

ЧАСТИНА 2. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ



§ 36. ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ І СПОСОБИ ЇЇ ЗМІНИ

МКТ стала загально визнаною на межі XIX і XX століть. Задовго до її створення дослідженням теплових процесів займалася *термодинаміка* — розділ фізики, що вивчає співвідношення і перетворення теплової та інших форм енергії. В основі термодинаміки лежить поняття *внутрішньої (теплової) енергії*. Про внутрішню енергію та процеси, в результаті яких вона змінюється, ви дізнаєтесь із цього параграфу.

1

Внутрішня енергія та її особливості

Внутрішня енергія макроскопічного тіла визначається характером руху та взаємодії всіх мікрочастинок, з яких складається тіло (система тіл). Таким чином, до внутрішньої енергії слід віднести:

- кінетичну енергію хаотичного (теплового) руху частинок речовини (атомів, молекул, йонів);
- потенціальну енергію взаємодії частинок речовини;
- енергію взаємодії атомів у молекулах (хімічну енергію);
- енергію взаємодії електронів і ядра в атомі (внутрішньоатомну енергію);
- енергію взаємодії нуклонів у ядрі (внутрішньоядерну енергію).

Однак для описування теплових процесів є важливим не стільки значення внутрішньої енергії, як її зміна. У ході теплових процесів хімічна енергія, а також внутрішньоатомна і внутрішньоядерна енергії практично не змінюються. Саме тому **внутрішня енергія в термодинаміці визначається як сума кінетичних енергій хаотичного (теплового) руху частинок речовини (атомів, молекул, йонів), з яких складається тіло, і потенціальних енергій їх взаємодії.**

Внутрішню енергію позначають символом U .

Одиниця внутрішньої енергії в СІ — джоуль: $[U]=1$ Дж (J).

Особливості внутрішньої енергії ідеального газу

1. Атоми і молекули ідеального газу практично не взаємодіють між собою, тому *внутрішня енергія ідеального газу дорівнює кінетичній енергії поступального та обертального рухів його частинок.*

2. *Внутрішня енергія даної маси ідеального газу прямо пропорційна його абсолютній температурі.*

Доведемо це твердження для одноатомного газу. Атоми такого газу рухаються тільки поступально, тому, щоб визначити його внутрішню енергію, слід середню кінетичну енергію поступального руху атомів $\left(\overline{E}_k = \frac{3}{2}kT\right)$

помножити на кількість атомів $\left(N = \frac{m}{M}N_A\right)$. Таким чином: $U = \overline{E}_k \cdot N = \frac{3}{2}kT \cdot \frac{m}{M}N_A = \frac{3}{2} \frac{m}{M}kN_A T$. Отже, для одноатомного ідеального газу:

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

Використавши рівняння Менделєєва — Клапейрона $pV = \frac{m}{M}RT$, вираз для внутрішньої енергії ідеального одноатомного газу можна подати так:

$$U = \frac{3}{2}pV$$

3. *Внутрішня енергія — функція стану системи*, тобто вона однозначно визначається основними макроскопічними параметрами (p , V , T), що характеризують систему, і незалежно від того, яким чином систему переведено з одного стану в інший, зміна внутрішньої енергії буде однаковою.

4. *Внутрішню енергію можна змінити двома способами: виконанням роботи і теплопередачею.*

2

Які існують види теплопередачі

Теплопередача (теплообмін) — процес зміни внутрішньої енергії тіла або частин тіла без виконання роботи.

Процес теплопередачі можливий тільки в разі наявності різниці температур. *Довільно внутрішня енергія завжди передається від більш нагрітого тіла до менш нагрітого.* Чим більша різниця температур, тим швидше — за інших рівних умов — відбувається процес передачі тепла.

Види теплопередачі		
Теплопровідність	Конвекція	Випромінювання
<p><i>Вид теплопередачі, який зумовлений хаотичним рухом частинок речовини та не супроводжується перенесенням цієї речовини.</i> Найкращими провідниками тепла є метали, погано проводять тепло дерево, скло, шкіра, рідини (крім рідких металів); найгірші провідники тепла — гази. Передача енергії від гарячої води до батареї опалення, від поверхні води до її нижніх шарів тощо відбувається завдяки теплопровідності.</p> 	<p><i>Вид теплопередачі, за якого тепло переноситься потоками рідини або газу.</i> Теплі потоки рідини або газу мають меншу густину, тому під дією архімедової сили піднімаються, а холодні потоки — опускаються. Завдяки конвекції здійснюється циркуляція повітря в приміщенні, нагрівається рідина в каструлі, що стоїть на плиті, існують вітри і морські течії та ін. <i>У твердих тілах конвекція неможлива.</i></p> 	<p><i>Вид теплопередачі, за якого енергія передається за допомогою електромагнітних хвиль.</i> Найуніверсальніший вид теплопередачі: тіла завжди випромінюють і поглинають інфрачервоні (теплові) електромагнітні хвилі. Це <i>єдиний вид теплообміну, який можливий у вакуумі</i> (енергія від Сонця передається тільки випромінюванням). <i>Краще випромінюють і поглинають енергію тіла з темною поверхнею.</i></p> 
<p>? Чому сковороду виготовляють з металу, а її ручку — з деревини? Чому вдень вітер дме з моря, а вночі — із суходолу? Чому в спеку надівають світлий одяг?</p>		

3

Як визначити кількість теплоти

Кількість теплоти Q — це фізична величина, що дорівнює енергії, яку тіло одержує (або віддає) в ході теплопередачі.

Одиниця кількості теплоти в СІ — джоуль: $[Q] = 1 \text{ Дж (J)}$.

Із курсу фізики 8 класу ви знаєте, що *кількість теплоти, яка поглинається при нагріванні речовини (або виділяється при її охолодженні), обчислюють за формулою: $Q = cm\Delta T = cm\Delta t$* , де c — питома теплоємність речовини; m — маса речовини; $\Delta T = T - T_0 = t - t_0$ — зміна температури.

Зверніть увагу! Добуток питомої теплоємності і маси речовини, з якої виготовлено тіло, називають **теплоємністю тіла**: $C = cm$.

Якщо відома теплоємність C тіла, то кількість теплоти Q , яку отримує тіло під час зміни температури на ΔT , обчислюють за формулою: $Q = C\Delta T$.

Розрахунок кількості теплоти в разі фазових переходів

Кристалічний стан \leftrightarrow Рідкий стан	Рідкий стан \leftrightarrow Газоподібний стан
Температуру, за якої відбуваються фазові переходи «кристал \rightarrow рідина» і «рідина \rightarrow кристал», називають <i>температурою плавлення</i> — вона залежить від роду речовини і зовнішнього тиску. Кількість теплоти Q , яка поглинається при плавленні кристалічної речовини (або виділяється при кристалізації рідини), обчислюють за формулою: $Q = \lambda m,$ де m — маса речовини; λ — питома теплота плавлення.	Фазові переходи «рідина \rightarrow пара» і «пара \rightarrow рідина» відбуваються за будь-якої температури. Кількість теплоти Q , яка поглинається при пароутворенні (або виділяється при конденсації), обчислюють за формулою: $Q = rm, \text{ або } Q = Lm,$ де m — маса речовини; $r(L)$ — питома теплота пароутворення за даної температури (зазвичай у таблицях подають питому теплоту пароутворення за температури кипіння рідини).
Нагадаємо: і під час плавлення, і під час кипіння температура речовини не змінюється.	

4

Учимося розв'язувати задачі

Задача 1. Неон масою 100 г міститься в колбі об'ємом 5,0 л. У процесі ізохорного охолодження тиск неону зменшився від 100 до 50 кПа. На скільки при цьому змінилися внутрішня енергія і температура неону?

Дано:

$$m = 0,10 \text{ кг}$$

$$V = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$p_1 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$p_2 = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$M = 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

$$\Delta U \text{ — ?}$$

$$\Delta T \text{ — ?}$$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. Неон — одноатомний газ; для таких газів зміна внутрішньої енергії дорівнює:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2 - \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T,$$

$$\text{або } \Delta U = \frac{3}{2} p_2 V_2 - \frac{3}{2} p_1 V_1.$$

Оскільки охолодження ізохорне, об'єм неону не змінюється: $V_1 = V_2 = V$.

Після перетворень маємо: $\Delta U = \frac{3}{2} V(p_2 - p_1)$; $\Delta T = \frac{2M\Delta U}{3mR}$.

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[\Delta U] = \text{м}^3 \cdot \text{Па} = \text{м}^3 \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}; \quad \Delta U = \frac{3}{2} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,5 \cdot 10^5) = -375 \text{ (Дж)};$$

$$[\Delta T] = \frac{\text{кг} / \text{моль} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})} = \text{К}; \quad \Delta T = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot (-375)}{3 \cdot 0,1 \cdot 8,31} = -6 \text{ (К)}.$$

Аналіз результатів. Знак «-» свідчить про те, що внутрішня енергія і температура неону зменшилися, — це відповідає ізохорному охолодженню.

Відповідь: $\Delta U = -375$ Дж; $\Delta T = -6$ К.

Задача 2. Внутрішня алюмінієва посудина калориметра має масу 50 г і містить 200 г води за температури 30 °С. У посудину кинули кубики льоду за температури 0 °С, унаслідок чого температура води в калориметрі знизилася до 20 °С. Визначте масу льоду. Питомі теплоємності води та алюмінію дорівнюють: $c_{\text{в}} = 4200$ Дж/(кг·К), $c_{\text{Al}} = 920$ Дж/(кг·К); питома теплота плавлення льоду — 334 кДж/кг.

Аналіз фізичної проблеми. Калориметр має таку будову, що теплообмін із довкіллям майже відсутній, тому для розв'язання задачі скористаємося рівнянням теплового балансу. У теплообміні беруть участь три тіла: вода, внутрішня посудина калориметра, лід.

<p><i>Дано:</i> $m_{\text{Al}} = 0,05$ кг $m_{\text{в}} = 0,2$ кг $t_{\text{в}} = t_{\text{Al}} = 30$ °С $t_{\text{л}} = 0$ °С $t = 20$ °С $c_{\text{в}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ $c_{\text{Al}} = 920 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ $\lambda = 334 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ $m_{\text{л}} = ?$</p>	<p style="text-align: center;"><i>Віддають енергію</i> вода + алюміній</p> <p>охолоджуються від 30 до 20 °С;</p> <p>$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t_1$, $Q_{\text{Al}} = c_{\text{Al}} m_{\text{Al}} \Delta t_1$; $\Delta t_1 = 30 \text{ °С} - 20 \text{ °С} = 10 \text{ °С} = 10 \text{ К}.$</p> <p>Запишемо рівняння теплового балансу: $c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t_1 + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}} \Delta t_1 = \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m_{\text{л}} \Delta t_2.$</p> <p>Після перетворень маємо: $\Delta t_1 (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}}) = m_{\text{л}} (\lambda + c_{\text{в}} \Delta t_2) \Rightarrow m_{\text{л}} = \frac{ \Delta t_1 (c_{\text{в}} m_{\text{в}} + c_{\text{Al}} m_{\text{Al}})}{\lambda + c_{\text{в}} \Delta t_2}.$</p> <p>Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини: $[m_{\text{л}}] = \left(\text{К} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot \text{кг} \right) : \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{Дж}} = \text{кг};$ $m_{\text{л}} = \frac{10 \cdot (4200 \cdot 0,2 + 920 \cdot 0,05)}{334000 + 4200 \cdot 20} \approx 0,021 \text{ (кг)}.$</p> <p><i>Відповідь:</i> $m_{\text{л}} = 21$ г.</p>	<p style="text-align: center;"><i>Отримує енергію</i> лід</p> <p>плавиться + отримана вода нагрівається від 0 до 20 °С; $Q_{\text{л}} = \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m_{\text{л}} \Delta t_2$; $\Delta t_2 = 20 \text{ °С} - 0 \text{ °С} = 20 \text{ °С} = 20 \text{ К}.$</p>
--	---	---



Підбиваємо підсумки

- У термодинаміці внутрішню енергію U тіла розуміють як суму кінетичної енергії хаотичного руху частинок речовини, з яких складається тіло, і потенціальної енергії їх взаємодії. Внутрішня енергія — функція стану системи, вона однозначно визначається основними макроскопічними параметрами (p , V , T), що характеризують систему. Внутрішню енергію ідеального одноатомного газу визначають за формулами: $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$; $U = \frac{3}{2} pV$.

- Внутрішню енергію можна змінити двома способами: виконанням роботи і теплопередачею. Теплопередача (теплообмін) — процес зміни

внутрішньої енергії тіла або частин тіла без виконання роботи. Існує три види теплопередачі: теплопровідність, конвекція, випромінювання.

• Фізичну величину, що дорівнює енергії, яку тіло одержує або віддає в ході теплопередачі, називають кількістю теплоти Q . Кількість теплоти можна обчислити за формулами: $Q = cm\Delta T = C\Delta T$ — кількість теплоти, яка поглинається при нагріванні тіла (або виділяється при його охолодженні); $Q = \lambda m$ — кількість теплоти, яка поглинається при плавленні речовини (або виділяється при її кристалізації); $Q = Lm$ — кількість теплоти, яка поглинається при пароутворенні речовини (або виділяється при її конденсації).



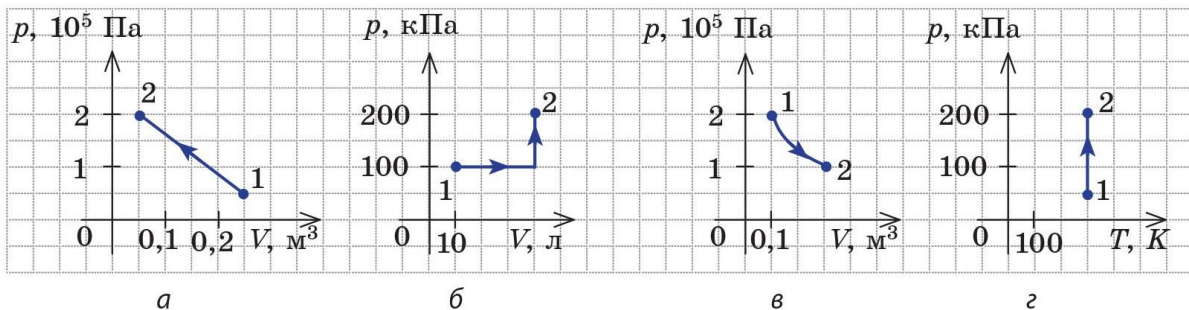
Контрольні запитання

1. Дайте означення внутрішньої енергії.
2. Виведіть формули для розрахунку внутрішньої енергії ідеального одноатомного газу. Чому цими формулами не можна скористатися, якщо молекули газу складаються з більш ніж одного атома?
3. Які способи зміни внутрішньої енергії ви знаєте?
4. Що таке теплопередача?
5. Які існують види теплопередачі? Дайте їх означення, наведіть приклади.
6. Як розрахувати кількість теплоти, передану тілу під час нагрівання (або виділену ним під час охолодження)?
7. Дайте означення питомої теплоємності тіла.
8. Як обчислити кількість теплоти, необхідну для плавлення кристалічної речовини? для перетворення рідини на пару?



Вправа № 36

1. Аргон масою 300 г охолоджується від 200 до 50 °С. Визначте зміну внутрішньої енергії аргону.
2. Об'єм неону масою 40 г у ході ізобарного розширення збільшився від 12 до 15 л. Визначте зміну внутрішньої енергії і зміну температури неону, якщо його тиск дорівнює 50 кПа.
3. Ідеальний одноатомний газ переходить зі стану 1 у стан 2 (рис. *a-г*). Для кожного випадку визначте зміну внутрішньої енергії газу.



4. Залізний брусок масою 600 г нагріли у воді, що кипить, і опустили в посудину з водою, температура якої 10 °С. У результаті температура води підвищилася до 12 °С. Визначте масу води, якщо теплоємність посудини 100 Дж/К; питома теплоємність заліза 460 Дж/(кг·К); питома теплоємність води 4200 Дж/(кг·К). Втратами енергії знехтуйте.
5. У суміш, яка складається з 20 л води і 1 кг льоду, влили розплавлений свинець за температури плавлення (327 °С). У результаті температура води стала дорівнювати 100 °С, причому 100 г води перейшло в пару. Визначте масу влитого свинцю. Питома теплоємність свинцю становить 125 Дж/(кг·К), води — 4200 Дж/(кг·К); питома теплота плавлення свинцю 21 кДж/кг, льоду — 334 кДж/кг; питома теплота пароутворення води — 2,3 МДж/кг.