



В ПОШУКАХ НУЛЯ

Багатолика калорія

Ми ознайомилися з будовою термометра¹, який вимірює температуру за рахунок теплообміну. Але що таке теплота і в чому вона вимірюється? Колись кількість теплоти вимірювали в калоріях. Та й сьогодні на продуктах харчування зазначають їхню калорійність. Наприклад, на плитці шоколаду зазначено: 500 ккал/100 г. Одна калорія – це кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1 г води на 1 °C. Оскільки плитка шоколаду має масу 100 г, вона містить 500 000 калорій, яких достатньо, щоб нагріти 500 кг води на 1 °C, або 50 кг на 10 °C, або 5 кг від 0 °C до 100 °C. Але як щодо того, що теплоємність води змінюється з температурою, а отже, нагрівання на один градус за різних початкових температур потребує різної кількості теплоти? По-перше, ця відмінність невелика, а по-друге, саме через неї з'явилися різні калорії. Наприклад, є калорія при 15 °C – кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1 г води від 14,5 °C до 15,5 °C. Є калорії при 20 °C – кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1 г води від 19,5 °C до 20,5 °C. Є ще шість визначень калорії, з якими ти можеш познайомитися на сторінці англійської Вікіпедії. Теплота виділяється в нашому організмі в процесі окислення їжі. Вона витрачається на підтримку температури тіла і на виконання механічної роботи. В цьому сенсі усі тварини – теплові машини.

Якщо не теплець,
то що?

Раніше вважали, що теплота пов'язана з деякою рідиною, здатною перетікати від одного тіла до іншого. Цю рідину засновник сучасної хімії Антуан Лоран Лавуазьє 1783 року назвав теплецем (фр. – „calorique”). Під час дотику теплець перетікає від гарячого до холодного тіла, доки температури тіл не вирівнюються і не встановиться теплова рівновага. Однак згодом теорію теплецю піддали сумніву. В 1798 році Бенджамін Томсон провів такий дослід. У металевій болванці під водою тупим гарматним свердлом робили отвір. За деякий час вода закипала. Звідки ж взявся теплець? У 1799 році Гемфрі Деві за допомогою годинникового механізму в процесі тертя розплавив два шматки льоду. Вся установка була розміщена під дзвоном у вакуумі, а отже, стверджувати, що теплець проникнув у лід з повітря, не було підстав. Напрошувався висновок, що теплота пов'язана з рухом. Вперше таку ідею ще до робіт Лавуазьє висунули незалежно один від одного двоє вчених-енциклопедистів – Даниїл

¹Читай журнал „КОЛОСОК”, №3/2013.





Бернуллі та Михайло Ломоносов. У ті часи головним запереченням проти ідеї невидимого руху частинок речовини було те, що частинки рухаються без упину. Здавалося б, частинки повинні зупинитися, адже всі тіла врешті зупиняються. Так, внаслідок тертя об лід зупиняється камінь, що ковзає по ньому, внаслідок тертя об воду зупиняється човен, що пливе по озері; під впливом тертя кинута з силою повітряна кулька сповільнюється, а потім повільно опускається, неохоче піддаючись силі тяжіння, пружинить і, колившись, завмирає на підлозі.

Крупні тіла рухаються не в порожнечі. Вони втрачають рух і зупиняються внаслідок тертя з малесенькими частинками навколишнього середовища. А вже ці дрібненькі частинки, які їх оточують і з яких вони самі складаються, атоми і молекули, рухаються у порожнечі. Між ними немає нічого дрібнішого, що могло б їх загальмувати. Лише внаслідок зіткнення між собою вони передають кількість руху (імпульс), запас невиконаної роботи (енергію) і, як наслідок, температуру. Поплескайте в долоні або потріть їх. Відчуваєте, як вони нагрілися? Це енергія ваших велетенських за атомними мірками рук перетворилася на енергію величезної кількості рухомих молекул, з яких вони складаються. Ви запитаєте: якщо молекули моїх рук рухаються, чому вони не розлітаються в усі боки? А як ви думаєте, чому? Чому Місяць не покидає Землю, а Земля – Сонце? Чому стрілка компаса повертається до магніту, а шматочки паперу – до наелектризованої лінійки? Тому що між ними діє сила притягання. Уявіть куб з неодимових кульок-магнітів². Щоб відокремити кульки, треба затратити енергію і виконати певну роботу.

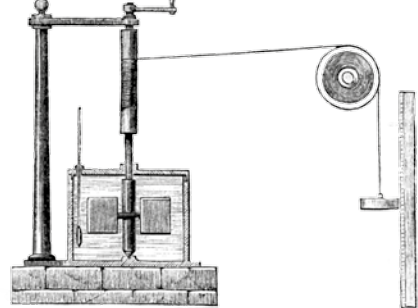
²Іграшка неокуб дуже популярна, адже з кульок-магнітів можна зібрати величезну кількість фігурок. Склад неодимових магнітів (сплав неодиму, заліза і бору) розробили лише 30 років тому, але вони вже витіснили слабших конкурентів майже з усіх галузей електроніки і промисловості.



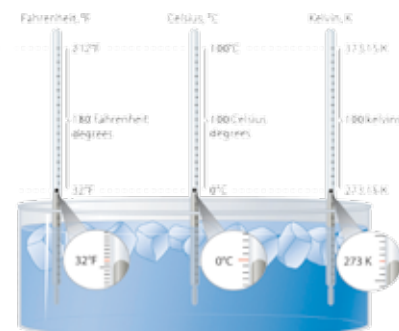
Але ось куб починає вібрувати, кульки тремтять, залишаючись на своїх місцях. Це модель твердого тіла. Якщо збільшити вібрацію, куб втратить форму і „розтечеться” на поверхні, як крапля ртуті на склі. Це модель поведінки рідини. Якщо ж енергія вібрації дуже велика, кульки розлетяться, наче молекули газу. Приблизно у такий спосіб тверде тіло зі зростанням температури поволі розширюється, потім переходить у рідкий, а згодом – у газоподібний стан. Під час дотику двох тіл кульки-молекули більш нагрітого тіла передають надлишкову енергію руху своїм спокійнішим сусідам, а ті, отримавши її, передають надлишок енергії далі. Таке явище називається теплопровідністю. Від частинки до частинки передається енергія руху, а не теплець.

Шоколадна гієта

Сьогодні ми розуміємо, що поняття теплоти обумовлене рухом атомів і молекул, які не можуть зупинитися внаслідок закону збереження енергії. Що вища температура, то більша енергія рухомих частинок. Теплота, так само як і енергія, вимірюється в джоулях на честь видатного англійського фізика Джеймса Джоуля, який вперше встановив точне співвідношення між одиницями вимірювання механічної енергії і теплоти. Одна калорія – це приблизно 4,2 джоуля (енергія, якої достатньо, щоб підняти вантаж масою 420 г на висоту 1 м). Енергії, яка міститься в плитці шоколаду, вистачить, щоб підняти тіло масою 420 кг на висоту 500 м! Якщо ви з'їли зайву шоколадку, не бійтеся погладшати. Від зайвих калорій можна позбавитися на городі або у тренажерному залі. Дякуючи Джоулю, ви знаєте, який обсяг роботи для цього доведеться виконати! Джеймс Джоуль здійснив багато важливих відкриттів і винаходів. Серед них – прецизійні термометри для вимірювання температури з точністю до 1/360 градуса.



Установка Джоуля для визначення механічного еквіваленту теплоти



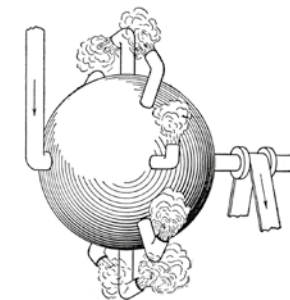
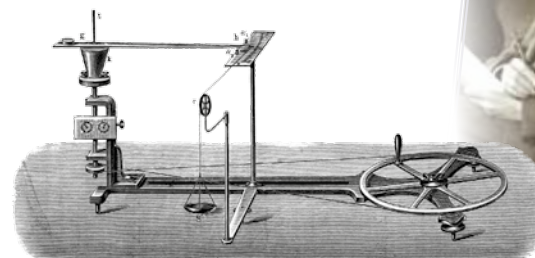
Абсолютний нуль температури

Отже, температура – це міра енергії рухомих частинок. Якщо температура зменшується, швидкість руху частинок також зменшується. Цікаво, а за якої температури вони зупиняться? Виявляється, тепловий рух зникає за $-273,15^{\circ}\text{C}$. Нижчої температури немає! Чому б тоді не обрати найнижчу температуру за нуль градусів? Просто зсунути шкалу Цельсія на $273,15^{\circ}$ вниз. Тоді лід плавитиметься за температури $273,15^{\circ}$, а вода кипітиме за $373,15^{\circ}$. Будь-яка температура матиме додатне значення. У 1848 році таку шкалу запропонував видатний англійський фізик Вільям Томсон. За наукові досягнення в лабораторії університету Глазго на річці Кельвін він перший з англійських учених отримав дворянство і титул лорда Кельвіна. Температурною шкалою Кельвіна зараз користуються в усьому світі.

Виявляється, фізичні закони, в яких фігурує температура за шкалою Кельвіна, мають доволі простий вигляд. Так завдяки Вільяму Томсону невелика річечка Кельвін прославилася на весь світ. Один градус за шкалою Цельсія і Кельвіна має однакову величину. Тому, переводячи температуру з однієї шкали в іншу, достатньо додати або відняти $273,15$ або приблизно 273 . За шкалою Кельвіна температура тіла людини дорівнює приблизно 310 K . Зверніть увагу: значок градуса ($^{\circ}$) біля букви K не ставлять і слово „градус” не вимовляють. Кажуть: **триста десять кельвін**. Такі правила діють з 1968 року після резолюції Генеральної конференції щодо мір і ваг. Раніше писали 310°K і вимовляли „триста десять градусів Кельвіна”.

Однак головне в абсолютній термометричній шкалі³, без сумніву, не те, як саме назвати одиницю її вимірювання. Головне – у зручності і зрозумілому фізичному змісті. У 1848 році, коли Вільям Томсон запропонував свою шкалу, він не поділяв поглядів Джоуля щодо теплового руху частинок речовини і надавав перевагу загальноприйнятій теорії теплецю. Після дискусії з Джоулем, численних наукових робіт і відкриттів він змінив свої погляди на теплоту, отримав титул лорда Кельвіна і став одним з найша-

Установка Івана Пулюя для визначення механічного еквіваленту теплоти



новніших фізиків у світі. А 1848 року у віці 24-х років талановитий британець аналізував поведінку газового термометра. За пониженої температури об'єм газу в термометрі зменшувався. За незмінного зовнішнього тиску об'єм газу зменшувався на однакову кількість процентів, не залежно від того, яким саме газом була наповнена посудина. Але дивовижним було не лише це. За пониження температури на один градус, від 0°C до -1°C , об'єм газу зменшувався на $0,366\%$, а за пониження температури на десять градусів, від 0°C до -10°C , об'єм зменшувався на $3,66\%$ (у десять разів більше). Цікаво, а що буде за пониження температури на $100/0,366 = 273$ градуси? Об'єм газу повинен зменшитися на 100% , тобто до нуля! Хіба це можливо? Температуру -273°C Вільям Томсон назвав безконечним холодом, якому на температурній шкалі відповідає кінцева відмітка. На думку Томсона, досягнути найнижчої температури неможливо. Те саме стверджує третє начало термодинаміки.

Три кита термодинаміки

Термодинаміка, наука про теплоту і перетворення енергії, базується на трьох законах, які за традицією називають початками. Перше начало термодинаміки є законом збереження енергії стосовно теплових явищ. Тепло, надана тілу, витрачається на виконання роботи і збільшення його внутрішньої енергії. Відповідно до другого начала теплота самовільно може переходити лише від більш нагрітого тіла до менш нагрітого.

Для того, щоб нагріти гаряче тіло за рахунок охолодження холодного, треба затратити енергію і виконати роботу. Так працює кондиціонер у режимі обігріву, споживаючи електричну енергію. При цьому повітря у кімнаті нагрівається за рахунок охолодження повітря на вулиці. Втім, і в стандартному



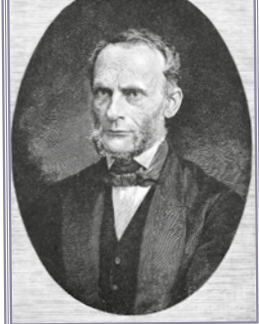
³Так називав шкалу сам Вільям Томсон у своїй праці 1848 року „On an Absolute Thermometric Scale”.



Герман Гельмгольц



Вальтер Нернст



Рудольф Клаузіус

режимі кондиціонер робить те саме, але у зворотному напрямку. За допомогою електрики він нагріває повітря на вулиці, охолоджуючи його у кімнаті. В цьому сенсі квартира з кондиціонером нічим не відрізняється від холодильника. Включивши влітку кондиціонер, ми передаємо теплоту зсередини назовні і (як продукти в холодильнику) краще переносимо спеку. Кондиціонери, холодильники, парові турбіни, двигуни машин, кораблів, літаків і ракет – все це приклади застосування термодинаміки. Але пам'ятаймо, що перші кроки були зроблені 160 років тому Джеймсом Джоулем, Робертом Майєром і Германом Гельмгольцем, які сформулювали закон збереження енергії і перше начало термодинаміки. Згодом Вільям Томсон і Рудольф Клаузіус сформулювали друге начало термодинаміки. І значно пізніше, вже на початку двадцятого століття, Вальтер Нернст дійшов висновку про неможливість досягнення абсолютного нуля. Він писав: *„Неможливо скінченною кількістю будь-яких впливів охолодити тіло до 0 K“*.

Все нижче і нижче...

Зараз існує багато різноманітних способів охолодження речовини. Найнижча температура, якої досягали люди, становить одну десятимільярдну кельвіна. Європейські вчені розробляють проекти досягнення температури один фемтокельвін ($1 \text{ фК} = 0,000000000000001 \text{ K}$). Для цього необхідна спеціальна космічна лабораторія. І все ж, абсолютний нуль температури недосягний. До нього можна наблизитися і наблизитися, але досягнути його неможливо. Кожен наступний крок стає дедалі коротшим. Як у моделі Всесвіту, яку придумав видатний французький математик і фізик Анрі Пуанкаре. Жителі всесвіту Пуанкаре вважають свій світ безконечним, а для нас він лише куля, температура якої зменшується



від центру і на поверхні набуває найменшого значення 0 K. За пониження температури всі тіла у світі Пуанкаре однаково стискаються, наче газ у термометрі Вільяма Томсона. *„Цей світ обмежений з точки зору нашої звичайної геометрії, – писав Пуанкаре, – але він здаватиметься безмежним для його жителів. Справді, якби вони заохотили наблизитися до граничної сфери, то охолоджувалися б і ставали все меншими і меншими. Тому їхні кроки постійно б вкорочувалися, і вони ніколи не змогли би досягнути межі“*.

Звичайно, в реальному світі об'єм тіла не може зменшитися до нуля. Навіть якби його температура становила 0 K. Воно ж складається з частинок, які мають власний об'єм, так само, як неодимовий куб, знерухомлений за відсутності теплових коливань. Але тіл з температурою 0 K у природі не існує. В цьому сенсі абсолютний нуль температур є абстракцією. Чи варто в такому випадку використовувати 0 K? Звичайно, варто! Абсолютний нуль температури – дуже зручне поняття. Використовуючи саме абсолютну температуру, записують різні фізичні закони, які відіграють важливу роль у існуванні життя на Землі. Про ці дивовижні закони ми поговоримо у наступній статті.



Анрі Пуанкаре

