрыве электронаў да першапачаткова нейтральных атамаў (малекул) газу	Газасветлавыя трубка, лямпы дзённага святла, неонавыя лямпы, зварка і рэзка металаў, электроліз расплаваў, плаўленне сталі ў прамысловых электрапечах, электрафільтры
Паўправоднікі	Электронны, дзіркі	Разрыў кавалентных сувязей паміж атамамі ў выніку награвання, апраменьвання, уздзеяння знешніх электрычных і магнітных палёў	Фотарэзістары, тэрмарэзістары, дыёды, транзістары, фотадыёды, святлодыёды

Тэмы праектных заданняў да часткі «Электрадынаміка»

1. Прырода статычнай электрычнасці і яе прымяненне.
2. Роля статычнай электрычнасці ў жывой прыродзе.
3. Статычная электрычнасць у нашым жыцці. Абарона ад статычнай электрычнасці.
4. Віды кандэнсатараў і іх прымяненне.
5. Выкарыстанне чалавекам электрычнай энергіі і эфектыўныя спосабы яе зберажэння.
6. Лячэбнае прымяненне электрычнага току ў медыцыне.
7. Прырода маланкі. Небяспека і абарона.
8. Ад лампачкі Эдысана да святлодыёднай лампы.
9. Крыніцы электрычнага току ў жыцці чалавека.
10. Уплыў магнітнага поля Зямлі на жыццё і здароўе чалавека.
11. Дзеянне электрамагнітных палёў на жывыя арганізмы.
12. Электрамагніт: прыцып дзеяння і прымяненне.

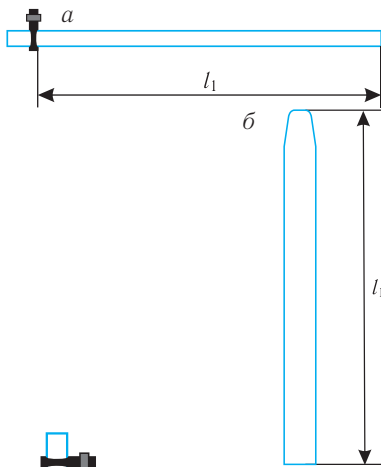
ЛАБАРАТОРНЫ ЭКСПЕРЫМЕНТ

Лабараторная работа 1

Вывучэнне ізатэрмічнага працэсу

Мэта: даследаваць залежнасць ціску газу дадзенай масы ад займанага ім аб'ёму пры пастаяннай тэмпературы.

Абсталяванне: празрыстая сіліконавая трубка дыяметрам 8–10 мм з заціскам або коркам на канцы (шкляная трубка дыяметрам 10–12 мм і даўжынёй 60 см, запаяная з аднаго канца); мензурка (250 мл) з вадой пакаёвай тэмпературы; паддон; вымяральная стужка (лінейка); барометр-анероід (адзін на клас).



Мал. 228

Вывад разліковай формулы

Згодна з законам Бойля — Марыёта, пры пастаяннай тэмпературы параметры p_1 і V_1 пачатковага стану газу дадзенай масы і параметры p_2 і V_2 яго канчатковага стану звязаны суадносінамі $p_1 V_1 = p_2 V_2$.

У дадзенай рабоце даследуецца газ — паветра, якое знаходзіцца ўнутры празрыстай сіліконавай трубки з заціскам або коркам на канцы (шкляной трубки) (мал. 228, а, б).

Паколькі ўнутраная поласць трубки мае форму цыліндра і плошча S яе папярочнага сячэння аднолькавая па ўсёй даўжыні трубки, то $V_1 = S l_1$ і $V_2 = S l_2$, дзе l_1 і l_2 — даўжыні слупа паветра ў трубки ў пачатковым і канчатковым станах адпаведна.

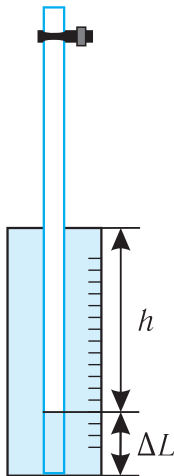
$$\text{Такім чынам, } p_1 S l_1 = p_2 S l_2 \text{ або } \frac{p_2}{p_1} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Пры выкананні работы правяраюць праўдзівасць гэтай роўнасці.

Парадак выканання работы

1. Закрыйце заціск на канцы сіліконавай трубки. Вымерайце: даўжыню l_1 слупа паветра ў трубки і ціск p_1 паветра (выкарыстоўваючы барометр-анероід) у пачатковым стане.

2. Пастаўце мензурку на паддон і запоўніце яе вадой пакаёвай тэмпературы так, каб пры апусканні трубки вада ў мензурцы паднялася да яе верхняга краю. Апусціце ў ваду трубку так, каб яе адкрыты канец апынуўся каля дна мензуркі (мал. 229).



Мал. 229

Назірайце за паступленнем вады ў трубку. Калі яно спыніцца, вымерайце даўжыню ΔL слупа вады, якая ўвайшла ў трубку.

3. Вымерайце рознасць узроўняў h вады ў мензурцы і трубы і вылічыце даўжыню l_2 слупа паветра ў трубы ў канчатковым стане: $l_2 = l_1 - \Delta L$.

4. Вылічыце ціск p_B слупа вады $p_B = \rho gh$ і ціск p_2 паветра ў трубы ў канчатковым стане: $p_2 = p_1 + p_B$.

Прыміце шчыльнасць вады $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, значэнне паскарэння свабоднага падзення $g = 9,810 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

5. Вылічыце адносіны $\frac{p_2}{p_1}$ і $\frac{l_1}{l_2}$. Параўнайце атрыманыя вынікі і зрабіце выснову.

Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцы ў зшытку.

l_1 , м	p_1 , Па	ΔL , м	h , м	l_2 , м	p_B , Па	p_2 , Па	$\frac{p_2}{p_1}$	$\frac{l_1}{l_2}$

6. Вылічыце адносную хібнасць ε_1 і абсалютную хібнасць Δ_1 вымярэння адносін $\frac{p_2}{p_1}$: $\varepsilon_1 = \frac{\Delta p}{p_1} + \frac{\Delta p}{p_2}$, дзе $\Delta p = \Delta_i p + \Delta_a p$ (Δ_i — абсалютная інструментальная хібнасць прыбора; Δ_a — абсалютная хібнасць адліку (гл. датак)); $\Delta_1 = \varepsilon_1 \frac{p_2}{p_1}$.

7. Вылічыце адносную хібнасць ε_2 і абсалютную хібнасць Δ_2 вымярэння адносін $\frac{l_1}{l_2}$: $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}$, дзе $\Delta l = \Delta_i l + \Delta_a l$; $\Delta_2 = \varepsilon_2 \frac{l_1}{l_2}$.

8. Запішыце вынікі вымярэнняў у выглядзе падвойных няроўнасцей:

$$\frac{p_2}{p_1} - \Delta_1 < \frac{p_2}{p_1} < \frac{p_2}{p_1} + \Delta_1; \quad \frac{l_1}{l_2} - \Delta_2 < \frac{l_1}{l_2} < \frac{l_1}{l_2} + \Delta_2.$$

Параўнайце атрыманыя інтэрвалы значэнняў і зрабіце выснову.

Калі інтэрвалы перакрываюцца, то адносіны ціскаў і даўжынь слупа паветра ў трубы пры дадзенай адноснай хібнасці вымярэнняў аднолькавыя, што і пацвярджае праўдзівасць правяранай роўнасці.

Кантрольныя пытанні

1. Пры якіх умовах для вызначэння параметраў стану газу можна выкарыстоўваць ураўненне $pV = \text{const}$?
2. Чаму пры выкананні дадзенай работы працэс змянення аб'ёму паветра можна лічыць практычна ізатэрмічным?
3. Што ўплывае на дакладнасць атрыманых вынікаў?

Суперзаданне

Вызначце матэматычную залежнасць паміж шчыльнасцю і ціскам паветра ў трубки. Выкарыстоўваючы вынікі, атрыманыя пры выкананні дадзенай работы, і тэрмометр, пабудуйце графік залежнасці шчыльнасці паветра ў трубки ад ціску.

Лабараторная работа 2

Вывучэнне ізабарнага працэсу

Мэта: даследаваць залежнасць аб'ёму газу дадзенай масы ад тэмпературы пры пастаянным ціску.

Абсталяванне: празрыстая сіліконовая трубка дыяметрам 8–10 мм і даўжынёй 80–100 см з двума заціскамі (коркамі) на канцах; тэрмометр; знешняя шклянка каларыметра; вымяральная стужка (лінейка); пасудзіна з вадой пры тэмпературы 55–60 °С; пасудзіна з вадой пакаёвай тэмпературы.

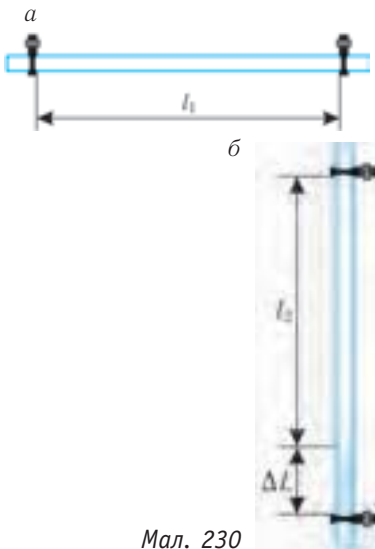
Вывад разліковай формулы

Згодна з законам Гей-Люсака пры пастаянным ціску параметры V_1 і T_1 пачатковага стану газу дадзенай масы і параметры V_2 і T_2 яго канчатковага стану звязаны суадносінамі

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

У дадзенай рабоце даследуецца газ — паветра, якое знаходзіцца ўнутры празрыстай сіліконовай трубки з заціскамі (коркамі) на канцах.

Паколькі ўнутраная поласць трубки мае форму цыліндра і плошча S яе папярочнага сячэння аднолькавая па ўсёй даўжыні трубки, то $V_1 = Sl_1$ і $V_2 = Sl_2$, дзе l_1 і l_2 — даўжыні слупа паветра ў трубки ў пачатковым (мал. 230, а) і канчатковым (мал. 230, б) станах адпаведна.



Мал. 230

Такім чынам, $\frac{Sl_1}{T_1} = \frac{Sl_2}{T_2}$ або $\frac{T_1}{T_2} = \frac{l_1}{l_2}$.

Пры выкананні работы правяраюць праўдзівасць гэтай роўнасці.

Парадак выканання работы

1. Вымерайце даўжыню l_1 слупа паветра ў трубки ў пачатковым стане (гл. мал. 230, а). Трубку шчыльна ўкладзіце ўнутры шклянкі каларыметра, папярэдне закрыўшы заціск, які размешчаны паблізу дна. Верхні заціск пакіньце адкрытым.

2. Запоўніце шклянку каларыметра вадой, папярэдне нагрэтай да тэмпературы 55–60 °С, так, каб канец трубки з верхнім заціскам быў пагружаны ў вадку не больш чым на 5–10 мм. Змясціце тэрмометр у вадку. Назірайце за выдзяленнем з трубки бурбалак паветра. Як толькі яно спыніцца, вызначце значэнне тэмпературы T_1 цёплага паветра, якое знаходзіцца ў трубки.

3. Закрыйце верхні заціск, зліце нагрэтую вадку і запоўніце шклянку вадкой пакаёвай тэмпературы да ранейшага ўзроўню (канец трубки з верхнім заціскам трэба апусціць у вадку не больш чым на 5–10 мм). Адкрыўце верхні заціск. Праз 1–2 хвіліны пасля ўстанаўлення цеплавой раўнавагі вызначце па паказанні тэрмометра тэмпературу T_2 паветра, якое знаходзіцца ў трубки.

4. Закрыйце верхні заціск і зліце вадку са шклянкі каларыметра. Дастаньце трубку, падтрасіце яе і, размясціўшы вертыкальна, вымерайце даўжыню ΔL слупа вады, якая ўвайшла ў трубку (гл. мал. 230, б).

5. Вылічыце даўжыню l_2 слупа паветра ў трубки пасля ахаладжэння: $l_2 = l_1 - \Delta L$.

6. Вылічыце адносіны $\frac{T_1}{T_2}$ і $\frac{l_1}{l_2}$. Параўнайце атрыманыя вынікі і зрабіце выснову.

Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцы ў сшытку.

l_1 , м	T_1 , К	T_2 , К	ΔL , м	l_2 , м	$\frac{T_1}{T_2}$	$\frac{l_1}{l_2}$

7. Вылічыце адносную хібнасць ε_1 і абсалютную хібнасць Δ_1 вымярэння адносін $\frac{T_1}{T_2}$: $\varepsilon_1 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}$, дзе $\Delta T = \Delta_1 T + \Delta_a T$; $\Delta_1 = \varepsilon_1 \frac{T_1}{T_2}$.

8. Вылічыце адносную хібнасць ε_2 і абсалютную хібнасць Δ_2 вымярэння адносін $\frac{l_1}{l_2}$: $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}$, дзе $\Delta l = \Delta_1 l + \Delta_a l$; $\Delta_2 = \varepsilon_2 \frac{l_1}{l_2}$.

9. Запішыце вынікі вымярэнняў у выглядзе падвойных няроўнасцей:

$$\frac{T_1}{T_2} - \Delta_1 < \frac{T_1}{T_2} < \frac{T_1}{T_2} + \Delta_1; \quad \frac{l_1}{l_2} - \Delta_2 < \frac{l_1}{l_2} < \frac{l_1}{l_2} + \Delta_2.$$

Параўнайце атрыманыя інтэрвалы значэнняў і зрабіце выснову.

Кантрольныя пытанні

1. Пры якіх умовах для вызначэння параметраў стану газу можна выкарыстоўваць ураўненне $V = \text{const } T$?
2. Чаму пры выкананні дадзенай работы працэс ахалоджвання паветра можна лічыць практычна ізабарным?
3. Як вызначыць, калі адбылося выраўноўванне тэмпературы паветра ў трубы і тэмпературы нагрэтай вады ў шклянцы каларыметра?

Суперзаданне



Л.р. 3-1

Выкарыстоўваючы абсталяванне для дадзенай лабараторнай работы, барометр-анероід і штангенцыркуль, вызначце масу паветра ў трубы.

Лабараторная работа 3

Вымярэнне адноснай і абсалютнай вільготнасцей паветра

Мэта: вымераць адносную і абсалютную вільготнасці паветра.

Абсталяванне: тэрмометр лабараторны; марлевы бінт; пасудзіна з вадой; табліца залежнасці ціску і шчыльнасці насычанай вадзяной пары ад тэмпературы; псіхраметрычная табліца.

Вывод разліковай формулы

Адной з характарыстык вільготнасці паветра з'яўляецца адносная вільготнасць. Адносная вільготнасць ϕ паказвае, наколькі вадзяная пара, якая змяшчаецца ў паветры пры дадзенай тэмпературы, далёкая ад насычэння. Адносную вільготнасць паветра можна вызначыць па формуле $\phi = \frac{\rho_n}{\rho_n} \cdot 100 \%$, дзе ρ_n — абсалютная вільготнасць паветра; ρ_n — шчыльнасць насычанай вадзяной пары пры дадзенай тэмпературы.

Разам з тым, ведаючы паказанні сухога і вільготнага тэрмометраў, адносную вільготнасць паветра ϕ можна вызначыць, выкарыстоўваючы псіхраметрычную табліцу (табл. 1), а шчыльнасць насычанай вадзяной пары ρ_n — табліцу залежнасці ціску і шчыльнасці насычанай вадзяной пары ад тэмпературы (табл. 2). Тады абсалютную вільготнасць ρ_n паветра можна вызначыць па фор-

$$\text{муле } \rho_n = \frac{\phi \cdot \rho_n}{100 \%}.$$

Таблиця 1

Показання сухого термоме- тра, °С	Розниця показань сухого і вільготнаго термометра, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Адносная вільготнасць паветра, %										
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	75	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	85	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Таблиця 2

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{кПа}$	$\rho_{\text{н}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{кПа}$	$\rho_{\text{н}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$
10	1,23	9,4	21	2,49	18,3
11	1,31	10,0	22	2,64	19,4
12	1,40	10,7	23	2,81	20,5
13	1,50	11,3	24	2,98	21,8
14	1,60	12,1	25	3,17	23,0
15	1,71	12,8	26	3,36	24,4
16	1,82	13,6	27	3,57	25,7
17	1,94	14,4	28	3,78	27,2
18	2,06	15,4	29	4,01	28,8
19	2,20	16,3	30	4,24	30,3
20	2,34	17,3	31	4,49	32,0

Парадак выканання работы

1. Вымерайце тэмпературу t_1 паветра ў кабінеце (паказанне сухога тэрмометра). Абгарніце рэзервуар тэрмометра вільготным марлевым бінтам. Пачакайце (прыкладна 15 мін), пакуль тэмпература ўстанавіцца, і зніміце паказанні вільготнага тэрмометра t_2 . Вызначце рознасць паказанняў сухога і вільготнага тэрмометраў $t_1 - t_2$.

2. Выкарыстоўваючы псіхаметрычную табліцу, вызначце адносную вільготнасць ϕ паветра ў кабінеце. Вылічыце абсалютную вільготнасць ρ_n паветра.

Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцы ў сшытку.

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_1 - t_2, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$	$\rho_n, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$

3. Вылічыце абсалютную хібнасць Δt і адносную хібнасць ε_t прамога вымярэння тэмпературы (для аднаго з вымярэнняў): $\Delta t = \Delta_i t + \Delta_a t$, $\varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t}$. Запішыце вынік вымярэння тэмпературы ў выглядзе: $t = (t \pm \Delta t) ^\circ\text{C}$; $\varepsilon_t = \quad \%$.

4*. Вызначце адносную вільготнасць паветра ў школьным калідоры (на дварэ). Параўнайце значэнні адноснай вільготнасці ў кабінеце і калідоры (на дварэ). Зрабіце выснову.

Кантрольныя пытанні

1. Якая адносная вільготнасць паветра, калі паказанні сухога і вільготнага тэрмометраў аднолькавыя?

2. Як змяняцца абсалютная і адносная вільготнасці паветра ў памяшканні пры паніжэнні тэмпературы?

3. Як будзе змяняцца рознасць паказанняў сухога і вільготнага тэрмометраў пры паніжэнні тэмпературы паветра, калі яго абсалютная вільготнасць застаецца пастаяннай?

Суперзаданне

Выкарыстоўваючы вынікі, атрыманыя пры выкананні дадзенай работы, вызначце масу вады, якую трэба выпарыць у вашым кабінеце, каб адносная вільготнасць паветра павысілася на $\Delta\phi = 10 \%$.

* Заданне выконваецца паводле меркавання настаўніка.

Лабораторная работа 4

Вымярэнне ЭРС і ўнутранага супраціўлення крыніцы току

Мэта: вымераць ЭРС і ўнутранае супраціўленне крыніцы пастаяннага току.

Абсталяванне: гальванічны элемент (батарэйка 1,5–4,5 В); вальтметр; амперметр; рэастант; ключ; злучальныя праводы.

Вывад разліковых формул

Згодна з законам Ома для поўнага ланцуга ЭРС \mathcal{E} крыніцы току, яго ўнутранае супраціўленне r , сіла току I ў ланцугу і супраціўленне R знешняга ўчастка ланцуга звязаны суадносінамі $\mathcal{E} = IR + Ir$.

З улікам таго, што напружанне на знешнім участку ланцуга $U = IR$, атрымаем:

$$\mathcal{E} = U + Ir.$$

Калі выканаць непасрэдня вымярэнні сілы току I_1 і I_2 і напружання U_1 і U_2 пры двух розных значэннях супраціўлення знешняга ўчастка ланцуга, то атрымаем сістэму, якая складаецца з двух ураўненняў:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = U_1 + I_1 r, \\ \mathcal{E} = U_2 + I_2 r. \end{cases}$$

Адсюль унутранае супраціўленне крыніцы пастаяннага току $r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$, а яго ЭРС $\mathcal{E} = \frac{I_1 U_2 - I_2 U_1}{I_1 - I_2}$.

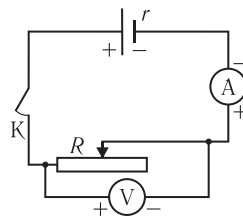
Замест рэастата можна выкарыстаць два рэзістары, супраціўленні R_1 і R_2 якіх вядомыя. Тады формулы для разліку ўнутранага супраціўлення r і ЭРС \mathcal{E} крыніцы пастаяннага току набудуць выгляд:

$$r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2}; \quad \mathcal{E} = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_1 - I_2}.$$

Парадак выканання работы

1. Збярыце электрычны ланцуг па схеме, паказанай на малюнку 231. Пры разамкнутым ключы правярце надзейнасць кантактных злучэнняў і правільнасць падключэння электравымяральных прыбораў.

2. Правядзіце не менш за шэсць вымярэнняў сілы току і напружання на знешнім участку ланцуга пры розных становішчах рухомага кантакту рэастата. Вылічыце ўнутранае супраціўленне r і ЭРС \mathcal{E} крыніцы пастаяннага току для кожнай пары вынікаў вымярэнняў.



Мал. 231

3. Вылічыце сярэднія значэнні ўнутранага супраціўлення $\langle r \rangle$ і ЭРС $\langle \mathcal{E} \rangle$ крыніцы току.

Вынікі вымярэнняў і вылічэнняў запішыце ў табліцы ў сшытку.

№ доследу	U , В	I , А	r , Ом	$\langle r \rangle$, Ом	\mathcal{E} , В	$\langle \mathcal{E} \rangle$, В
1						
2						
...						

4. Пабудуйце графік залежнасці напружання U на знешнім участку ланцуга ад сілы току I ў ланцугу. Працягніце графік да перасячэння з каардынатнымі восямі. Па графіку вызначце ЭРС \mathcal{E} крыніцы току. Выкарыстоўваючы даныя графіка, вызначце ўнутранае супраціўленне r крыніцы току.

З графіка і ўраўнення $\mathcal{E} = U + Ir$ вынікае, што пры $I = 0$ (ланцуг разамкнуты) $\mathcal{E} = U$; пры $U = 0$ сіла току ў ланцугу максімальная, і ўнутранае супраціўленне крыніцы току можна вызначыць па формуле $r = \frac{\mathcal{E}}{I_{\max}}$.

5. Пры разамкнутым ключы падключыце вальтметр да крыніцы току і вымерайце яе ЭРС \mathcal{E} .

6. Параўнайце вынікі вылічэння сярэдняга значэння ЭРС $\langle \mathcal{E} \rangle$ крыніцы току (п. 3), вызначэння ЭРС \mathcal{E} па графіку (п. 4) і прамых вымярэнняў ЭРС \mathcal{E} (п. 5).

7. Вылічыце абсалютную хібнасць $\Delta \mathcal{E}$ і адносную хібнасць $\varepsilon_{\mathcal{E}}$ прамых вымярэнняў ЭРС крыніцы току: $\Delta \mathcal{E} = \Delta_i \mathcal{E} + \Delta_a \mathcal{E}$, $\varepsilon_{\mathcal{E}} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}}$. Запішыце вынікі прамых вымярэнняў ЭРС крыніцы току ў выглядзе:

$$\mathcal{E} = (\mathcal{E} \pm \Delta \mathcal{E}) \text{ В}; \quad \varepsilon_{\mathcal{E}} = \quad \%$$

Кантрольныя пытанні

1. Чаму адрозніваюцца паказанні вальтметра, падключанага да крыніцы току, пры разамкнутым і пры замкнутым ключы?

2. Ад чаго залежыць магутнасць току на знешнім участку ланцуга для дадзенай крыніцы току?

3. Як змяняецца каэфіцыент карыснага дзеяння крыніцы току пры павелічэнні даўжыні актыўнай часткі рэзистара?

Суперзаданне

Выкарыстоўваючы вынікі, атрыманыя пры выкананні дадзенай работы, вызначце максімальную магутнасць току на знешнім участку поўнага ланцуга.

Вылічэнне хібнасцей вымярэнняў

Выкананне лабараторных работ звязана з вымярэннем фізічных велічынь, гэта значыць вызначэннем значэнняў велічынь доследным шляхам з дапамогай вымяральных прыбораў (сродкаў вымярэння), і апрацоўкай вынікаў вымярэнняў.

Адрозніваюць прамыя і ўскосныя вымярэнні. Пры гэтым вынік любога вымярэння з'яўляецца прыблізным, гэта значыць утрымлівае хібнасць вымярэння. Дакладнасць вымярэння фізічнай велічыні характарызуецца абсалютная і адносна хібнасці.

Прамае вымярэнне — вызначэнне значэння фізічнай велічыні непасрэдна з дапамогай вымяральнага прыбора.

Абсалютную хібнасць прамых вымярэнняў вызначаюць сумай абсалютнай інструментальнай хібнасці і абсалютнай хібнасці адліку $\Delta x = \Delta_{\text{і}}x + \Delta_{\text{а}}x$ пры ўмове, што выпадковая хібнасць і хібнасць вылічэння або адсутнічаюць, або нязначныя і іх можна не прымаць пад увагу.

Абсалютная інструментальная хібнасць $\Delta_{\text{і}}x$ звязана з класам дакладнасці прыбора. Абсалютныя інструментальныя хібнасці некаторых сродкаў вымярэнняў прыведзены ў тэблiцы 1.

Тэблiца 1

Сродкі вымярэнняў	Дыяпазон вымярэнняў	Абсалютная інструментальная хібнасць
Лінейкі: металічныя драўляныя пластмасавыя	150, 300, 500 мм 400, 500, 750 мм 200, 250, 300 мм	0,1 мм 0,5 мм 1 мм
Стужка вымяральная	150 см	0,5 см
Мензуркі 2-га класа	100, 200, 250 см ³	5 см ³
Амперметр школьны	2 А	0,05 А
Міліамперметр	ад 0 да I_{max}	4 % максімальнай мяжы вымярэнняў I_{max}

Заканчэнне табліцы 1

Вальтметр школьны	6 В	0,15 В
Тэрмометр лабараторны	100 °С	1 °С
Барометр-анероід	720–780 мм рт. сл.	3 мм рт. сл.
Штангенцыркулі з цаной дзялення 0,1; 0,05 мм	155, 250, 350 мм	0,1; 0,05 мм у адпаведнасці з цаной дзялення ноніуса
Мікрометры з цаной дзялення 0,01 мм	0–25, 25–50, 50–75 мм	0,004 мм

Абсалютная хібнасць адліку $\Delta_x x$ звязана з дыскрэтнасцю шкалы прыбора. Калі велічыню вымяраюць з дакладнасцю да цэлага дзялення шкалы прыбора, то хібнасць адліку прымаюць роўнай цане дзялення. Калі пры вымярэнні значэнне велічыні акругляюць да паловы дзялення шкалы, то хібнасць адліку прымаюць роўнай палове цаны дзялення.

Абсалютная хібнасць вызначае значэнне інтэрвалу, у якім ляжыць праўдзівае значэнне вымеранай велічыні:

$$x = x_{\text{ВЫМ}} \pm \Delta x.$$

Адносную хібнасць прамога вымярэння вызначаюць адносінамі абсалютнай хібнасці да значэння вымеранай велічыні:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{ВЫМ}}} \cdot 100 \%$$

Адносная хібнасць характарызуе дакладнасць вымярэння: чым яна меншая, тым дакладнасць вымярэння вышэйшая.

Ускоснае вымярэнне — вызначэнне значэння фізічнай велічыні з выкарыстаннем формулы, якая звязвае яе з іншымі велічынямі, вымеранымі непасрэдна з дапамогай прыбораў.

Адным з метадаў вызначэння хібнасці ўскосных вымярэнняў з'яўляецца метадад межаў хібнасцей. Формулы для вылічэння абсалютных і адносных хібнасцей ускосных вымярэнняў метадам межаў хібнасцей прыведзены ў табліцы 2.

Табліца 2

Выгляд функцыі y	Абсалютная хібнасць Δy	Адносная хібнасць $\frac{\Delta y}{y}$
$x_1 + x_2$	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{ x_1 + x_2 }$
$x_1 - x_2$	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{ x_1 - x_2 }$
Cx	$C\Delta x$	$\frac{\Delta x}{x}$
$x_1 x_2$	$ x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1$	$\frac{\Delta x_1}{ x_1 } + \frac{\Delta x_2}{ x_2 }$
$\frac{x_1}{x_2}$	$\frac{ x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1}{x_2^2}$	$\frac{\Delta x_1}{ x_1 } + \frac{\Delta x_2}{ x_2 }$
x^n	$ n x ^{n-1} \Delta x$	$ n \frac{\Delta x}{ x }$
$\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{x \ln x }$
$\sin x$	$ \cos x \Delta x$	$\frac{\Delta x}{ \operatorname{tg} x }$
$\cos x$	$ \sin x \Delta x$	$ \operatorname{tg} x \Delta x$
$\operatorname{tg} x$	$\frac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\frac{2\Delta x}{ \sin 2x }$

Абсалютную хібнасць таблічных велічын і фундаментальных фізічных пастаянных вызначаюць як палову адзінкі апошняга разраду значэння велічыні.

Адказы

Практыкаванне 1

1. $M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(\text{H}_2\text{O}) = 3,0 \cdot 10^{-23} \text{ г}$; $M(\text{CO}_2) = 44 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$,
 $m_0(\text{CO}_2) = 7,3 \cdot 10^{-23} \text{ г}$; $M(\text{NH}_3) = 17 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(\text{NH}_3) = 2,8 \cdot 10^{-23} \text{ г}$;
 $M(\text{HNO}_3) = 63 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(\text{HNO}_3) = 1,0 \cdot 10^{-22} \text{ г}$. 2. $\nu = 11 \text{ моль}$, $N = 6,6 \cdot 10^{24}$.
 3. $m = 2,5 \text{ г}$. 4. $\frac{N_{\text{м}}}{N_{\text{а}}} = 1,4$. 5. $V = 17 \text{ см}^3$. 6. $m_0 = 4,7 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$, $d = 6,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.
 7. $m = 78 \text{ г}$.

Практыкаванне 2

1. $n = 2,3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. 2. $p_2 = 28 \text{ кПа}$. 3. $\langle E_{\text{к}} \rangle = 5,6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$. 4. $\langle E_{\text{к}} \rangle =$
 $= 1,5 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}$. 5. $\langle v^2 \rangle = 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$. 6. $\frac{p_2}{p_1} = 6$.

Практыкаванне 3

1. $T = 220 \text{ К}$. 2. а) $t = 200 \text{ }^\circ\text{С}$; б) $t = -153 \text{ }^\circ\text{С}$. 3. $\langle E_{\text{к}} \rangle = 6,1 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$.
 4. $N = 1,0 \cdot 10^{21}$. 5. $p = 1,2 \text{ МПа}$. 6. $\Delta t = 297 \text{ }^\circ\text{С}$. 7. $\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Практыкаванне 4

1. $\nu = 2,10 \cdot 10^{-2} \text{ моль}$. 2. $V = 0,554 \text{ м}^3$. 3. $p_2 = 1,5 \text{ МПа}$. 4. $V_2 = 7,8 \text{ л}$.
 5. $\frac{p_1}{p_2} = 7,5$.

Практыкаванне 5

1. $T_1 = 286 \text{ К}$. 5. Уцечкі газу не было.

Заданні для самакантролю

1. $\frac{n_2}{n_1} = 2$. 2. $V = 12 \text{ л}$. 3. $V = 3,5 \text{ л}$. 4. $\frac{p_{\text{N}_2}}{p_{\text{H}_2}} = 14$. 5. $\rho = 0,9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
 6. $n_{\text{O}_2} = 2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$. 7. $\langle E_{\text{к}} \rangle = 3,0 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$. 8. $t_2 = 86,8 \text{ }^\circ\text{С}$. 9. $V_2 = 1 \text{ л}$.
 10. $\frac{\langle v_{\text{квI}} \rangle}{\langle v_{\text{квII}} \rangle} = 1,4$. 11. $p = 4,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$. 12. $V = 0,83 \text{ м}^3$. 13. $T_2 = 840 \text{ К}$.
 14. $T_3 = 588 \text{ К}$.

Практыкаванне 6

1. $\varphi = 66\%$. 2. $\varphi = 69\%$. 3. Пры тэмпературы $t < 10\text{ }^\circ\text{C}$. 4. $\Delta m = 2,9 \cdot 10^6$ кг. 5. $\varphi = 60\%$, $\rho = 7,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. 6. $t_{\text{в}} = 13\text{ }^\circ\text{C}$.

Практыкаванне 7

1. $U = 0,37$ кДж. 2. $\Delta U = 0,50$ кДж. 3. $U = 1,8$ кДж. 4. $\frac{U_2}{U_1} = 2,0$.
5. $U = 0,90$ МДж. 6. $N = 1,9 \cdot 10^{20}$.

Практыкаванне 8

1. Аб'ём газу памяншаецца, ціск газу павялічваецца, унутраная энергія газу не змяняецца. 2. $\Delta V = 0,40$ л. 3. $A = 3,5$ кДж. 4. $m = 0,47$ кг.
5. $A = 5,5$ кДж.

Практыкаванне 9

1. $m_2 = 1,26$ кг. 2. $m_1 = 1,5$ кг. 3. $t = 80\text{ }^\circ\text{C}$. 4. $\Delta m = 68$ г. 5. $t_1 = t_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$.
У абодвух выпадках лёд растаў часткова, і ў каларыметры знаходзілася сумесь вады і лёду.

Практыкаванне 10

1. $Q = A = 6,4$ кДж. 2. $A_{12} = 0$, $Q_{12} < 0$, $\Delta U_{12} < 0$. 3. $\Delta U_{12} = -1,35$ кДж.
4. $Q = 358$ кДж. 5. $\Delta U = 75,0$ кДж, $Q = 125$ кДж.

Практыкаванне 11

1. $\eta_t = 25\%$. 2. $Q_1 = 1,5$ кДж. 3. $\langle P \rangle = 9,8$ кВт. 4. $N = 110$ дзён.

Заданні для самакантролю

1. $\frac{U_{\text{Ne}}}{U_{\text{He}}} = 3$. 2. $\Delta U = 0,36$ кДж. 3. $\frac{U_3}{U_1} = 4$. 4. $\Delta U = -3,0$ кДж.
5. $m = 7,49$ г. 6. $A = 1,8 \cdot 10^2$ Дж. 7. $A = 2,5$ кДж. 8. $T_1 = 217$ К. 9. 3 і 4.
10. $\Delta t = 16\text{ }^\circ\text{C}$. 11. $t_{0\text{л}} = -28\text{ }^\circ\text{C}$. 12. $m_2 = 1$ кг. 13. $v = 0,29$ моль.
14. $A = 12$ кДж, $Q = 31$ кДж. 15. $1 \rightarrow 2$: $A > 0$, $Q > 0$, $\Delta U > 0$; $2 \rightarrow 3$:
 $A < 0$, $Q < 0$, $\Delta U = 0$; $3 \rightarrow 1$: $A = 0$, $Q < 0$, $\Delta U < 0$.

Практыкаванне 12

1. Нельга. 2. $q = -8,0 \cdot 10^{-14}$ Кл. 3. $q_3 = -2e$. 4. $q_p = 5,3 \cdot 10^5$ Кл.
5. $N = 7,5 \cdot 10^5$.

Практыкаванне 13

1. $F = 8,1$ мкН; паменшыцца ў 2,0 разы. 2. У 2 разы. 3. $r_2 = 53$ см.
4. $F = 4,5$ мкН. 5. $q_1 = q_2 = 3,4 \cdot 10^{-12}$ Кл. 6. $q_2 = -74$ нКл.

Практыкаванне 14

1. $F = 640$ мкН. 2. $|Q| = 4,0 \cdot 10^{-11}$ Кл. 3. $\frac{Q_1}{Q_2} = 16$. 4. $E_A = 63 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.
5. $E = 49 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Практыкаванне 15

1. Не залежыць. $A_A = A_B = 0$. 2. $A = -10$ мДж, $\Delta W_{\text{п}} = 10$ мДж. 3. $A = 8,0$ мкДж, $\Delta W_{\text{п}} = -8,0$ мкДж, $\Delta W_{\text{к}} = 8,0$ мкДж. 4. $\varphi_1 = -30$ В, $\varphi_2 = 30$ В.
5. $\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = 3$. 6. $E = 0,72 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, $\varphi_{\text{р}} = 0$.

Практыкаванне 16

1. $q = 40$ нКл. 2. $U = 1,44 \cdot 10^9$ В. 3. $E = 40 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 4. $U_{23} = 0,24$ кВ.
5. $q = 0,13$ нКл. 6. $U_{12} = -21$ В.

Практыкаванне 17

1. $C = 25$ мкФ. 2. $d = 4,9$ мм. 3. $\frac{C_2}{C_1} = 6$. 4. $q = 0,80$ мкКл. 5. $E = 0,45 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$.
6. $E_2 = 8,4 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 7. $d = 5,0$ мм.

Практыкаванне 18

1. $W = 4,0$ мДж. 2. $d = 2,00$ см. 3. $W_2 = 4$ мкДж. 4. $W = 0,22$ мкДж,
 $E = 25 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 5. $E = 22 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, $U_2 = 0,66$ кВ.

Заданні для самакантролю

1. 4. 2. $N'_1 = 1,5 \cdot 10^8$. 3. Павялічыцца ў $\gamma = 20$ разоў. 4. $F_{\text{р}} = 2,7 \cdot 10^{-7}$ Н, накіравана да зараду q_1 . 5. $|q| = 1$ мкКл. 6. $x = 14$ м. 7. $\alpha = 5^\circ$.
8. $E_{\text{р}} = 6,8 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 9. а) $\varphi = 0,36$ кВ; б) $\varphi = -0,36$ кВ; в) $\varphi = 0$ В. 10. а) $\Delta W_{\text{п}} = 8,0 \cdot 10^{-18}$ Дж; б) $\Delta W_{\text{п}} = -8,0 \cdot 10^{-18}$ Дж; в) $\Delta W_{\text{п}} = \Delta W_{\text{к}} = 0$ Дж.
11. $\frac{v_e}{v_p} = 43$. 12. $E_{\text{р}} = 10 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. 13. $U_{AB} = 1,4$ кВ. 14. $A_{\text{знеш}}^{\text{мін}} = 310$ мДж.
15. $\varepsilon = 2,25$. 16. $\frac{F_{\text{пр2}}}{F_{\text{пр1}}} = 1,1$. 17. $t = 5,3 \cdot 10^{-8}$ с. 18. $C = 5$ нФ.
19. $\varepsilon_2 = 4$. 20. $C = 5,1$ мкФ.

Практыкаванне 19

1. $I = 2$ А, $U_1 = 4$ В, $U_2 = 1$ В. 3. $I_{к.з} = 5,5$ А. 4. $I_{к.з} = 6$ А, $r = 0,5$ Ом.
 5. $P_{поўн} = 10$ Вт. 6. $Q = 2,1$ кДж. 7. $U = 9,6$ В, $I_1 = 2,4$ А, $I_2 = 1,6$ А.
 8. $A_{карысн} = 12$ кДж; $\eta = 83$ % . 9. 1, 3, 5.

Практыкаванне 20

1. а) Па ходзе руху гадзіннікавай стрэлкі; б) перпендыкулярна плоскасці ма-
 лютка да назіральніка. 2. Стрэлка павернецца на некаторы вугал $\alpha < 90^\circ$
 паўночным полюсам да назіральніка. 3. Стрэлка павернецца паўднёвым по-
 лясам да назіральніка. 4. Шпулі будуць адштурхвацца. 5. Электрычны ток у
 саленоідзе ідзе ад клемы В да клемы А.

Практыкаванне 21

1. $F_{\max} = 1,6$ Н, $F_{\min} = 0$. 2. $\alpha = 45^\circ$. 3. $B = 0,40$ Тл, ад назіральніка.
 4. $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. 5. $B_p = 0,05$ Тл. 6. $B_{1\max} = 0,05$ Тл. 7. $B_{2\min} = 0,03$ Тл.

Практыкаванне 22

1. $F_{л} = 5,1 \cdot 10^{-16}$ Н. 2. $B = 2,8$ мТл. 3. $T = 3,1 \cdot 10^3$ с. 4. $W_k = 2,3 \cdot 10^{-17}$ Дж.
 5. $U = 14$ кВ.

Практыкаванне 23

1. а) Да саленоіда; б) ад саленоіда. 2. а) $\Phi_1 = 18$ мВб; б) $\Phi_2 = 0$;
 в) $\Phi_3 = 9,0$ мВб. 3. $\Phi = 32$ мВб. 4. $\Delta t = 0,25$ с. 5. $\Phi_1 = 1,0$ мВб.

Практыкаванне 24

1. $L = 2,5$ мГн. 2. $L = 0,50$ Гн. 3. $\mathcal{E}_c = -8,0$ В, $\Delta W_M = 19$ Дж.
 4. Пры $0 \leq t \leq 10$ с $\mathcal{E}_{c1} = -6,0$ мВ, пры $t > 10$ с $\mathcal{E}_{c2} = 0$. 5. $L = 80$ мГн,
 $W_{M1} = 4,0$ Дж. 6. $\mathcal{E}_c = 1,4$ В.

Заданні для самакантролю

1. $F = 0,60$ мкН. 2. 2. 3. $\Delta l = 10$ см. 4. 2. 5. $\frac{q_1}{q_2} = 8,0$. 6. $t = 33$ мкс.
 7. $\mathcal{E}_{\text{інд}} = -1,9$ В. 8. $\mathcal{E}_{\text{інд}}^{\max} = 0,18$ В. 9. $I_{\text{інд}} = 40$ мА. 10. $(t_3; t_4)$. 11. $\Phi = 17$ мВб.
 12. $\Phi_c = 0,30$ Вб.

Гласарый

А

Абсалютная вільготнасць паветра — фізічная велічыня, роўная шчыльнасці вадзяной пары, якая знаходзіцца ў паветры пры дадзеных умовах.

Аднароднае магнітнае поле — поле, індукцыя якога ва ўсіх пунктах прасторы аднолькавая.

Аднароднае электростатычнае поле — поле, напружанасць якога ва ўсіх пунктах прасторы аднолькавая.

Адносная вільготнасць паветра — фізічная велічыня, роўная адносінам абсалютнай вільготнасці да шчыльнасці насычанай вадзяной пары пры дадзенай тэмпературы:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Аморфны стан — цвёрды некрышталічны стан рэчыва, які характарызуецца ізатрапіяй уласцівасцей і адсутнасцю пэўнай тэмпературы плаўлення.

Анізатрапія — залежнасць фізічных уласцівасцей (механічных, цеплавых, электрычных, аптычных) ад напрамку ўнутры крышталю.

Б

Броўнаўскі рух — хаатычны рух узважаных у вадкасці або газе драбнючкіх нерас-
тваральных цвёрдых часціц памерамі прыкладна 1 мкм і менш.

В

Вузлы крышталічнай рашоткі — становішчы ўстойлівай раўнавагі, адносна якіх вагаюцца часціцы (іоны, атомы або малекулы), што ўтвараюць крышталю.

Г

Газавы разрад — праходжанне электрычнага току праз іанізаваны газ.

Д

Дыфузія — працэс узаемнага пранікнення часціц аднаго з рэчываў, якія судакранаюцца, паміж часціцамі другога рэчыва з прычыны іх цеплага руху.

Дыэлектрычная пранікальнасць рэчыва — фізічная велічыня, якая паказвае, у колькі разоў модуль сіл электростатычнага ўзаемадзеяння зарадаў у дадзеным адна-
родным асяроддзі меншы, чым модуль сіл узаемадзеяння гэтых жа зарадаў у вакууме:

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F}.$$

І

Індукцыйны ток — электрычны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным кон-
туры пры любой змене магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым кон-
турам.

Індукцыя магнітнага поля — фізічная вектарная велічыня, модуль якой роўны адносінам максімальнага значэння сілы, якая дзейнічае з боку магнітнага поля на

прамалінейны ўчастак правадніка з токам, да здабытку сілы току ў ім і даўжыні гэтага ўчастка: $B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$.

З

Звышправоднасць — з'ява, пры якой электрычнае супраціўленне правадніка паямяншаецца да нуля.

К

Канцэнтрацыя часціц — фізічная велічыня, лікава роўная колькасці часціц, якія змяшчаюцца ў адзінкавым аб'ёме: $n = \frac{N}{V}$.

Каэфіцыент карыснага дзеяння крыніцы току — адносіны карыснай магутнасці току на знешнім участку ланцуга да поўнай магутнасці, якая развіваецца пабочнымі сіламі крыніцы току: $\eta = \frac{P_{\text{карысн}}}{P_{\text{поўн}}} \cdot 100\%$.

Каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка — адносіны карысна выкарыстанай энергіі да агульнай колькасці энергіі, атрыманай сістэмай: $\eta_s = \frac{E_{\text{карысн}}}{E}$.

Колькасць рэчыва — адносіны колькасці часціц гэтага рэчыва да пастаяннай Авагадра: $\nu = \frac{N}{N_A}$.

Колькасць цеплаты — колькасная мера энергіі, перададзенай цэлу (або аддадзенай ім) у працэсе цеплаабмену.

Крышталі — цвёрдыя целы, атамы, іоны ці малекулы якіх здзяйсняюць цеплавую ваганні каля пэўных, упарадкаваных у прасторы становішчаў раўнавагі.

Л

Лініі індукцыі магнітнага поля — уяўныя накіраваныя лініі ў прасторы, датычныя да якіх у кожным пункце поля супадаюць з напрамкам індукцыі магнітнага поля.

Лініі напружанасці электростатычнага поля — уяўныя накіраваныя лініі ў прасторы, датычныя да якіх у кожным пункце поля супадаюць з напрамкам напружанасці электростатычнага поля.

М

Магнітнае поле — форма матэрыі, што ствараецца электрычнымі зарадамі, якія рухаюцца адносна пэўнай інерцыяльнай сістэмы адліку, або пераменнымі электрычнымі палямі.

Магнітны паток праз плоскую паверхню, якая знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, — фізічная скалярная велічыня, роўная здабытку модуля індукцыі магнітнага поля, плошчы паверхні і косінуса вугла паміж напрамкамі нармалі да гэтай паверхні і індукцыі магнітнага поля: $\Phi = BS \cos \alpha$.

Малекулярная фізіка — раздзел фізікі, у якім вывучаюць уласцівасці цел і працэсы, што ў іх адбываюцца і звязаны з велізарнай колькасцю часціц, змешчаных у гэтых целах.

Малярная маса — маса рэчыва, узятага ў колькасці $\nu = 1$ моль: $M = \frac{m}{\nu}$.

Монакрышталі — цвёрдыя целы, якія маюць ва ўсім аб'ёме адзіную крышталічную рашотку.

Н

Напружанасць электростатычнага поля — фізічная вектарная велічыня, роўная адносінам сілы, з якой поле дзейнічае на пробны зарад, да значэння гэтага зараду $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$.

Насычаная пара — пара, якая знаходзіцца ў стане дынамічнай раўнавагі з вадкасцю.

Ненасычаная пара — пара, ціск (шчыльнасць) якой меншы за ціск (шчыльнасць) насычанай пары пры той жа тэмпературы.

П

Парцыяльны ціск — ціск газу, які ўваходзіць у састаў газавай сумесі, калі б ён адзін займаў увесь аб'ём, адведзены сумесі пры той жа тэмпературы.

Пастаянны ток — мадэль электрычнага току, у якой сіла току не залежыць ад часу пры нязменным размеркаванні зараду ў правадніку.

Патэнцыял электростатычнага поля ў дадзеным пункце прасторы — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам патэнцыяльнай энергіі пробнага зараду, змешчанага ў дадзены пункт поля, да значэння гэтага зараду: $\phi = \frac{W_{п.}}{q_0}$.

Плазма — поўнасцю або часткова іанізаваны газ, у якім канцэнтрацыі дадатных і адмоўных зарадаў практычна супадаюць, гэта значыць модулі сярэдніх аб'ёмных шчыльнасцей дадатных і адмоўных зарадаў аднолькавыя.

Полікрышталі — цвёрдыя целы, што складаюцца з вялікай колькасці маленькіх крышталёў, якія зрасліся паміж сабой.

Пунктавы зарад — зарад такога зараджанага цела, памеры якога значна меншыя за адлегласць ад гэтага цела да пункта назірання і да іншых цел (гэта значыць памеры зараджанага цела ва ўмовах дадзенай задачы можна не прымаць пад увагу).

Пункт расы — тэмпература, пры якой вадзяная пара ў выніку ізабарнага ахаладжэння становіцца насычанай.

Р

Рознасць патэнцыялаў паміж двума пунктамі электростатычнага поля — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам работы, якая выконваецца сілай поля пры перамяшчэнні пробнага зараду з пачатковага пункта ў канчатковы, да значэння гэтага зараду: $U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}$.

С

Самаіндукцыя — з'ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў электрычным ланцугу ў выніку змянення сілы току ў гэтым ланцугу.

Т

Тэрмічны каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавога рухавіка — адносіны работы, якая выконваецца рабочым целам за цыкл, да колькасці цеплаты, атрыманай ім ад нагрэвальніка: $\eta_t = \frac{A_{п.}}{Q_1}$.

Ц

Цеплаабмен — самаадвольны працэс перадачы ўнутранай энергіі ад цела з большай тэмпературай да цела з меншай тэмпературай без выканання работы.

Цеплавая раўнавага — стан ізаляванай фізічнай сістэмы, пры якім усе яе макраскапічныя параметры застаюцца нязменнымі з цягам часу.

Цеплавы рух — хаатычны рух часціц рэчыва, інтэнсіўнасць якога залежыць ад тэмпературы цела.

Цеплавая рухавікі — рухавікі, у якіх адбываецца ператварэнне часткі ўнутранай энергіі паліва пры згаранні ў механічную работу.

У

Унутраная энергія макраскапічнага цела — алгебраічная сума кінетычнай энергіі цеплавога руху ўсіх часціц, якія ўтвараюць цела, і патэнцыяльнай энергіі іх узаемадзеяння.

Э

Электрадынаміка — раздзел фізікі, у якім вывучаюць электрамагнітнае ўзаемадзеянне паміж электрычна зараджанымі целамаі і часціцамаі.

Электраліты — рэчывы, растворы або расплавы якіх праводзяць электрычны ток.

Электрамагнітная індукцыя — з'ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў контуры, які або знаходзіцца ў спакоі ў зменлівым у часе магнітным полі, або рухаецца ў пастаянным магнітным полі так, што магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, змяняецца.

Электрарухаючая сіла (ЭРС) — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам работы пабочнай сілы па перамяшчэнні дадатнага электрычнага зараду ўнутры крыніцы току ад яго адмоўнага полюса да дадатнага да значэння гэтага зараду: $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{паб}}}{q}$.

Электростатыка — раздзел электрадынамікі, у якім вывучаюць узаемадзеянне нерухомых у некаторай інерцыяльнай сістэме адліку электрычна зараджаных цел, размеркаванне зараду на якіх не змяняецца з цягам часу, а таксама электростатычныя палі, створаныя зарадамаі такіх цел.

Электростатычнае поле — поле, якое ствараецца нерухомымаі адносна выкарыстанай інерцыяльнай сістэмы адліку электрычнымі зарадамаі.

Электроліз — працэс выдзялення на электродах рэчыва, звязаны з акісляльна-аднаўленчымі рэакцыямаі, якія адбываюцца пры праходжанні электрычнага току праз растворы (расплавы) электралітаў.

Электрычная ёмістасць кандэнсатара — фізічная скалярная велічыня, роўная адносінам зараду кандэнсатара да напружання паміж яго абкладкамаі: $C = \frac{q}{U}$.

Электрычны зарад — фізічная скалярная велічыня, якая характарызуе інтэнсіўнасць электрамагнітнага ўзаемадзеяння цел (часціц).

Электрычны ток — накіраваны (упарадкаваны) рух зараджаных часціц — носьбітаў зараду.

Прадметны паказальнік

А

Агрэгатны стан рэчыва
 газападобны 18
 вадкі 56
 плазменны 228
 цвёрды 49
 Аморфны стан рэчыва 54
 Ампер (адзінка сілы электрычнага току) 178
 Анізатрапія 52
 Асноўныя палажэнні МКТ 7
 Асноўнае ўраўненне МКТ 20
 Атамная адзінка масы 14

В

Вебер (адзінка магнітнага патоку) 198
 Вільготнасць паветра
 абсалютная 63
 адносная 64
 Вольт
 (адзінка патэнцыялу электростатычнага поля) 137
 (адзінка рознасці патэнцыялаў поля) 141
 Выпарэнне 60

Г

Газ
 ідэальны 19
 Гальванапластыка 222
 Гальванастэгія 222
 Генры (адзінка індуктыўнасці) 206

Д

Дыфузія 10
 Дыэлектрычная пранікальнасць рэчыва 120

З

Закон
 Ампера 188
 Кулона 118
 тэрмадынамікі
 другі 98
 першы 92
 Ома
 для ўчастка электрычнага ланцуга 163
 для поўнага электрычнага ланцуга 169
 захавання і ператварэння энергіі 91
 захавання электрычнага зараду 115
 электрамагнітнай індукцыі 203
 Заряд
 пробны 124
 пунктавы 117
 электрычны 113
 элементарны 113
 Звышправоднасць 219

І

Ізабара 38
 Ізапрацэс 36
 ізабарны 37
 ізатэрмічны 36
 ізахорны 38
 Ізатэрма 37
 Ізатропнасць 53
 Ізахора 39
 Індукцыя магнітнага поля 187
 Іанізацыя газу 224
 Іанізатар 225

К

- Кельвін (адзінка тэмпературы) 26
- Кандэнсатар 146
 - плоскі 149
- Кандэнсацыя 60
- Канцэнтрацыя часціц 10
- Кароткае замыканне 170
- Каэфіцыент
 - карыснага дзеяння
 - крыніцы току 171
 - цеплавога рухавіка 100
 - тэрмічны 100
 - эфектыўны 101
 - самаіндукцыі (індуктыўнасць) 206
- Колькасць
 - рэчыва 14
 - цеплаты 84
- Кулон (адзінка электрычнага зараду) 113

Л

- Лініі
 - напружанасці электростатычнага поля 132
 - індукцыі магнітнага поля 181

М

- Магнітны паток 197
- Маса
 - малярная 15
 - адносная малекулярная (атамная) 14
- Малекулярная фізіка 5
- Малекулярна-кінетычнай тэорыя 5
- Монакрышталі 52

Н

- Напружанасць электростатычнага поля 126

П

- Пара
 - насычаная 61
 - ненасычаная 62
 - перанасычаная 66
- Параметры
 - макраскапічныя 19
 - мікраскапічныя 19
- Плазма 228
- Поле
 - віхравое 181
 - магнітнае 176
 - аднароднае 133, 182
 - патэнцыяльнае 135
 - электрычнае 249
 - электростатычнае 124
- Полікрышталі 53
- Паўправаднікі
 - дзірачныя (p -тыпу) 233
 - электронныя (n -тыпу) 232
- Пастаянная
 - Авагадра 15
 - Больцмана 26
 - універсальная газавая 33
 - электрычная 118
- Патэнцыял электростатычнага поля 137
- Правіла
 - свядзёлка 181
 - левай рукі 188, 193
 - Ленца 201
 - правай рукі 182
 - гадзіннікавай стрэлкі 183
- Прынцып суперпазіцыі
 - для патэнцыялу электростатычнага поля 137
 - магнітных палёў 188
 - электростатычных палёў 128

- Праводнасць
 дзірачная 233
 іонная 222
 іонна-электронная 225
 прымесная 232
 уласная 231
 электронная 217
- Працэс
 ізабарны 37
 ізатэрмічны 36
 ізахорны 38
- Псіхрометр 66
 Пункт расы 66
- Р**
- Работа
 газу 77
 сілы
 электрычнага току 168
 электростатычнага поля 134
- Разрад
 газавы 225
 несамастойны 225
 самастойны 225
 дугавы 226
 іскравы 227
 каронны 226
 тлеючы 225
- Раўнавага
 цеплавая 24
 дынамічная 60
- Рознасць патэнцыялаў 141
 Рухавік цеплавы 99
 Рух
 броўнаўскі 9
 цеплавы 9
 зараджаных часціц у аднародным
 магнітным полі 193
- Рэкамбінацыя 225
- С**
- Самаіндукцыя 206
 Сіла
 Ампера 187
 Лорэнца 192
 току 163
 кароткага замыкання 170
- Сілы
 магнітныя 178
 міжмалекулярнага
 ўзаемадзеяння 11
 пабочныя 165
- Сістэма
 ізаляваная (замкнутая) 24
 тэрмадынамічная 71
- Скорасць сярэдняй квадратычнай 20, 27
- Т**
- Ток
 індукцыйны 199
 пастаянны 163
 электрычны 163
 у газах 224
 у металах 217
 у паўправадніках 230
 у электралітах 221
- Тэмпература абсалютная 26
 Тэрмадынаміка 5
 Тэрмометр супраціўлення 219
 Тэрмарэзістар 233
 Тэсла (адзінка індукцыі магнітнага поля) 187
- У**
- Удзельная
 цеплаёмістасць рэчыва 84
 цеплата
 параўтварэння 85

плаўлення 85
згарання паліва 86
Узаемадзеянне
магнітнае 175
электростатычнае 175
Ураўненне стану
ідэальнага газу 31
Клапейрона — Мендзялеева 33
Участак ланцуга
знешні 166
унутраны 166

Ф

Фарад (адзінка электраёмістасці) 148
Фотарэзістар 233

Ц

Цела
крышталічнае 49
макраскапічнае 6
монакрышталічнае 52
Цеплаабмен 83
Ціск
ідэальнага газу 20
насычанай пары 61
парцыяльны 33

Ш

Шкала тэмпературная 26

Э

Электрарухаючая сіла (ЭРС)
індукцыі 199
крыніцы току 166
самаіндукцыі 206
Электрадынаміка 111
Электраёмістасць
кандэнсатара 148
плоскага кандэнсатара 150
Электроліз 222
Электраліт 221
Электрамагнітная індукцыя 200
Электростатыка 112
Энергія
унутраная 72
ідэальнага аднаатамнага газу 73
іанізацыі 224
сярэдняя кінетычная паступальнага руху малекул 20
электростатычнага поля кандэнсатара 154
магнітнага поля шпулі 208

ЗМЕСТ

Як працаваць з вучэбным дапаможнікам 3

МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА

РАЗДЗЕЛ 1. АСНОВЫ МАЛЕКУЛЯРНА-КІНЕТЫЧНАЙ ТЭОРЫ

§ 1. Асноўныя палажэнні малекулярна-кінетычнай тэорыі	7
§ 2. Маса і памеры малекул. Колькасць рэчыва	13
§ 3. Макра- і мікрапараметры. Ідэальны газ. Асноўнае ўраўненне малекулярна-кінетычнай тэорыі ідэальнага газу.	18
§ 4. Цеплавая раўнавага. Тэмпература — мера сярэдняй кінетычнай энергіі цеплавога руху часціц рэчыва	24
§ 5. Ураўненне стану ідэальнага газу	31
§ 6. Ізатэрмічны, ізабарны і ізохорны працэсы.	36
Абагульненне і сістэматызацыя ведаў.	44
§ 7. Будова і ўласцівасці цвёрдых цел	49
§ 8. Будова і ўласцівасці вадкасцей	56
§ 9. Выпарэнне і кандэнсацыя. Насычаная пара	59
§ 10. Вільготнасць паветра	63

РАЗДЗЕЛ 2. АСНОВЫ ТЭРМАДЫНАМІКІ

§ 11. Тэрмадынамічная сістэма. Унутраная энергія. Унутраная энергія ідэальнага аднаатамнага газу	71
§ 12. Работа ў тэрмадынаміцы.	77
§ 13. Колькасць цеплаты	83
§ 14. Першы закон тэрмадынамікі. Прымяненне першага закона тэрмадынамікі да ізапрацэсаў змянення стану ідэальнага газу.	91
§ 15. Цеплавые рухавікі. Прынцып дзеяння цеплавых рухавікоў і іх ККД. Экалагічныя праблемы выкарыстання цеплавых рухавікоў	98
Абагульненне і сістэматызацыя ведаў.	106
Тэмы практных заданняў да часткі «Малекулярная фізіка»	110

ЭЛЕКТРАДЫНАМІКА

РАЗДЗЕЛ 3. ЭЛЕКТРАСТАТЫКА

§ 16. Электрычны зарад. Закон захавання электрычнага зараду.	112
§ 17. Узаемадзеянне пунктавых зарадаў. Закон Кулона.	117
§ 18. Электростатычнае поле.	124
§ 19. Напружанасць электростатычнага поля. Прынцып суперпазіцыі	126
§ 20. Лініі напружанасці электростатычнага поля	132

§ 21. Работа сілы аднароднага электростатычнага поля. Патэнцыял	134
§ 22. Рознасць патэнцыялаў электростатычнага поля. Напружанне. Сувязь паміж напружаннем і напружанасцю аднароднага электростатычнага поля	141
§ 23. Кандэнсатары. Электраёмістасць кандэнсатара. Электраёмістасць плоскага кандэнсатара	146
§ 24. Энергія электростатычнага поля кандэнсатара.	153
Абагульненне і сістэматызацыя ведаў.	158

РАЗДЗЕЛ 4. ПАСТАЯННЫ ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК

§ 25. Умовы існавання пастаяннага электрычнага току. Пабочныя сілы. ЭРС крыніцы току	165
§ 26. Закон Ома для поўнага электрычнага ланцуга. КҚД крыніцы току	168

РАЗДЗЕЛ 5. МАГНІТНАЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЯ ІНДУКЦЫЯ

§ 27. Дзеянне магнітнага поля на праваднік з токам. Узаемадзеянне праваднікоў з токам	175
§ 28. Індукцыя магнітнага поля. Лініі індукцыі магнітнага поля	180
§ 29. Сіла Ампера. Прынцып суперпазіцыі магнітных палёў	186
§ 30. Сіла Лорэнца. Рух зараджаных часціц у магнітным полі	191
§ 31. Магнітны паток. З'ява электрамагнітнай індукцыі.	197
§ 32. Правіла Ленца. Закон электрамагнітнай індукцыі	201
§ 33. З'ява самаіндукцыі. Індуктыўнасць. Энергія магнітнага поля шпулі з токам	206
Абагульненне і сістэматызацыя ведаў.	212

РАЗДЗЕЛ 6. ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК У РОЗНЫХ АСЯРОДДЗЯХ

§ 34. Электрычны ток у металах. Звышправоднасць	217
§ 35. Электрычны ток у электралітах.	220
§ 36. Электрычны ток у газах. Плазма.	224
§ 37. Электрычны ток у паўправадніках. Уласная і прымесная праводнасці паўправаднікоў	229
Абагульненне і сістэматызацыя ведаў.	236
Тэмы практных заданняў да часткі «Электрадынаміка».	237
Лабараторны эксперымент	238
Дадатак.	247
Адказы	250
Гласарый.	254
Прадметны паказальнік	258

(Назва ўстановы адукацыі)

Навучальны год	Імя і прозвішча вучня	Стан вучэбнага дапаможніка пры атрыманні	Адзнака вучню за карыстанне вучэбным дапаможнікам
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			

Вучэбнае выданне

Грамыка Алена Уладзіміраўна
Зяньковіч Уладзімір Іванавіч
Луцэвіч Аляксандр Аляксандравіч
Слесар Інеса Эдуардаўна

Фізіка

Вучэбны дапаможнік для 10 класа ўстаноў агульнай сярэдняй адукацыі з беларускай мовай навучання
(з электронным дадаткам для павышанага ўзроўню)

Рэдактар *Г. І. Кашэўнікава*
Тэхнічныя рэдактары *І. М. Кузьмянкова, А. П. Шаціла*
Мастак вокладкі *К. У. Максімава*
Мастакі *А. А. Ламанавы, К. К. Шастойскі*
Камп'ютарны набор *А. П. Шацілы*
Камп'ютарная вёрстка *І. М. Кузьмянковай, А. П. Шацілы*
Карэктары *Г. І. Кашэўнікава, М. М. Шавыркiна*

Падпісана да друку 15.01.2020. Фармат 70×90^{1/16}. Папера афсетная. Друк афсетны.
Ум. друк. арк. 16,5. Ул.-выд. арк. 14,0. Тыраж 11 230 экз. Заказ

Рэспубліканскае ўнітарнае прадпрыемства «Выдавецтва “Адукацыя і выхаванне”».
Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы,
распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 1/19 ад 02.08.2013.
Вул. Будзённага, 21, 220070, г. Мінск.

Рэспубліканскае ўнітарнае прадпрыемства «Выдавецтва “Беларускі Дом друку”».
Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі выдаўца, вытворцы,
распаўсюджвальніка друкаваных выданняў № 2/102 ад 01.04.2014.
Пр-т Незалежнасці, 79, 220013, г. Мінск.

Правообладатель Адукацыя і выхаванне

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА


Перьяды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т А Ў																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
	IA																	VIIIA						
1	1,00794 H 1 ВАДАРОД																	4,0026 He 2 ГЕЛІЙ						
2	6,941 Li 3 ЛІТЫЙ	9,0122 Be 4 БЕРЫЛІЙ																	10,811 B 5 БОР	12,011 C 6 ВУГЛЯРОД	14,007 N 7 АЗОТ	15,9994 O 8 КІСЛАРОД	18,9984 F 9 ФТОР	20,1797 Ne 10 НЕОН
3	22,9898 Na 11 НАТРЫЙ	24,305 Mg 12 МАГНІЙ																	26,9815 Al 13 АЛЮМІНІЙ	28,086 Si 14 КРЭМНІЙ	30,9738 P 15 ФОСФАР	32,066 S 16 СЕРА	35,452 Cl 17 ХЛОР	39,948 Ar 18 АРГОН
4	39,0983 K 19 КАЛІЙ	40,078 Ca 20 КАЛЬЦЫЙ	44,956 Sc 21 СКАНДЫЙ	47,87 Ti 22 ТЫТАН	50,942 V 23 ВАНАДЫЙ	51,996 Cr 24 ХРОМ	54,938 Mn 25 МАРГАНЕЦ	55,845 Fe 26 ЖАЛЕЗА	58,933 Co 27 КОБАЛЬТ	58,693 Ni 28 НІКЕЛЬ	63,546 Cu 29 МЕДЗЬ	65,39 Zn 30 ЦЫНК	69,723 Ga 31 ГАЛІЙ	72,61 Ge 32 ГЕРМАНІЙ	74,922 As 33 МЫШ'ЯК	78,96 Se 34 СЕЛЕН	79,904 Br 35 БРОМ	83,80 Kr 36 КРЫПТОН						
5	85,468 Rb 37 РУБІДЫЙ	87,62 Sr 38 СТРОНЦЫЙ	88,906 Y 39 ІТРЫЙ	91,224 Zr 40 ЦЫРКОНІЙ	92,906 Nb 41 НІОБІЙ	95,94 Mo 42 МАЛБЕДЭН	[98] Tc 43 ТЭКНЕЦЫЙ	101,07 Ru 44 РУТЭНІЙ	102,905 Rh 45 РОДЫЙ	106,42 Pd 46 ПАЛАДЫЙ	107,868 Ag 47 СЕРАБРО	112,411 Cd 48 КАДМІЙ	114,82 In 49 ІНДЫЙ	118,71 Sn 50 ВОЛАВА	121,76 Sb 51 СУРМА	127,60 Te 52 ТЭЛУР	126,904 I 53 ЁД	131,29 Xe 54 КСЕНОН						
6	132,905 Cs 55 ЦЭСІЙ	137,327 Ba 56 БАРЫЙ	57-71 [Lanthanides]	178,49 Hf 72 ГАФНІЙ	180,9479 Ta 73 ТАНТАЛ	183,85 W 74 ВАЛЬФРАМ	186,207 Re 75 РЭНІЙ	190,2 Os 76 ОСМІЙ	192,22 Ir 77 ІРЫДЫЙ	195,08 Pt 78 ПЛАЦІНА	196,96654 Au 79 ЗОЛАТА	200,59 Hg 80 РТУЦЬ	204,3833 Tl 81 ТАЛІЙ	207,2 Pb 82 СВІНЕЦ	208,98037 Bi 83 БІСМУТ	208,9824 Po 84 ПАЛОНІЙ	209,9871 At 85 АСТАТ	222,0176 Rn 86 РАДОН						
7	[223] Fr 87 ФРАНЦЫЙ	[226] Ra 88 РАДЫЙ	89-103 [Actinides]	[261] Rf 104 РЭЗЕРФОРДЫЙ	[262] Db 105 ДУБНІЙ	[266] Sg 106 СІБОРГІЙ	[264] Bh 107 БОРЫЙ	[269] Hs 108 ХАСІЙ	[268] Mt 109 МЭЙТНЕРЫЙ	[271] Ds 110 ДАРМШТАТЫЙ	[272] Rg 111 РЭНТГЕНІЙ	[277] Cn 112 КАПЕРНІКІЙ	[286] Nh 113 НІХОНІЙ	[289] Fl 114 ФЛЕРОВІЙ	[289] Mc 115 МАСКОВІЙ	[293] Lv 116 ЛІВЕМОРЫЙ	[294] Ts 117 ТЭНСІН	[294] Og 118 АГАНЕСОН						
8	[316] Uue 119 УНУНЕНІЙ	[320] Ubn 120 УНБІНІЙ	121-126 [Superactinides]																					

Адносная атамная маса

Сімвал элемента

Атамны нумар

Назва элемента



Перьядычны закон Д. І. Мендзялеева

Уласціваці атамаў хімічных элементаў, а таксама састаў і ўласціваці ўтвораных імі рэчываў знаходзяцца ў перьядычнай залежнасці ад зарадаў атамных ядраў.

Лантаніды

[316] La 57 ЛАНТАН	140,115 Ce 58 ЦЭРЫЙ	140,907 Pr 59 ПРАЗЕАДЫЙ	144,24 Nd 60 НЕАДЫЙ	144,913 Pm 61 ПРАМЕТЫЙ	150,36 Sm 62 САМАРЫЙ	151,965 Eu 63 ЕВРОПІЙ	157,25 Gd 64 ГАДАЛІНІЙ	158,92534 Tb 65 ТЭРЫЙ	162,50 Dy 66 ДЫСПРОЗІЙ	164,93032 Ho 67 ГОЛЬМІЙ	167,26 Er 68 ЭРЫЙ	168,93421 Tm 69 ТУЛІЙ	173,04 Yb 70 ІТЭРЫЙ	174,967 Lu 71 ЛЮТЭЦЫЙ
------------------------------------	-------------------------------------	---	-------------------------------------	--	--------------------------------------	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--	---	-----------------------------------	---------------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------

Актыніды

[227] Ac 89 АКТЫНІЙ	232,0381 Th 90 ТОРЫЙ	231,0359 Pa 91 ПРАТАКТЫНІЙ	238,0289 U 92 УРАН	237,0482 Np 93 НЕПУНІЙ	244,0642 Pu 94 ПЛУТОНІЙ	243,0614 Am 95 АМЕРЫЦЫЙ	247,0703 Cm 96 КЮРЫЙ	247,0703 Bk 97 БЕРКЛІЙ	251,0796 Cf 98 КАЛІФОРНІЙ	252,083 Es 99 ЭЙНШТЭЙНІЙ	257,0951 Fm 100 ФЕРМІЙ	258,099 Md 101 МЕНДЗЯЛЕВІЙ	259,1009 No 102 НОБЕЛІЙ	260,105 Lr 103 ЛАЎРЭНСІЙ
-------------------------------------	--------------------------------------	--	------------------------------------	--	---	---	--------------------------------------	--	---	--	--	--	---	--

Суперактыніды

[320] Ubu 121 УНБІУНІЙ	Ubb 122 УНБІБЫЙ	Ubt 123 УНБІТРЫЙ	Ubu 124 УНБІУВАДЫЙ	[332] Ubp 125 УНБІПЕНТЫЙ	Ubh 126 УНБІГЕНСІЙ
--	------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	--	---------------------------------