

§ 6. Ізатэрмічны, ізабарны і ізахорны 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*.

Ізатэрмічны працэс. Працэс змянення стану фізічнай сістэмы пры пастаяннай 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 асяроддзем можна падтрымліваць тэмпературу газу ў пасудзіне практычна пастаяннай. Пры гэтым памяншэнне аб'ёму газу пры вярчэнні вінта 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*.

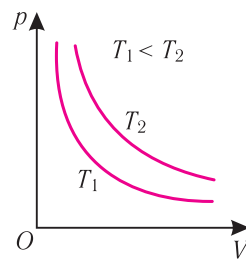
Ад тэорыі да практыкі

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

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

* Нязначнае змяненне тэмпературы газу прыняцова неабходнае для цеплаабмену з тэрмастатам — перадача цяпла магчыма 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 газаў 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.

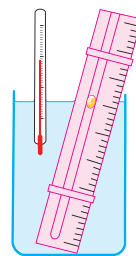
Калі пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы маса і малярная маса газу не змяняюцца, то аб'ём газу, як вынікае з ураўнення Клапейрона — Мендзялеева:

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

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

Гэтае сцвярджэнне называюць *законам Гей-Люсака*.

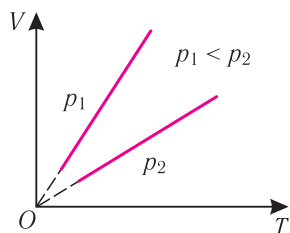
Праўдзівасць закона Гей-Люсака можна праверыць эксперыментальна, выкарыстоўваючы прыладу, паказаную на малюнку 23. Вадкасць у пасудзіне знаходзіцца ў цеплавой раўнавазе з тонкай трубкай, запоўненай паветрам, якое закрыта кропелькай алею. Пры павелічэнні тэмпературы вадкасці аб'ём паветра, што знаходзіцца 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 награванні 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.

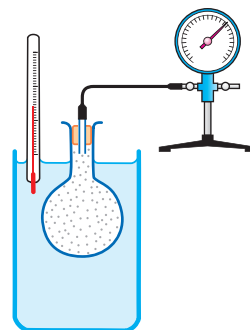
Калі пры пераходзе з пачатковага стану ў канчатковы маса і малярная маса ідэальнага газу не змяняюцца, то ціск газу, як вынікае з ураўнення Клапейрона — Мендзялеева:

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

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

Гэтае сцвярджэнне называюць *законам Шарля*.

Праўдзівасць закона Шарля можна праверыць 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

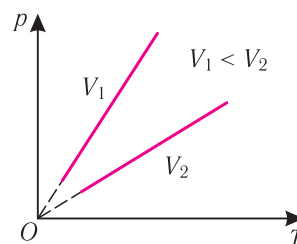
Ад тэорыі да практыкі

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

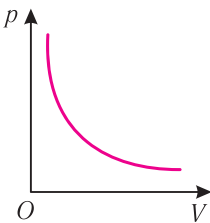
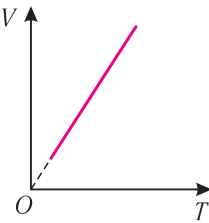
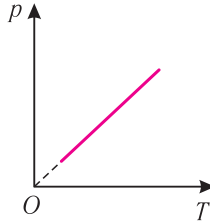
У адных і тых каардынатах (p, T) можна пабудаваць некалькі ізахор, якія адпавядаюць розным аб'ёмам дадзенай масы газу пры нязменнай малярнай масе. Аналіз суадносін (6.3) паказвае, што большаму аб'ёму адпавядае меншы нахіл ізахоры да восі тэмператур (гл. мал. 26).



Мал. 26

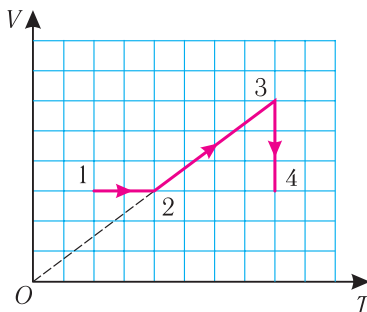
Ад тэорыі да практыкі

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

	Працэс змянення стану ідэальнага газу дадзенай масы пры нязменнай малярнай масе		
	ізатэрмічны	ізабарны	ізахорны
Пры пастаянным макраска- пічным параметры	$T = \text{const}$	$p = \text{const}$	$V = \text{const}$
Ураўненне працэсу	$p = \frac{\text{const}}{V},$ $p_1 V_1 = p_2 V_2$	$V = \text{const } T,$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$p = \text{const } T,$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
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 ізахорным 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 ізахорна 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 ізахорна перавесці газ са стану 4 у стан 2?

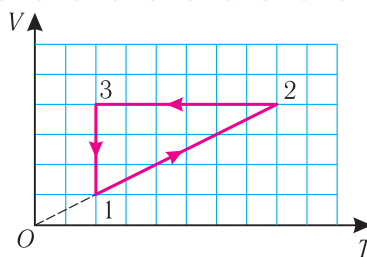


Мал. 27

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 прапарцыянальны 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:

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

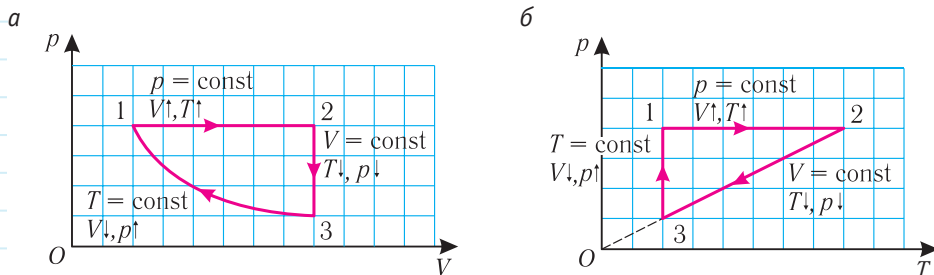
У працэсе пераходу газу са стану 2 у стан 3 застаецца пастаянным аб'ём (працэс ізохорны), а тэмпература газу памяншаецца ў 4 разы. З суадносін (6.3) вынікае, што пры ізохорным ахаладжэнні ціск газу памяншаецца прапарцыянальна яго абсалютнай тэмпературы. Таму можна запісаць:

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

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

Приклад 2. При ізотермічному розширенні ідеального газу певної маси його об'єм збільшується від $V_1 = 2,0$ л до $V_2 = 5,0$ л, а тиск зменшується на $\Delta p = -15$ кПа. Визначте початковий тиск газу.

Дано:

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

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

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

$p_1 = ?$

Розв'язуємо

Розв'язуємо. Паколькі температура і маса газу не змінюються, то його початкові і кінцеві стани зв'язані з законом Бойля — Марієта, гэта значыць $p_1 V_1 = p_2 V_2$. З уліком того, што $p_2 = p_1 + \Delta p$, атрымаем:

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

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

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

Відповідь: $p_1 = 25$ кПа.



Практикувальне 5

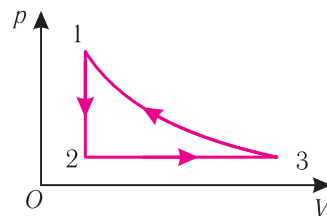
1. При ізобарному нагріванні температури ідеального газу, які знаходяться у герметично закритому циліндрі, на $\Delta T = 60,0$ К його об'єм збільшується у $\beta = 1,21$ рази. Визначте початкову абсолютну температуру газу.

2. Адіабатично графічно процес ізобарного охолодження певної маси ідеального газу у координатах (p, T) ; (V, T) ; (V, p) .

3. Ідеальний газ певної маси спочатку ізобарно розширили, а потім ізотермічно стиснули до початкового об'єму. Адіабатично графічно готує процеси у координатах (V, T) ; (p, V) .

4. На малюнку 30 приведено графік зміни стану певної маси ідеального газу. (Перехід $3 \rightarrow 1$ здійснюється при постійній температурі.) Адіабатично графічно готує процеси у координатах (T, V) і (p, T) .

5. При температурі $t_1 = -3,0$ °С манометр на балоні з стиснутим киснем показує тиск $p_1 = 1,8 \cdot 10^6$ Па, а при температурі $t_2 = 27$ °С — тиск $p_2 = 2,0 \cdot 10^6$ Па. Визначте, чи була утечка газу з балона.



Мал. 30

