

УДК 536.521.2

## РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ШКАЛИ НИЖЧЕ ВІД ТОЧКИ ТВЕРДНЕННЯ СРІБЛА 961,78°C НА РЕПЕРНИХ ТОЧКАХ МТШ-90

© Леонід Назаренко, Наталія Гоц, 2010

Харківська Академія міського господарства,  
м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.  
Національний університет "Львівська політехніка",  
м. Львів, вул. С. Бандери 12

*Обґрунтовано необхідність удосконалення системи метрологічного забезпечення вимірювань температури за випромінюванням, зокрема вдосконалення методів та засобів передавання одиниці термодинамічної температури від еталонних до робочих засобів вимірювання температури за випромінюванням. Визначено доцільність побудови радіаційної температурної шкали нижче від точки тверднення срібла 961,78°C.*

*Раскрыта необходимость совершенствования системы метрологического обеспечения термометрии излучения, в частности совершенствование методов и средств передачи единицы термодинамической температуры от эталонных к рабочим средствам измерения температуры излучения. Определена целесообразность построения радиационной температурной шкалы ниже точки затвердевания серебра 961,78°C.*

*The necessity of perfection of the system of the metrology providing of thermometry of radiation is exposed in the article, in particular perfection of methods and facilities of transmission of unit of thermodynamics temperature from standard to workings facilities of measuring of temperature of radiation. Expedience of construction of radiation temperature scale is certain below than point of thermosetting of silver of 961,78°C.*

**Вступ.** Термометрія за випромінюванням (радіаційна термометрія, пірометрія) [1, 2] останнім часом досягла значного прогресу. Це стосується розширення робочого температурного діапазону як в область високотемпературних вимірювань понад 2000 °С, так і в область вимірювань низьких температур до – 50 °С. Спричинено це зростанням потреб промисловості в безконтактних вимірюваннях температури за випромінюванням, інтенсивним розвитком методів та засобів пірометрії [3]. Бурхливо розвивається термометрія за випромінюванням в інфрачервоній області спектра.

Завдяки істотним перевагам (дистанційності, високої швидкодії, можливості реалізації вимірювань в агресивному середовищі, широкому діапазоні вимірювань) цей вид вимірювань широко застосовується в наукових дослідженнях, метрології, дистанційному керуванні, контролі, діагностуванні промислових процесів, медицині та захисті навколишнього середовища. Розширення сфери застосування створило передумови для розширення номенклатури пірометрів та під-

вищення вимог до точності вимірювань, що відображено в табл. 1.

Як видно з таблиці, вимоги до точності вимірювання в різних галузях становлять до 1 %. Разом з тим, розвиток ракетно-космічної техніки, досліджень із створення нових матеріалів і сплавів (зокрема для космічної, авіаційної і військової техніки), технології вирощування кристалів для сучасних лазерів і мікроелектронної апаратури, інші високотехнологічні виробництва потребують все точніших, на рівні десятих градуса, безконтактних вимірювань температури близько 1500÷3000°.

**Огляд основних технічних характеристик пірометрів.** Зростання потреб промисловості в безконтактних вимірюваннях температури за випромінюванням стало передумовою зростання номенклатури радіаційних термометрів. Зокрема, з'явилася велика кількість недорогих інфрачервоних пірометрів фірм "Raytek". "Mikron", "Fluke" тощо. Їх метрологічні характеристики наведені в табл. 2 [4, 5, 6].

Таблиця 1

## Сфери застосування засоб вимірювання температури за випроміненням в промисловості

Сфери застосування	Діапазон вимірювання температури, °С	Вимоги до точності вимірювання температури, °С
Контроль процесу загартування металевих виробів із використанням індукційного нагріву	До 900	1 ÷ 5
Контроль плавлення та розливу сталі та чавуну	Від 500 до 1800	1 ÷ 10
Вимірювання температури у роторних печах	Від 80 до 1200	1 ÷ 10
Автосервіс	Від 0 до 200	1 ÷ 10
Контроль за температурою у шахтах	Від 20 до 200	1 ÷ 3
Виробництво кремнієвих пластин	Від 350 до 1800	0,1 ÷ 1
Вимірювання температури біологічних об'єктів, медицина	Від 0 до 50	0,1 ÷ 1
Космічні дослідження, наукова діяльність	Від -50 до 3000	0,01 ÷ 1
Контроль функціонування електрообладнання	Від 20 до 200	0,1 ÷ 1
Процес литва з пластику	Від 50 до 300	1 ÷ 3
Екологічний моніторинг	Від -50 до 100	0,1 ÷ 1

Таблиця 2

## Основні технічні характеристики сучасних пірометрів

Характеристика	Діапазон температур, °С						
	-30÷900	-18÷250	-42÷2000	5÷200	200÷2200	250÷3000	600÷2800
Основна похибка, %	±1	±1...±2,5	±1	±2	±0,4	±0,3	±5...±2
Показник візування	1:8	1:6	1:15	1:10	1:60	1:40	1:25
Робочий спектральний діапазон, мкм	8÷14	7÷18	8÷14: 3,9;2,2;5,0	8÷14	4,8÷5,2 7,6÷8,4	0,75/1,1: 0,95/1,1	0,83/1,50: 0,87/1,55: ,92/1,62: 0,93/1,38:
Час встановлення показів, мс	250	500	165	2000	3	10	50÷3000
Діапазон навколишніх температур °С	0÷60	0÷50	0÷70	10÷40	10÷35	0÷50	5÷50
Наявність аналогового і/або цифрового виходу	Є	Немає	Є	Немає	Немає	Є	Є

Як видно із табл. 2, сучасні пірометри дають змогу виконувати вимірювання в широкому діапазоні температур від -50°C до +3000°C. Основна похибка більшості приладів становить від  $\pm 0,3\%$  до  $\pm 2\%$  вимірюваної величини або верхнього діапазону вимірювань. Вони дають змогу вимірювати температуру динамічних процесів. Крім того, наявність у більшості моделей пірометрів аналого-цифрового виходу дає змогу використовувати ці засоби вимірювальної техніки в системах дистанційного керування, контролю та діагностики технологічних процесів. Також необхідно відзначити:

- зростання потреб ринку та розроблення нових видів приймачів випромінення привели до швидкого

зростання кількості приладів інфрачервоної радіаційної термометрії, які вимірюють температуру в діапазоні від -50 до 1000 °С;

- розвиток методів пірометрії спектрального відношення зумовив створення пірометрів, процес вимірювання в яких відбувається на базі декількох спектральних каналів, що дає змогу підвищити точність вимірювання температури за випроміненням.

**Постановка задачі дослідження.** Отже, внаслідок розширення номенклатури та діапазону вимірювань, підвищення точності радіаційних термометрів, виникає необхідність вдосконалення системи метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням, вдоско-

налення методів та засобів передавання одиниці термодинамічної температури від еталонних до робочих засобів вимірювання температури за випроміненням.

Це може бути реалізоване за допомогою розв'язання таких задач:

- оптимізації системи передачі розміру одиниці термодинамічної температури від еталону до робочих засобів вимірювання;
- удосконалення методів передачі розміру одиниці термодинамічної температури;
- вдосконалення засобів передачі розміру одиниці термодинамічної температури.

Це дасть змогу забезпечити єдність вимірювань у сучасній термометрії за випроміненням.

**Аналіз відтворення та передачі термодинамічної температури для термометрії за випроміненням.** Розглянемо докладніше, як реалізується відтворення та передача термодинамічної температури для термометрії за випроміненням. В температурному діапазоні, в якому працюють пірометри, за міжнародною температурною шкалою температура визначається в двох основних температурних діапазонах: від 0 до 961,78 °C ; від 961,78 °C і вище. Розглянемо їх детальніше.

Градуювання радіаційних термометрів, які вимірюють температури понад 1000°C, відповідно до Положення про МТШ-90 [7] відбувається згідно з радіаційною температурною шкалою, яка будується оптичними методами на основі рівняння Планка. Вище від точки тверднення срібла 961,78°C побудова МТШ-90 ґрунтується на випромінювачі типу абсолютно чорне тіло та основних реперних точках, наведених в табл. 3.

За радіаційною температурною шкалою температура  $T_{90}$  визначається за таким виразом:

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}(T_{90}(x))} = \frac{\exp(C_2[\lambda T_{90}(x)]^{-1}) - 1}{\exp(C_2[\lambda T_{90}]^{-1}) - 1}, \quad (1)$$

де  $T_{90}(x)$  – одна із альтернативних точок тверднення срібла  $T_{90}(Ag)$ , золота  $T_{90}(Au)$  або міді  $T_{90}(Cu)$ ;  $L_{\lambda}(T_{90})$  і  $L_{\lambda}(T_{90}(x))$  – спектральна яскравість АЧТ на довжині хвилі  $\lambda$  у вакуумі при  $T_{90}$  і  $T_{90}(x)$  відповідно;  $C_2 = 0,014388 \text{ м}\cdot\text{К}$  [8].

Положення про МТШ-90 не містить рекомендацій відносно методу експериментального визначення відношення яскравостей і не накладає обмежень на довжину хвилі, на якій це відношення вимірюється. Ставлять такі вимоги до реалізації шкали згідно з виразом (1):

- використовуваний прилад – пірометр – повинен бути достатньо монохроматичним;
- еталонним джерелом випромінювання при температурі  $T_{90}(x)$  є модель АЧТ.

В область високих температур понад температуру твердіння міді побудова шкали виконується за допомогою екстраполяції за допомогою радіаційного пірометра, який має високу лінійність функції перетворення.

Вираз (1) є ідеалізованим виразом для відношення спектральних яскравостей, що визначає  $T_{90}$ . Оскільки будь-який монохроматичний пірометр має скінченну смугу пропускання, можна записати

$$\begin{aligned} r &= \frac{\int L_{\lambda}(T_{90}) \tau_c(\lambda) \tau_i(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{\int L_{\lambda}(T_{90}(Ag)) \tau_c(\lambda) \tau_i(\lambda) s(\lambda) d\lambda} = \\ &= \frac{\int L_{\lambda} T_{90} S(\lambda) d\lambda}{\int L_{\lambda}(T_{90}(Ag)) S(\lambda) d\lambda}, \quad (2) \end{aligned}$$

де  $r$  – експериментально виміряне відношення сигналів приймачів;  $L_{\lambda}(T_{90}) = \pi^{-1} C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T_{90}) - 1]^{-1}$ ;  $\tau_i(\lambda)$  – спектральне пропускання інтерференційного фільтра;  $\tau_c(\lambda)$  – спектральне пропускання всіх інших оптичних компонентів пірометра;  $s(\lambda)$  – спектральна чутливість приймача випромінювання;  $S(\lambda)$  – спектральна чутливість всього пірометра.

Таблиця 3

Основні реперні точки радіаційної температурної шкали вище за 961,78°C

Реперна точка	Позначення реперної точки	Температура за МТШ-90	
		t90/°C	T90/R
Точка тверднення срібла	Ag	961,78	1234,93
Точка тверднення золота	Au	1064,18	1337,33
Точка тверднення міді	Cu	1084,62	1357,77

Реалізація радіаційної шкали згідно з рівнянням (2) вимагає калібрування термометра у точці тверднення срібла (чи золота, чи міді), визначення спектральної чутливості пірометра та реалізації шкали співвідношення енергетичних яскравостей, що, своєю чергою, вимагає врахування нелінійності приймача випромінення.

Для відтворення одиниці температури та побудови температурної шкали використовується така апаратура:

- реперна точка, заповнена чистим металом, згідно з табл. 3, виконана у вигляді АЧТ;
- групи температурних ламп;
- пірометр-компаратор яскравостей;
- допоміжна апаратура.

Вище від точки міді були рекомендовані й вторинні реперні точки тверднення нікелю (1728K), паладію (1828,0 K) і платини (2041,4) [9]. Проте практична реалізація чорних тіл на цих точках пов'язана з серйозними труднощами внаслідок того, що як матеріалом тигля, де топляться метали, використовується графіт, а відповідно до бінарних фазових діаграм навіть невелика кількість вуглецю, яка потрапляє із стінок тигля в метал, істотно знижує його температуру топлення.

Національний метрологічний інститут Японії (NMIJ) запропонував альтернативний метод реалізації високотемпературних реалізації реперних точок, оснований на використанні матеріалу фазового переходу не чистих металів, а сполук металів і вуглецю – (евтектик) [10]. Дослідження відповідно до європейського проекту NIMERT [11] плато топлення і тверднення реперних точок показали перспективність нового методу [12].

Отже, згідно з МПТШ-90 радіаційна температурна шкала відтворюється лише вище від точки срібла. Однак необхідність у калібруванні пірометрів нижче

від цієї температури є також важливою, оскільки, як показано вище, у багатьох технологічних процесах застосовують радіаційні термометри з робочим температурним діапазоном від  $-50$  до  $1000$  °С. До того ж діапазони температури багатьох радіаційних термометрів покривають діапазон вище і нижче від точки срібла. Тому для забезпечення температурних вимірювань в цьому інтервалі використовують шкалу, побудовану на основі реперних точок, подану в табл. 4.

Міжнародна температурна шкала (МТШ-90) [1] визначає температуру між потрійною точкою води та точкою тверднення срібла ( $961,78$  °С) за допомогою еталонного платиного термоперетворювача опору, який калібрується в реперних точках і використовує точно визначені інтерполяційні процедури. Отже, пряма реалізація МТШ-90 у цьому температурному діапазоні повинна ґрунтуватись на каліброваних еталонних засобах вимірювання – термоперетворювачах опору. Для термометрії за випроміненням еталонний платиновий термоперетворювач опору є чутливим елементом, який вимірює температуру абсолютно чорного тіла. При цьому випромінювачі типу абсолютно чорне тіло (АЧТ) слугують еталонними джерелами для калібрування пірометрів. Саме така схема, що ґрунтується на випромінювачах типу АЧТ з еталонними платиновими термоперетворювачами опору, існувала та існує для метрологічного забезпечення термометрії за випроміненням.

Аналіз показує, що такий підхід не може забезпечити підвищених вимог до точності радіаційних вимірювань, оскільки реалізація температурної шкали істотно залежить від варіації властивостей використаних засобів вимірювання – платинових термоперетворювачів опору, при зміні температури. У табл. 5 наведені значення непевності внаслідок зміни властивостей термоперетворювача згідно з [13].

Таблиця 4

Основні реперні точки температурної шкали 0 – 961,78 °С

Реперна точка	Позначення реперної точки	Температура за МТШ-90	
		$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	$T_{90}/\text{R}$
Потрійна точка води	TPW	0,01	273,16
Точка плавлення галію	Ga	29,7646	302,9146
Точка тверднення індію	In	156,5985	429,7485
Точка тверднення олова	Sn	231,928	505,078
Точка тверднення цинку	Zn	419,527	692,677
Точка тверднення алюмінію	Al	660,323	933,473
Точка тверднення срібла	Ag	961,78	1234,93

Таблиця 5

**Значення непевності внаслідок зміни властивостей еталонного платинового термоперетворювача**

№	Джерело непевності	Наближений інтервал коливань температури, мК
1	Варіації властивостей різних термометрів опору	1-3
2	Ефект окиснення платини – утворення і розклад двовимірних та тривимірних оксидів	0,1-0,7
3	Зміна концентрації вакансій кристалічної ґратки	1-2
4	Напруження та деформації чутливого елемента	0,5-1
5	Довготривалий дрейф опору	1-10

Також необхідно відзначити таке. Для перетворювачів термоелектричних непевність виникає внаслідок каталітичного ефекту на поверхні термоелектродів, вироблених з металів платинової групи, під час контакту з горючими сумішами газів. Будучи каталітично інертною відносно горючих сумішей газів, платина сприяє прискоренню реакції компонентів суміші з інтенсивним виділенням тепла на поверхні термоелектродів з їх нагріванням. Тому покази перетворювача термоелектричного з термоелектродами, які безпосередньо стикаються з горючими сумішами, не характеризують температуру, що установилася між ним і навколишнім середовищем, а значно вищу, спричинену каталітичним нагріванням [14]. Також випаровування матеріалу платинового термоперетворювача за високих температур у вакуумі призводить до зміни метрологічних характеристик самого термоперетворювача.

**Обґрунтування доцільності розроблення радіаційної температурної шкали в область температур до від 0°C до 961,78 °C.** Є доцільним розширення радіаційної температурної шкали в область температур до від 0°C до 961,78 °C для забезпечення вимірювань температури за випромінюванням в діапазоні від -50 °C до 1000 °C.

Останнім часом у всіх провідних метрологічних центрах розвивається метод, який полягає в побудові радіаційної температурної шкали на симетричній і доконтактній температурній шкалі, а саме: використовуються випромінювачі типу АЧТ на реперних точках МТШ-90, проміжні температури між реперними точками визначаються інтерполяцією за допомогою пірометра-компаратора. Було показано [2], що при цьому похибки побудови шкали можна істотно зменшити, якщо замість імерсійного термометра використовується еталонний радіаційний термометр як еталон-переносник. Звичайно, це означає, що еталонний

радіаційний термометр калібрується абсолютним способом без звірення його з імерсійним термометром.

Тому сьогодні актуальним є метод реалізації температурної шкали в діапазоні 0°C до 961,78 °C на основі калібрування пірометрів у кількох реперних точках, реалізованих у вигляді абсолютно чорних тіл (мультиреперно наближених) з подальшою інтерполяцією значень температури між реперними точками. Наближення, що ґрунтується на реперних точках, має значно менші похибки калібрування і необхідне для метрологічного забезпечення термометрії за випромінюванням найвищого метрологічного рівня.

Отже, побудова температурної шкали за допомогою термометрії за випромінюванням нижче від точки тверднення срібла відбуватиметься симетрично побудові платинової шкали: модель АЧТ на реперних точках та інтерполяція між реперними точками. Звичайно, первинною є шкала, основана на термометричних властивостях платини. Але у майбутньому ця ситуація може змінитися, оскільки властивості платини не настільки відомі, щоб можна було записати рівняння стану в явному вигляді. Вираз, який можна сьогодні записати, містить невідомі, що залежать від температури і не можуть бути обчислені з перших принципів. Тому для градування такого термометра необхідно прямо або опосередковано порівнювати його з первинним термометром при стількох значеннях температури, скільки необхідно для визначення невідомих членів, які залежать від температури.

З цього погляду пірометр, що ґрунтується на фундаментальному законі Планка, не має цих недоліків і надалі може бути основним інструментом для побудови температурної шкали не тільки в області високих температур від 961,78°C до 1800°C, але й в області температур від 0°C до 961,78 °C .

Необхідно зазначити, що у зв'язку зі зниженням температурного діапазону необхідно виконувати вимірювання не в монохроматичному спектральному

каналі, а в деякому спектральному інтервалі. У зв'язку з логарифмічною природою закону Планка, за низьких температур (нижче за 961,78 °С) кількість отриманої термометром радіації зменшується логарифмічно, що робить монохроматичний термометр непридатним, для використання у цьому температурному діапазоні. Тому тут використовуються пірометри часткового випромінювання, що накладає вимоги на реалізацію схеми калібрування.

**Висновок.** Тому актуальним є дослідження таких питань – засобів і методів побудови температурної шкали за випромінюванням абсолютно чорного тіла на реперній точці в області температур до від 0°С до 961,78 °С; абсолютно чорне тіло як еталон-переносник; методи інтерполяції температурної шкали між реперними точками.

1. IEC TS 62492 Radiation thermometers – Part 1: Specifications for Radiation Thermometers. 2. ДСТУ 3518-97 Термометрія. Терміни та визначення 3. Гоц Н.Е. Сравнительная характеристика методов пирометрии / Научно-технический журнал «Приборы +Автоматика». – Обнинск, 2007. – С.35–50. 4. <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/ProductsAndAccessories/>

ries/ 5. <http://www.mikroninfrared.com/catalog>. 6. <http://www.fluke.co.uk>. 7. Preston-Thomas H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), Metrologia, 1990, 27(1), 3-10. 8. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – С. 79. 9. Yamada Y, Sakate H, Sakuma F and Ono A 1999 A possibility of practical high temperature fixed points above the copper point Proc. 7th Int. Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science (Tempmeko,) pp 535–40. 10. Yamada Y, Sakate H, Sakuma F and Ono A 1999 Radiometric observation of melting and freezing plateaus for a series of metal-carbon eutectic points in the range 1330°C to 1950°C Metrologia 36 207–9. 11. Machin, G.; Beynon, G.; Edler, F.; Fourrez, S.; Hartmann, J.; Lowe, D.; Morice, R.; Sadli, M.; Villamanan, M. HIMERT: A Pan-European Project for the Development of Metal-Carbon Eutectics as Temperature Standards// TEMPERATURE: Its Measurement and Control in Science and Industry;; Eighth Temperature Symposium. AIP Conference Proceedings, Volume 684, pp. 285–290 (2003). 12. Emma R Woolliams, Graham Machin, David H Lowe and Rainer Winkler. Metal (carbide)-carbon eutectics for thermometry and radiometry: a review of the first seven years//Metrologia 43 (2006) R11–R25. 13. [www.temperaturas.ru](http://www.temperaturas.ru).