

§ 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 цел 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.

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

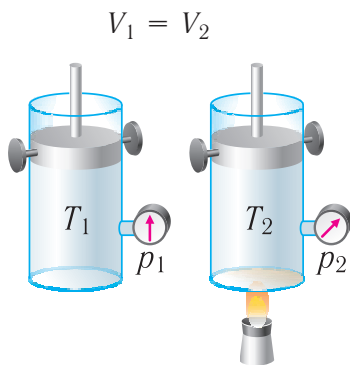
Паколькі работа знешніх сіл роўная рабоце, якая выконваецца тэрмадынамічнай сістэмай, узятай з супрацьлеглым знакам ($A' = -A$), то *першы закон тэрмадынамікі* можна сфармуляваць інакш:

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. Вывядзіце 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.

Ізакорны 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 ізакорным працэсе ўся перададзеная газу колькасць цеплаты ідзе на павелічэнне яго ўнутранай энергіі:

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

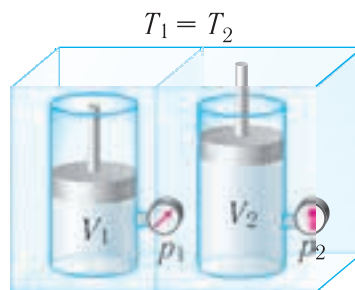
Калі газ пры ізакорным працэсе аддае пэўную колькасць цеплаты, то яго ўнутраная энергія змяншаецца: $\Delta U < 0$.

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 перамясцім 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

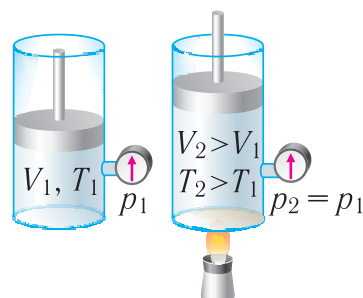
Сіла ціску ідэальнага газу падчас ізатэрмічнага расшырэння выканала работу $A = 3640$ Дж. Якую колькасць цеплаты атрымаў газ?



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

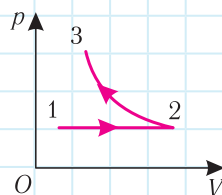
Значыць, $Q = \frac{3}{2} p \Delta V + p \Delta V = \frac{5}{2} p \Delta V$.

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

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

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 (ізатэрмічнае 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:

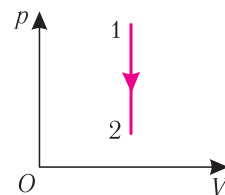
Участак графіка	Работа сілы ціску газу	Колькасць цеплаты	Прырашчэнне ўнутранай энергіі газу
$1 \rightarrow 2$	$A_{12} > 0$	$Q_{12} > 0$ (газ атрымліваў колькасць цеплаты)	$\Delta U_{12} > 0$
$2 \rightarrow 3$	$A_{23} < 0$	$Q_{23} < 0$ (газ аддаваў колькасць цеплаты)	$\Delta U_{23} = 0$



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?

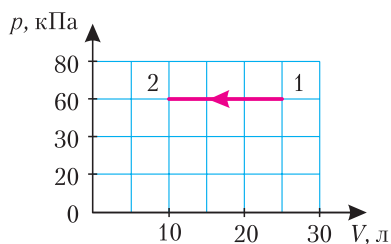


Мал. 82

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 цеплаёмістасць 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.

