

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

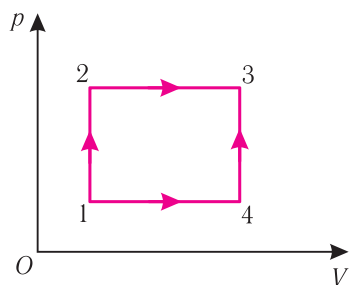
У адным выпадку газ знаходзіцца ў герметычна закрытай цепланепра-нікальнай пасудзіне, а ў другім — у шкляннай колбе. У якім выпадку газ як тэрмадынамічная сістэма з'яўляецца ізаляваным?



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:

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

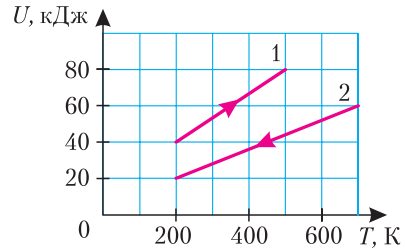
Унутраная энергія залежыць ад канкрэтнага стану сістэмы. Гэта азначае, што змяненне ўнутранай энергіі пры пераходзе тэрмадынамічнай сістэмы з аднаго стану ў другі залежыць толькі ад значэнняў параметраў гэтых станаў і не залежыць ад працэсу пераходу.

* 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 $\langle E_k \rangle$ цеплавога 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

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

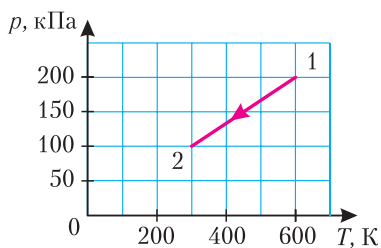
З формулы (11.1) вынікае, што ўнутраная энергія дадзенай масы ідэальнага аднаатамнага газу прапарцыянальная яго абсалютнай тэмпературы. Яна не залежыць ад іншых макраскапічных параметраў стану — ціску і аб'ёму. Такім чынам, змяненне ўнутранай энергіі дадзенай масы аднаатамнага ідэальнага газу адбываецца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

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

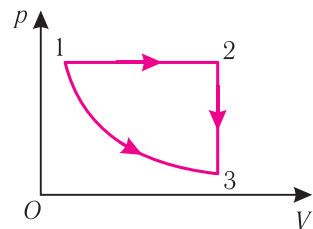
Спосабы змянення ўнутранай энергіі

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.