

§ 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 сярэдняя 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 ўстановецца 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 ўлічваюць 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 цэламі.

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?

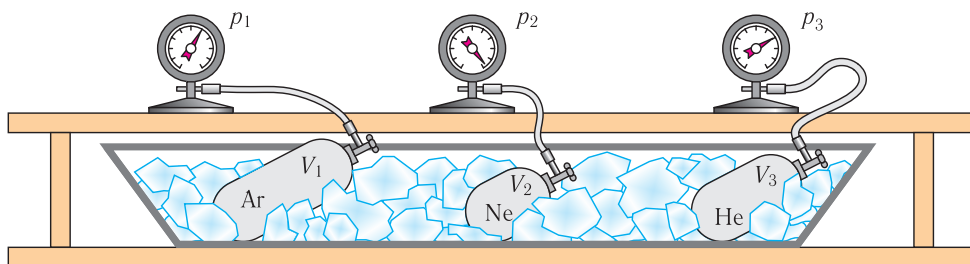
Цікава ведаць

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 — сагравальным. 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 прасты 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 газаў у ёмістасцях могуць адрознівацца. Масы газаў 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 малекулярна-кінетычнай тэорыі 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:

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

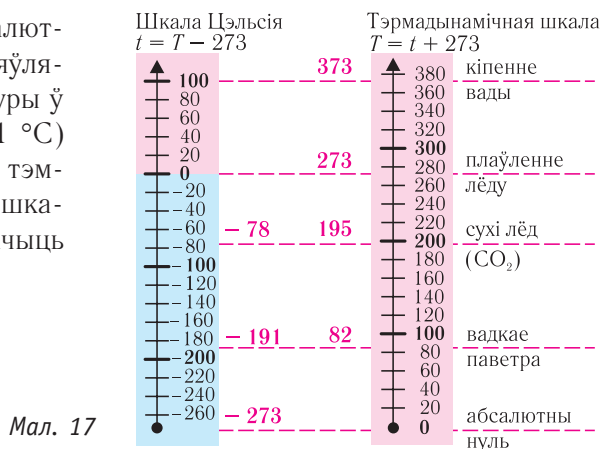
Абсалютную (тэрмадынамічную) шкалу тэмператур прапанаваў у 1848 г. вядомы англійскі фізік Уільям Томсан (1824–1907), атрымаўшы за працы ў галіне фізікі у 1892 г. тытул лорда Кельвіна. Таму гэтую шкалу звычайна называюць *шкалай Кельвіна*.

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 °C) 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: $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t_0 = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$? 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 цеплавой 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 награванні 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 распырскайце духі ці адэкалон. Праз некаторы прамежак часу пах распаўсюдзіцца па ўсім пакоі. Выкарыстоўваючы гадзіннік з секунднай стрэлкай, вызначце сярэдняю скорасць распаўсюджвання малекул духоў (адэкалону). Як узгадніць атрыманы вынік з дастаткова вялікім значэннем сярэдняй квадратычнай скорасці паступальнага руху малекул газаў?

Прыклады рашэння задач

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

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

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

$$T_1 = T_2 = T$$

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

Рашэнне. Сярэдняя квадратычная скорасць цеплагага 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

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

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

Тады

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

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.