

УДК 536.521.2

АНАЛІЗ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ ВИЗНАЧЕННЯ ОДИНИЦІ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КЕЛЬВІН

© Гоц Наталія, Борозенець Олександр, 2012

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра
м. Львів, вул. С.Бандери 12

Досліджено розвиток визначення одиниці термодинамічної температури. Виявлено недоліки сучасного визначення Кельвіна згідно з системою SI. Показано, що нове визначення одиниці термодинамічної температури на основі сталої Больцмана робить його незалежним від матеріальної субстанції, технічної реалізації, а також температури або температурного діапазону. Це дає змогу вдосконалювати температурні вимірювання в діапазоні, віддаленому від потрібної точки води, та підвищити точність вимірювань температури.

Исследовано развитие определение единицы термодинамической температуры. Указаны недостатки современного определения Кельвина согласно системы SI. Показано, что новое определение единицы термодинамической температуры на основе постоянной Больцмана делает его независимым от материальной субстанции, технической реализации, а также температуры или температурного диапазона. Это делает возможным совершенствование температурных измерений в диапазоне, удаленном от тройной точки воды, и повышение точности измерений температуры.

The article investigates the development unit of thermodynamic temperature determination. The ones defined by Kelvin definition of SI. The new definition of the unit of thermodynamic temperature through the Boltzmann constant makes it independent of material substance, technical implementation, as well as temperature or temperature range. This makes it possible to improve temperature measurements in the range far from the triple point of water and increase the accuracy of temperature measurements.

Постановка проблеми. Розвиток високотехнологічного виробництва та наукових досліджень завжди вимагали підвищення точності визначення одиниць фізичних величин, як основи всієї системи вимірювання. Одна з основних одиниць системи SI – одиниця термодинамічної температури. Як відомо, вимірювання температури становлять до 70 % всіх вимірювань. Отже, розвиток методів підвищення точності визначення одиниці термодинамічної температури є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На початку XVIII ст. з'явилися роботи Фаренгейта і Амонтона, покладені в основу двох незалежних напрямів термометрії.

Перший напрям базувався на визначенні одиниці температури залежно від властивостей конкретної термометричної речовини. Найпоширеніші визначення одиниці температури першого напрямку – це градус Фаренгейта та градус Цельсія. Також запропоновано градуси Реомюра, Ньютона, Деліля, які локально

використовувались в окремих країнах. Але ці одиниці температури були недосконалими, оскільки залежали від властивостей використаної термометричної речовини.

Другий напрям базувався на визначенні одиниці температури залежно від однієї фіксованої точки та понятті абсолютного нуля. Одиниці температури відповідно до другого напрямку запропонували Уільям Ранкін та Уільям Томсон, лорд Кельвін. В обох шкалах за 0 градусів прийнято температуру абсолютного нуля. Оскільки в більшості країн світу використовувалася шкала Цельсія, через легкість переведення шкала Кельвіна стала поширенішою. Формули визначення одиниць температури цих двох напрямів подано в табл. 1.

Формулювання мети статті. Отже, метою цієї наукової праці є дослідження особливостей сучасного визначення одиниці термодинамічної температури; визначення напрямку розвитку і можливих методів реалізації нового визначення термодинамічної температури.

Таблиця 1

Формули визначення одиниць температури

Метод визначення	Назва одиниці	Формула визначення	Пояснення
Залежно від властивостей конкретної термометричної речовини	Градус Фаренгейта	$1^{\circ} F = \frac{1}{180}(T_{к.в.} - T_{т.л.})$	Тк.в.=212°F – температура кипіння води Тт.л.=32°F – температура танення льоду
	Градус Цельсія	$1^{\circ} C = \frac{1}{100}(T_{к.в.} - T_{т.л.})$	Тк.в.=100°C – температура кипіння води Тт.л.=0°C – температура танення льоду
	Градус Реомюра	$1^{\circ} R = \frac{1}{80}(T_{к.в.} - T_{т.л.})$	Тк.в.=80°R – температура кипіння води Тт.л.=0°R – температура танення льоду
	Градус Ньютона	$1^{\circ} N = \frac{1}{12}(T_{л.т.} - T_{з.в.})$	Тк.в.=12°N – температура людського тіла Тт.л.=0°N – температура замерзання прісної води
	Градус Деліля	$1^{\circ} De = \frac{1}{150}(T_{з.в.} - T_{к.в.})$	Тз.в.=150°De – температура замерзання води Тк.в.=0°De – температура кипіння води
Залежно від однієї фіксованої точки та поняття абсолютного нуля	Градус Ранкіна	$T_{Ra} = T_F + 459$	–
	Градус Кельвіна	$T_K = T_C + 273$	–

Виклад основного матеріалу дослідження.

Визначення одиниці термодинамічної температури, що діє нині, було прийнято в резолюції Генеральної конференції з мір та ваг за 1967–1968 рр. Згідно з МТШ-90 одиницею термодинамічної температури, яка позначається символом T , є Кельвін, який за визначенням дорівнює $1/273,16$ частини термодинамічної температури потрійної точки води $T_{90}(\text{TPW})$, що можна подати виразом:

$$1\text{K} = \frac{1}{273,16} T_{90}(\text{TPW}). \quad (1)$$

Потрійна точка води – це температура рівноваги газоподібної, рідкої і твердої фаз води. Відповідно до МТШ-90 температурі потрійної точки води за визначенням приписано значення 273,16 К. У обов'язковому Технічному додатку до тексту МТШ-90 [1] Консультативний комітет з термометрії (ККТ) встановив вимоги до ізотопного складу води при реалізації температури потрійної точки води:

- 0,00015576 моля ^2H на один моль ^1H ;
- 0,0003799 моля ^{17}O на один моль ^{16}O ;
- 0,0020052 моля ^{18}O на один моль ^{16}O .

Вплив ізотопів на температуру потрійної точки води можна подати лінійною залежністю:

$$T = T_{90}(\text{TPW}) + A(^2\text{H})\delta^2\text{H} + A(^{17}\text{O})\delta^{17}\text{O} + A(^{18}\text{O})\delta^{18}\text{O}, \quad (2)$$

де константи $A(^2\text{H}) = 628$ мкК, $A(^{18}\text{O}) = 641$ мкК, $A(^{17}\text{O}) = 57$ мкК.

Підкреслимо, що різниця в значеннях температури потрійної точки води для води різного ізотопного складу може досягати декілька десятків мК. Отже, можна вважати, що одиниця температури залежить від властивостей потрійної точки води, реалізація якої вимагає складних фізичних умов відтворення. Дослідження останніх років показали, що на стабільність температури потрійної точки води також впливають склад скла ампули, ступінь очищення води, її ізотопний склад. Дослідження проведених звірянь ампул з різним ізотопним складом води показали, що розбіжності в значеннях температури можуть досягати декілька десятків мК.

З метою усунення залежності одиниць фізичних величин від властивостей використаних зразків або матеріалів Міжнародний комітет мір та ваг (МКМВ) дійшов висновку про необхідність визначення основних одиниць Міжнародної системи SI через універсальні фізичні константи. У 2005 р. видано керівний документ МКМВ, що схвалив заходи з розроблення нових визначень основних одиниць (кілограма, ампера, кельвіна та моля) із застосуванням фундаментальних фізичних констант [2] на основі таких рекомендацій:

- загальна структура SI, тобто основні величини SI та їхні одиниці, повинні залишитися незмінними;

- не обов'язково, щоб нове визначення одиниці SI давало змогу зменшити невизначеність при її реалізації;

- одиниці, які повинні отримати нове визначення, і константи, з якими вони мають бути пов'язані, потрібно вибирати так, щоб забезпечити переваги як для метрології, так і для науки загалом;

- нове визначення одиниці не повинно призводити до розриву у її значеннях.

Запропоновано такі формулювання визначення одиниці термодинамічної температури Кельвіна [2]:

- Кельвін – зміна термодинамічної температури, яка приводить до зміни теплової енергії kT точно на $1,38065XX \cdot 10^{-23}$ Джоуля;

- Кельвін – зміна термодинамічної температури T , яка приводить до зміни теплової енергії kT точно на $1,38065XX \cdot 10^{-23}$ Джоуля, де k – стала Больцмана;

- Кельвін – термодинамічна температура, при якій середня поступальна кінетична енергія атомів в ідеальному газі у рівновазі дорівнює точно $(3/2) \cdot 1,38065XX \cdot 10^{-23}$ Джоуля;

- Кельвін – термодинамічна температура, за якої середня енергія частинок точно дорівнює $1,38065XX \cdot 10^{-23}$ Джоуля на один ступінь свободи;

- Кельвін – така одиниця термодинамічної температури, при якій стала Больцмана дорівнює точно значенню $1,38065XX \cdot 10^{-23}$ Джоуля на Кельвін.

Кожен з варіантів має певні переваги та недоліки. ККТ висловлюється нині за останнє визначення, вважаючи, що в попередніх варіантах є неточності. Проте треба брати до уваги політику МКМВ щодо визначення й інших одиниць SI. Якщо буде вирішено, що визначення повинно відображати природу одиниці фізичної величини, то, швидше за все, буде прийнятий перший варіант.

Отже, визначення Кельвіна базуватиметься на фіксованому значенні сталої Больцмана, яка є коефіцієнтом, що пов'язує одиницю температури T з її середньою кінетичною енергією поступального руху молекул E згідно з [3]:

$$E = \frac{3}{2} kT, \quad (3)$$

Добуток kT є характеристикою, яка визначає розподіл енергії між часточками системи, що перебуває в тепловій рівновазі. Так, для незв'язаних атомів температура пропорційна до середньої кінетичної

енергії. Якщо нині фіксоване значення приписане температурі потрійної точки води, а стала Больцмана є залежною величиною, то, за пропозицією МКМВ, фіксоване значення матиме стала Больцмана, а всі температури реперних точок, включаючи потрійну точку води, будуть вимірюваними величинами.

Отже, нове визначення Кельвіна використовуватиме уточнене значення сталої Больцмана – $k = 1,380650510^{-23}$ Дж/к.

Оскільки середню кінетичну енергію поступального руху атомів неможливо визначити експериментально, то сталу Больцмана фіксуватимуть різноманітними методами, в яких T пов'язана лише з величинами, які можна виміряти, та відомими фізичними константами. Різні методи визначення сталої Больцмана подано в табл. 2. Нині спеціалісти лабораторії фізики лазера Інституту Галілея Університету Париж-13 (Франція) розробляють метод лазерної спектроскопії, який дасть змогу визначити сталу Больцмана з відносною невизначеністю $5 \cdot 10^{-7}$. Але досягнуто поки що лише значення відносної невизначеності $2 \cdot 10^{-4}$ [4].

У травні 2007 р. робоча група ККТ опублікувала на сайті МБМВ звіт про результати підготовки до перегляду визначення Кельвіна й випустила спеціальне звернення до метрологів, в якому констатувала, що [5]:

1. Зміна визначення Кельвіна практично не вплине на реалізацію МТШ-90 і передачу розміру одиниці температури робочим засобам вимірювання. МТШ-90 в майбутньому використовуватиметься як найбільш точна і надійна апроксимація термодинамічної шкали. Проте це не буде єдина шкала, що використовується для температурних вимірювань. У далекому майбутньому термодинамічні методи, можливо, досягнуть такої точності, що зможуть поступово стати основними методами вимірювання температури. Значення температур реперних точок залишаться незмінними. Невизначеність вимірювань залежатиме від практичної реалізації цих точок і неєдності шкали.

2. Незначно зміняться невизначеності, які приписані температурам реперних точок на етапі підготовки МТШ-90. Зауважимо, що інформація про невизначеності реперних точок після затвердження шкали не є важливою для практичних вимірювань, хоч ці невизначеності в середині діапазону становлять декілька десятків мК внаслідок труднощів роботи з приладами первинної термометрії. Оскільки стала Больцмана є фіксованим значенням, то температура

потрійної точки води, яка, як і раніше, залишається 273,16 К, набуває невизначеності, пов'язаної з експериментальним визначенням цієї константи. Сьогодні ця невизначеність становить приблизно $1,8 \cdot 10^{-6}$, що відповідає невизначеності температури ПТВ 0,49 мК. Вплив цього значення на інші реперні точки буде

неістотним, враховуючи приписану невизначеність. Наприклад, в точці топлення алюмінію (660,323 °С) замість 25 мК ми отримаємо 25,1 мК. Такі зміни ніяк не можуть вплинути на прийняті нормативні документи, що встановлюють допуски до термодатчиків, термометрів опору й інших промислових засобів вимірювання.

Таблиця 2

Основні методи визначення сталої Больцмана

Вихідний термометричний метод	Фізичний закон	Гранична відносна стандартна невизначеність
Акустична газова термометрія	$U_0 = \sqrt{\frac{g_0 RT}{M}}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Газова термометрія за діелектричною проникністю	$p = kT \frac{(e - e_0)}{a_0}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Газова термометрія за показником заломлення	$p = kT \frac{(n^2 - 1)e_0}{a_0}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Шумова термометрія	$\langle U^2 \rangle = 4kTR_{el} \Delta u$	$5 \cdot 10^{-6}$
Термометрія за доплерівським розширенням спектральних ліній	$\Delta u_D = \sqrt{\frac{2kT}{mc_0^2}} v_0$	$1 \cdot 10^{-5}$

3. Поки що немає методів, що істотно знизили б невизначеність реалізації ПТВ, яка дорівнює приблизно 0,05 мК. Тому фіксоване значення сталої Больцмана на сучасному етапі розвитку науки не може в найближчому майбутньому вплинути на значення потрійної точки води: сьогодні прийнято 273,16 К.

У 2005 р. Консультативний комітет з термометрії сформував робочу групу TG-SI, метою якої є оцінка наслідків введення нового визначення Кельвіна. У результаті проведених досліджень встановлено, що нове визначення Кельвіна може мати як недоліки, так і ряд переваг. Прихильники нового визначення одиниці температури погоджуються, що це призведе до втрати точності відтворення Кельвіна. У наш час практична відтворюваність температури потрійної точки води як основи сучасного визначення одиниці температури, національними еталонами різних країн становить ± 20 мК. Разом з тим, якщо рекомендоване CODATA у 2002 р. значення сталої Больцмана зараз дорівнювало б $1,3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж К⁻¹ при відносній невизначеності $1,8 \cdot 10^{-6}$ [6], і було б використано для визначення Кельвіна, то температура потрійної точки води залишилася б 273,16 К. Проте, замість точного значення за визначенням, це значення мало б

стандартну невизначеність $u(T_{TPW}) = 0,49$ мК. Отже, нове визначення Кельвіна може привести до збільшення похибки вимірювань.

Крім того, перехід на нове визначення Кельвіна припускає у майбутньому використання первинних термометрів як державних первинних еталонів одиниці температури. Такі прилади надзвичайно складні та досить дорогі, тому дотепер їх використовували тільки в декількох країнах і лише для наукових досліджень (для оцінки відхилення МТШ від термодинамічної шкали, для визначення сталої Больцмана). При цьому розглядали і зіставляли результати досліджень декількох різних лабораторій, оскільки оцінити систематичну похибку таких вимірювань є достатньо складно.

У результаті проведених досліджень встановлено, що введення нового визначення Кельвіна має певні переваги:

- не залежатиме від властивостей використаної термометричної речовини;
- матиме підвищену точність вимірювання в діапазонах менше за 20 і понад 1300 К;
- не вимагатиме заміни МТШ-90, але й не суперечитиме цій заміні;

• знизить витрати на вдосконалення МТШ-90 та розширення температурних діапазонів.

Але недоліком нового визначення є збільшення невизначеності, пов'язане з експериментальним визначенням сталої Больцмана. За останніми публікаціями, це не має вплинути на точність вимірювання температури загалом, а лише будуть уточнені значення невизначеностей реперних точок під час побудови температурної шкали.

Висновки. В результаті проведеного дослідження можна зробити висновки. Нове визначення одиниці термодинамічної температури робить його незалежним від матеріальної субстанції, технічної реалізації, а також температури або температурного діапазону. Це уможливило вдосконалення температурних вимірювань в діапазоні, віддаленому від потрібної точки води, та підвищення точності цих вимірювань. Нове визначення Кельвіна сприятиме розвитку термодинамічних методів визначення одиниці температури та побудови температурної шкали, незалежних від

властивостей термометричної речовини, паралельно до методів, описаних в МТШ-90. У перспективі, нове визначення Кельвіна повинно привести до підвищення точності побудови та відтворення температурної шкали, до розширення її діапазону без серйозних економічних та організаційних наслідків для суспільства.

1. <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/23/12>. 2. http://www.bipm.org/wg/CCT/TG-SI/Allowed/Documents/Report_to_CIPM_2.pdf/ 3. <http://www.temperatures.ru/kelvin/kelvin.php/> 4. C. Daussy, M. Guinet, A. Amy-Klein, K. Djerroud, Y. Hermier*, S. Briaudeau*, Ch. J. Bordé, and C. Chardonnet Phys. Rev. Lett. 98, 250801 (2007) [4 pages] / 5. Direct Determination of the Boltzmann Constant by an Optical Method. http://www.bipm.org/wg/CCT/TG-SI/Allowed/Documents/Report_to_CIPM_2.pdf. 6. Mohr Peter J., Taylor, Barry N.; Newell, David B. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2006// Rev. Mod. Phys. — 80. — (2008): 633–730.

УДК 620.179.13; 620.179.16; 532.519.633

ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ НЕОДНОРІДНОСТІ МАТЕРІАЛУ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ТЕПЛОВОГО ВІДГУКУ НА ВУЗЬКОЗОННЕ ТЕПЛОВЕ ЗБУДЖЕННЯ

© Прохоренко Сергій, Кашипор Катерина, Микитин Ігор, Мац Кінга *, Возний Марьюш *, Панас Андрій **, 2012.

Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

* Жешувський університет, Жешув, Польща

** Військово-технічна академія, Варшава, Польща

siergiej.prokhorenko@gmail.com; revenko.k@gmail.com

Розроблено та апробовано в числовому симуляційному, а також експериментальному (на двох незалежних комплектах обладнання) модельних експериментах концепт-схему оцінювання рівня неоднорідності матеріалу за допомогою аналізу теплового відгуку на вузькозонне теплове збудження.

Разработана и апробирована в численном симуляционном, а также экспериментальном (на двух независимых комплектах оборудования) модельных экспериментах концепт-схема оценки уровня неоднородности материала путем анализа теплового отклика на узкозонное тепловое возбуждение.

Concept scheme for evaluating the material heterogeneity by analyzing the thermal response of narrow-band thermal excitation have been developed and tested in the course of numerical simulation and experimental investigations when applying two different experimental setups.

Встановлення рівня однорідності стану поверхні є доволі значущим за сьогоденного напрямку розвитку технології. Протягом останніх років швидкими темпами розвивається новий напрям науки та техніки –

створення та дослідження наноматеріалів. На ринок надходить широкий асортимент наноматеріалів та наноб'єктів, ведеться пошук способів створення та застосування нових структур наноматеріалів та нано-