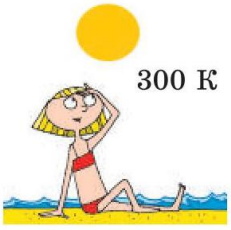
§ 29. ТЕМПЕРАТУРА. ТЕМПЕРАТУРНА ШКАЛА КЕЛЬВІНА



Перш ніж, наприклад, піти на пляж, багато хто цікавиться прогнозом погоди. І якщо очікується температура повітря 10 °С, то, найімовірніше, плани буде змінено. А чи варто відмовлятися від прогулянки, якщо прогнозується температура 300 К (кельвінів)? І що насправді вкладають фізики в поняття «температура»?

1 Що таке температура

Експерименти показують, що в цілій низці випадків макроскопічна система переходить із одного стану в інший. Наприклад, якщо в морозний день занести в кімнату кульку, наповнену гелієм, то гелій у кульці буде поступово нагріватись і при цьому змінюватимуться тиск, об'єм і деякі інші параметри газу. Після того як кулька пробуде в кімнаті певний час, зміни припиняться. Один із постулатів молекулярної фізики і термодинаміки — його ще називають **нульове начало термодинаміки** — стверджує: *будь-яке макроскопічне тіло або система тіл за незмінних зовнішніх умов самочинно переходять у термодинамічний рівноважний стан (стан теплової рівноваги), після досягнення якого всі частини системи мають однакову температуру.*

Нульове начало термодинаміки фактично вводить і визначає поняття *температури*.

Температура — фізична величина, яка характеризує стан теплової рівноваги макроскопічної системи.

Стан теплової рівноваги — це такий стан макроскопічної системи, коли всі макроскопічні параметри системи залишаються незмінними як завгодно довго.

Зверніть увагу! У стані теплової рівноваги всі частини системи мають однакову температуру, при цьому їхні інші макроскопічні параметри можуть бути різними. Згадайте приклад із кулькою: після того як встановиться теплова рівновага, температура навколишнього повітря і температура гелію в кульці будуть однаковими, а тиск, густина та об'єм — різними.

2 Як працюють термометри

Температура — це фізична величина, отже, її можна вимірювати. Для цього треба встановити *шкалу температур*. Найпоширенішими температурними шкалами є шкали Цельсія, Кельвіна, Фаренгейта (рис. 29.1).

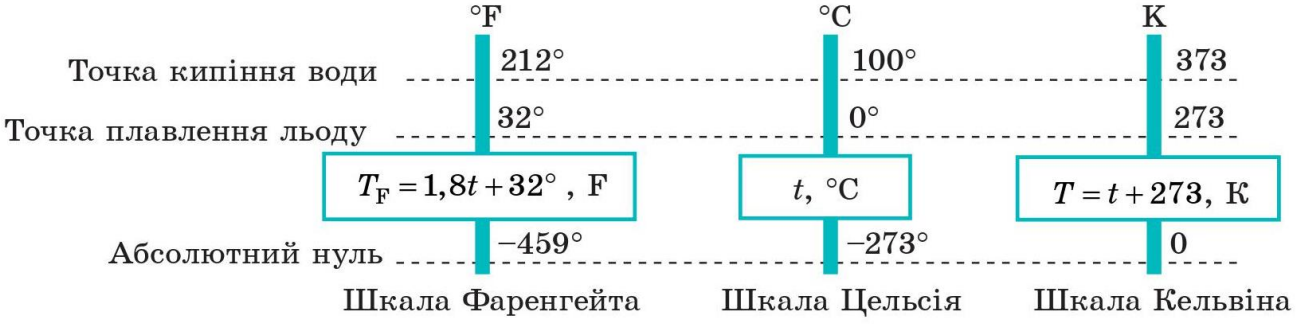


Рис. 29.1. Сучасні температурні шкали

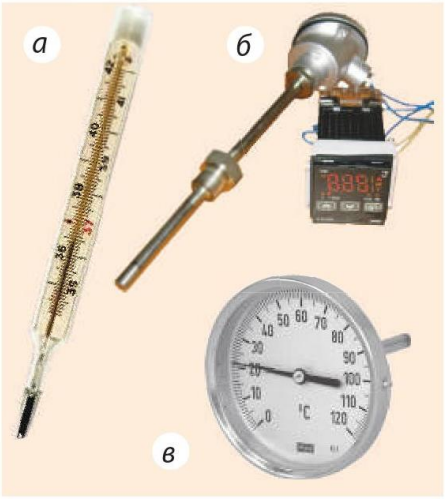


Рис. 29.2. Різні види термометрів і принципи їх дії:
а — рідинний (зміна об'єму рідини зі зміною температури);
б — термометр опору (зміна опору провідника зі зміною температури);
в — біметалевий деформаційний (зміна довжин двох різних металевих пластин зі зміною температури)

Побудова шкали температур починається з вибору *реперних (опорних) точок*, що мають бути однозначно пов'язані з якимись фізичними процесами, які легко відтворити. Наприклад, за *нульову точку* **температурної шкали Цельсія** взято *температуру танення льоду* за нормального атмосферного тиску ($t = 0$ °C). *Температурі кипіння води* за нормального атмосферного тиску приписують значення $t = 100$ °C. *Одиниця температури за шкалою Цельсія* — **градус Цельсія:**

$$[t] = 1 \text{ °C } (\text{°C}).$$

Прилади для вимірювання температури — **термометри** (рис. 29.2). Основними частинами будь-якого термометра є *термометричне тіло* (ртуть або спирт у рідинному термометрі, біметалева пластина в металевому деформаційному термометрі тощо) і *шкала*. Якщо термометричне тіло привести в тепловий контакт із тілом, температуру якого потрібно виміряти, то система набуде нерівноважного стану. У процесі переходу в рівноважний стан змінюватимуться деякі макроскопічні параметри термометричного тіла (об'єм, електричний опір тощо). Знаючи, як ці параметри залежать від температури, визначають температуру тіла.

Зверніть увагу!

- Термометр фіксує *власну температуру*, що дорівнює температурі тіла, з яким термометр перебуває в термодинамічній рівновазі.
- Термометричне тіло не має бути масивним, інакше воно суттєво змінить температуру тіла, з яким контактує.

3 Температура і середня кінетична енергія молекул

Те, що температура тіла має бути пов'язана з кінетичною енергією його молекул, випливає з простих міркувань. Наприклад, зі збільшенням температури збільшується швидкість руху броунівських частинок, прискорюється дифузія, збільшується тиск газу, а це означає, що молекули рухаються швидше і їх кінетична енергія стає більшою. Можна припустити: *якщо гази перебувають у стані теплової рівноваги, то середні кінетичні енергії молекул цих газів будуть однаковими*. Але як це довести, адже безпосередньо виміряти ці енергії неможливо?

Звернемося до основного рівняння МКТ ідеального газу: $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k$. За означенням $n = \frac{N}{V}$, тому $p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k$. Після перетворень маємо: $\bar{E}_k = \frac{3}{2} \frac{pV}{N}$.

Таким чином, щоб експериментально переконатись у рівності середніх кінетичних енергій молекул різних газів за однакової температури, потрібно виміряти об'єми (V), тиски (p) та маси (m) газів і, знаючи їх молярну масу (M), знайти число молекул кожного газу (N) за формулою $N = \frac{m}{M} N_A$.

Щоб забезпечити однакову температуру, можна, наприклад, занурити балони з різними газами в посудину з водою і дочекатися стану теплової рівноваги (рис. 29.3).

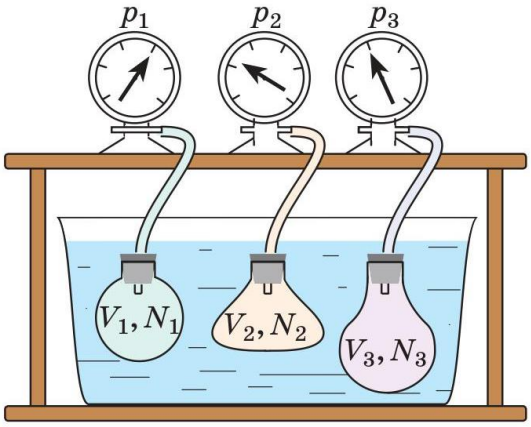


Рис. 29.3. Дослід, який дозволяє встановити зв'язок між температурою і середньою кінетичною енергією поступального руху молекул газу. Гази в посудинах перебувають у стані теплової рівноваги із середовищем, а отже, й один з одним

Експерименти показують, що для всіх газів у стані теплової рівноваги відношення $\frac{pV}{N}$ є однаковим, а отже, однаковими є і середні кінетичні енергії молекул газів. (Відношення $\frac{pV}{N}$ часто позначають літерою θ (те́та).)

Наприклад, за температури 0 °С (посудини з газами занурили в лід, що тане) $\theta_0 = 3{,}76 \cdot 10^{-21}$ Дж, тобто $\bar{E}_k = \frac{3}{2}\theta_0 = 5{,}64 \cdot 10^{-21}$ Дж; за температури 100 °С (посудини занурили у киплячу воду) $\theta_{100} = 5{,}14 \cdot 10^{-21}$ Дж, а $\bar{E}_k = \frac{3}{2}\theta_{100} = 7{,}71 \cdot 10^{-21}$ Дж. Оскільки у стані теплової рівноваги значення θ для будь-яких газів є однаковим, то температуру можна вимірювати в джоулях.

4 Абсолютна шкала температур

Зрозуміло, що в джоулях подавати температуру незручно (передусім тому, що значення θ дуже малі), до того ж незручно й повністю відмовлятися від шкали Цельсія. У 1848 р. англійський фізик *Вільям Томсон (лорд Кельвін)* (1824–1907) запропонував **абсолютну шкалу температур** (зараз її називають **шкалою Кельвіна**).

Температуру T, виміряну за шкалою Кельвіна, називають **абсолютною температурою**.

Одиниця абсолютної температури — **кельвін** — *основна одиниця СІ*:

$$[T] = 1 \text{ К (К)}.$$

Шкала Кельвіна побудована таким чином, що:

- зміна температури за шкалою Кельвіна дорівнює зміні температури за шкалою Цельсія: $\Delta T = \Delta t$, тобто *ціна поділки шкали Кельвіна дорівнює ціні поділки шкали Цельсія*: 1 °С = 1 К; температури, виміряні за шкалами Кельвіна і Цельсія, пов'язані співвідношеннями:

$$T = t + 273; \quad t = T - 273$$

Стала Больцмана названа на честь австрійського фізика *Людвіґа Больцмана* (1844–1906). Її значення можна визначити, скориставшись даними для θ_0 і θ_{100}, отриманими в результаті експерименту (див. п. 3 § 29):

◆ якщо $t = 100$ °C,
то $\theta_{100} = 5{,}14 \cdot 10^{-21}$ Дж;

◆ якщо $t = 0$ °C,
то $\theta_0 = 3{,}76 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Оскільки $\theta = kT$,
то $\Delta\theta = k\Delta T$, отже,
$k = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \frac{\theta_{100} - \theta_0}{\Delta T}$.
Враховуючи, що
$\Delta T = \Delta t = 100$ К,
а $\theta_{100} - \theta_0 = 1{,}38 \cdot 10^{-21}$ Дж,
маємо:

$$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

• температура за шкалою Кельвіна пов'язана з величиною $\theta = \frac{pV}{N}$ співвідношенням $\theta = kT$, де k — *стала Больцмана* — коефіцієнт пропорційності, який не залежить ані від температури, ані від складу та кількості газу:

$$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \left(\frac{\text{J}}{\text{K}} \right)$$

Абсолютна температура має глибокий фізичний зміст.

Середня кінетична енергія поступального руху молекул ідеального газу прямо пропорційна абсолютній температурі:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT \qquad (1)$$

Тобто, якщо газ охолодити до температури $T = 0$ К, *рух його молекул має припинитися* $\left(\bar{E}_k = 0\right)$. Таким чином, *нульова точка шкали Кельвіна — це найнижча теоретично можлива температура*. Насправді рух молекул не припиняється ніколи, тому досягти температури 0 К (–273 °C) неможливо.

Абсолютну нижню межу температури, за якої рух молекул і атомів має припинитися, називають **абсолютним нулем температури**.

Тиск p газу повністю визначається його абсолютною температурою T і концентрацією n молекул газу: $p = nkT$ (2).

Скориставшись співвідношенням $\frac{pV}{N} = \theta = kT$ і рівнянням $p = \frac{2}{3} n\bar{E}_k$, отримайте формули (1) і (2) самостійно.

Підбиваємо підсумки

• Фізична величина, яка характеризує стан теплової рівноваги макроскопічної системи, називається температурою. Абсолютну нижню межу температури, за якої рух молекул і атомів має припинитися, називають абсолютним нулем температури. Шкала, за нульову точку якої взято абсолютний нуль температури, називається абсолютною шкалою температур (шкалою Кельвіна). Одиниця абсолютної температури — кельвін (К) — основна одиниця СІ. Температури за шкалами Кельвіна і Цельсія пов'язані співвідношеннями: $T = t + 273$; $t = T - 273$.

• Середня кінетична енергія поступального руху молекул ідеального газу прямо пропорційна абсолютній температурі, а тиск газу визначається абсолютною температурою та концентрацією молекул газу: $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$; $p = nkT$, де $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К — стала Больцмана.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте нульове начало термодинаміки. **2.** За яких умов система перебуває в стані теплової рівноваги? **3.** Дайте означення температури. **4.** Що таке термометр? Яким є принцип його дії? Які види термометрів ви знаєте? **5.** Охарактеризуйте температурні шкали Цельсія та Кельвіна. Як вони пов'язані? **6.** Доведіть, що температура — міра середньої кінетичної енергії руху молекул. **7.** Як пов'язані тиск газу та абсолютна температура?

Вправа № 29

1. Чому на шкалі Кельвіна відсутні від'ємні температури?

2. Найнижча температура на Землі (–89 °С) була зафіксована в Антарктиді в 1983 р. Подайте цю температуру в кельвінах; у градусах Фаренгейта.

3. Абсолютна температура газу, який міститься в закритому балоні, збільшилася в 4 рази. Як при цьому змінилися тиск і середня квадратична швидкість руху молекул газу?

4. Скільки молекул газу міститься в кімнаті об'ємом 150 $м^3$ за тиску 1 атм і температури 27 °С?

5. Скориставшись додатковими джерелами інформації, дізнайтеся: 1) якими були перші термометри; 2) чому після вимірювання температури медичний термометр слід струшувати; 3) з якою точністю можна вимірювати температуру сучасними термометрами.