



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **86030** (13) **U**
(51) МПК (2013.01)
G01J 5/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

| | |
|---|---|
| (21) Номер заявки: u 2013 07374 | (72) Винахідник(и): Жуков Леонід Федорович (UA), Корнієнко Андрій Леонідович (UA) |
| (22) Дата подання заявки: 11.06.2013 | (73) Власник(и): ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ НАН УКРАЇНИ, бул. Вернадського, 34/1, м. Київ-142, 03680 (UA) |
| (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.12.2013 | |
| (46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.12.2013, Бюл.№ 23 | |

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

(57) Реферат:

Спосіб вимірювання температури включає вимірювання пірометром на симетрично розподілених по спектру трьох робочих хвилях трьох однокольорових умовних температур, які пов'язані з дійсною температурою об'єкта через його відповідні випромінювальні здатності трьома пірометричними рівняннями. Для вирішення системи яких значення випромінювальної здатності на другій робочій хвилі визначають часткою від ділення суми випромінювальних здатностей на першій і третій робочих хвилях. Після цього отриману систему трьох пірометричних рівнянь з трьома невідомими вирішують відносно дійсної температури об'єкта чисельним методом, для якого послідовні обчислення виконують для температур в діапазоні, обмеженому максимальною однокольоровою умовною температурою і максимально можливою технологічною температурою. В першому циклі обчислень визначають максимально наближене до лівої границі контрольованого температурного діапазону значення розрахункової температури. Потім перевіряють правильність рішення системи, по розрахунковому значенню другої умовної температури, його відхиленню від виміряного значення цієї умовної температури і значенню критерію відповідності. Потім проводять третій і наступні цикли аналогічних обчислень і перевірок.

UA 86030 U

Корисна модель належить до області оптичної термометрії і може бути використана для вимірювань дійсної температури (T) об'єктів з лінійними спадаючими, зростаючими, сірими і термодинамічно рівноважними, а також нелінійними монотонними спадаючими і зростаючими опуклими та увігнутими і екстремальними спектральними розподілами невідомої і випадково змінної випромінювальної здатності (ϵ).

Відомий спосіб вимірювання температури (пат. 54756 України, МПК G01J 5/00. Спосіб вимірювання температури / Л.Ф. Жуков, А.В. Богдан. Опубл. 15.09.2005, Бюл. № 9, 2005 р.), при якому вимірюють дві триколіорові або більш високі порядки температури, одна з яких вище, а інша нижче дійсної температури об'єкта, що термометрується. Потім дійсну температуру об'єкта визначають як середнє арифметичне цих двох виміряних кольорових температур. Причому ця рівність має місце тільки для сполучених налагоджувальних хвиль і відповідно сполучених кольорових температур. До недоліків цього способу можна віднести складність необхідного визначення сполучених налагоджувальних довжин хвиль. Тільки виміряні на сполучених налагоджувальних хвилях зв'язані кольорові температури забезпечують однозначне визначення дійсної температури об'єкта. Похибки цього способу в основному залежать від похибок визначення довжин сполучених налагоджувальних хвиль. Відхилення використовуваних у вимірах налагоджувальних довжин хвиль від їх сполучених значень відповідно визначають відхиленням вимірюваних кольорових температур від необхідних для розрахунку їх сполучених значень і відповідно похибки вимірювань дійсної температури.

Найбільш близьким до способу, що заявляється, є спосіб вимірювання температури (пат. 76096 України, МПК G01J 5/00. Спосіб вимірювання температури / Л.Ф. Жуков, А.Л. Корнієнко. Опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24, 2012). Спосіб призначений для вимірювання дійсної температури об'єкта з невідомою і змінною випромінювальною здатністю шляхом вимірювань на симетрично розподілених по спектру трьох робочих хвилях трьох одноколіорових умовних температур, які пов'язані з дійсною температурою об'єкта через його відповідні випромінювальні здатності на робочих хвилях трьома відповідними пірометричними рівняннями, для вирішення системи яких випромінювальну здатність на другій робочій хвилі замінюють середнім арифметичним випромінювальних здатностей на першій і третій робочих хвилях. Потім отриману систему трьох пірометричних рівнянь з трьома невідомими вирішують відносно дійсної температури об'єкта чисельним методом, для якого послідовні обчислення виконують для температур в діапазоні, обмеженому максимальною одноколіоровою умовною температурою і максимально можливою технологічною температурою.

Спільними суттєвими ознаками відомого і способу, що заявляється, є вимірювання умовних одноколіорових температур об'єкта на симетрично розподілених по спектру трьох робочих хвилях з подальшим розрахунком за ними дійсної температури об'єкта, що термометрується.

Основний недолік способу полягає в різкому підвищенні його похибок при відхиленні спектральних розподілів випромінювальної здатності від лінійних. Для лінійних спадаючих, зростаючих, сірих і термодинамічно-рівноважних спектральних розподілів випромінювальної здатності домінуючі в оптичній термометрії методичні похибки відомого способу дорівнюють нулю. Проте найбільш поширеними в термометричній практиці є нелінійні монотонні спадаючі і зростаючі опуклі та увігнуті і екстремальні спектральні розподіли з невідомою і випадково змінною випромінювальною здатністю (ϵ). Причому, зі збільшенням цих відхилень, тобто з підвищенням нелінійності, похибки відомого способу зростають.

В основу даної корисної моделі поставлена задача підвищення точності вимірювання температури об'єктів з нелінійними монотонними спадаючими і зростаючими опуклими та увігнутими і екстремальними спектральними розподілами випромінювальної здатності з її невідомими і випадково змінними значеннями.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі вимірювання температури, який включає в першому циклі обчислень, виконуваному при $d' = 2$ та $\epsilon'_2 = (\epsilon_1 + \epsilon_3)/2$, визначення максимально наближеної до лівої границі контрольованого температурного діапазону значення розрахункової температури T'_p , при якому, згідно з корисною моделлю, ліва частина узагальнюючого рівняння системи максимально наближається до нуля, потім перевіряють правильність рішення системи, тобто значення T'_p по розрахунковому значенню другої умовної температури, його відхиленню Δ' від виміряного значення цієї умовної температури $\Delta' = S'_{2p} - S_2$ і значенню критерію відповідності KP , причому при $\Delta' < KP$ значення T приймають рівним T'_p , а в разі $\Delta' > KP$ і при лівій частині узагальнюючого рівняння системи меншій нуля виконують другий цикл аналогічних обчислень і перевірок для $d'' = 2 - \Delta d$ і при

$\Delta'' < K_P$ значення T приймають рівним T_p'' , а при $\Delta' > \Delta'' > \dots > \Delta^{m \dots n} > K_P$ проводять третій і наступні цикли аналогічних обчислень і перевірок для $d''' = 2 - 2\Delta d$ і $d^{m \dots n} = 2 - n\Delta d$, а у разі перевищення або рівності значення Δ чергового наступного циклу значенням Δ попереднього циклу використовують n рівне середньому арифметичному n для цих сусідніх циклів. Крім цього, при лівій частині узагальнюючого пірометричного рівняння системи більший нуля n в розрахункових формулах дільника d використовують зі знаком плюс.

Спосіб вимірювання температури реалізується наступним чином.

Для вимірювань дійсної температури об'єкта на симетрично розподілених по спектру трьох робочих хвилях λ_1 , λ_2 і λ_3 вимірюють три однокольорові умовні температури S_1 , S_2 і S_3 , які за законом Віна пов'язані з дійсною температурою об'єкта, що термометрується, T через відому другу постійну Планка c_2 і відповідні випромінювальні здатності ε_1 , ε_2 і ε_3 . Потім для цих виміряних умовних температур складають систему трьох пірометричних рівнянь з чотирма невідомими T , ε_1 , ε_2 і ε_3

$$\begin{cases} \frac{1}{T} - \frac{1}{S_1} = \frac{\lambda_1}{c_2} \cdot \ln(\varepsilon_1) \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{S_2} = \frac{\lambda_2}{c_2} \cdot \ln(\varepsilon_2) \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{S_3} = \frac{\lambda_3}{c_2} \cdot \ln(\varepsilon_3) \end{cases}$$

Симетричний розподіл робочих довжин хвиль забезпечує апіорну інформацію про ε_2 через ε_1 і ε_3 . Для будь-яких лінійних і нелінійних спектральних розподілів випромінювальної здатності об'єкта, що термометрується $\varepsilon_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/d$. Для першого циклу обчислень використовують значення $d' = 2$, тобто $\varepsilon'_2 = (\varepsilon'_1 + \varepsilon'_3)/2$. Після підстановки $\varepsilon'_2 = (\varepsilon'_1 + \varepsilon'_3)/2$ отриману систему можна привести до наступного узагальнюючого рівняння

$$\frac{\lambda_2}{c_2} \cdot \ln \left[\frac{e^{\frac{(S_1 - T) \cdot c_2}{S_1 \cdot T \cdot \lambda_1}} + e^{\frac{(T - S_1) \cdot c_2}{\lambda_3 \cdot T \cdot S_2}}}{2} \right] - \frac{1}{T} + \frac{1}{S_3} = 0$$

яке, як відомо, аналітично не вирішується. Тому, це рівняння вирішується чисельним методом, шляхом підбору значення T_p' , при якому ліва частина рівняння дорівнює нулю або максимально наближена до нього. Причому, значення T_p' вибирають в діапазоні, обмеженому максимальною умовною однокольоровою температурою S_1 , S_2 або S_3 і максимально можливою технологічною температурою. Для реалізації способу праву межу діапазону розрахункових температур вибирають з запасом, який визначається похибками вимірювань умовних температур і температурною динамікою об'єкта, що перекидає максимальну технологічну температуру контрольованого процесу. Відповідно до отриманих із закону Віна пірометричних рівнянь, дійсна температура T не може бути меншою максимальної однокольорової умовної температури ($T \geq S_{nmax}$), так як $\varepsilon_n \leq 1$. При цьому T також не може перевищувати максимально можливу для об'єкта, що термометрується, технологічну температуру. Цілком очевидно, що при $d = 2$ ліва частина узагальнюючого рівняння дорівнює нулю і методичні похибки запропонованого способу вимірювань температури об'єктів з лінійними спадаючими і зростаючими, сірими і, тим більше, термодинамічно-рівноважними розподілами випромінювальної здатності визначаються дискретністю перебору значень T . Для швидкодіючих сучасних мікропроцесорів і комп'ютерної техніки цю дискретність можна встановити практично будь-якою, в тому числі в частках $1 \text{ } \mu$. При цьому узагальнююче рівняння, залежно від оптичних характеристик об'єкта, що термометрується і пірометричної системи, може мати кілька рішень. Однак, для будь-яких зазначених характеристик найбільш наближене до лівої границі температурного діапазону значення розрахункової температури є шуканим результатом чисельного рішення узагальнюючого рівняння. У разі відхилень розподілів випромінювальної здатності від лінійних і зростанні цієї нелінійності ліва частина

узагальнюючого рівняння не дорівнює нулю і віддаляється від нього. Тому необхідно перевірити правильність рішення системи та її узагальнюючого рівняння, а також відповідність цього рішення встановленим метрологічним вимогам. Для такої перевірки за отриманим із другого рівняння системи розрахунковим рівнянням другої умовної температури знаходять її значення і порівнюють з її вимірним значенням S_2 , тобто визначають $\Delta' = S'_{2p} - S_2$. Потім Δ' перевіряють за критерієм відповідності КР, який задається з урахуванням вимог до точності вимірювань T , похибок вимірювань S_1, S_2, S_3 і дискретності значень T_p , що задаються. При $\Delta' < \text{КР}$ значення T приймають рівним T_p . Тут слід зазначити, що зі збільшенням значення КР підвищується допустиме відхилення лівої частини узагальнюючого рівняння від нуля і навпаки. У разі $\Delta' > \text{КР}$ і лівій частині узагальнюючого рівняння системи меншій нуля виконують другий цикл аналогічних обчислень і перевірок для $d'' = 2 - \Delta d$. Для найбільш поширених монотонних опуклих спадаючих і зростаючих, а також для опуклих екстремальних розподілів, ліва частина узагальнюючого рівняння системи менше нуля. При цьому, для зазначених розподілів ε_2 об'єкта, що термометрується, перевищує випромінювальну здатність на другій довжині хвилі λ_2 для лінеаризованого по ε_1 і ε_3 розподілу. При $\Delta'' < \text{КР}$ значення T приймають рівним T_p'' . Якщо $\Delta' > \Delta'' > \dots > \Delta^{n \dots n} > \text{КР}$, проводять третій і наступні цикли аналогічних обчислень і перевірок для $d''' = 2 - 2\Delta d$ і $d^{n \dots n} = 2 - n\Delta d$, а у разі перевищення або рівності значення Δ чергового наступного циклу значенням Δ попереднього циклу використовують n рівне середньому арифметичному n для цих сусідніх циклів. Наприклад, при $\Delta' \leq \Delta'' > \text{КР}$ значення n для третього циклу дорівнюватиме $0,5$ ($n = 0 + 1/2$), так як для першого циклу $n = 0$, а для другого - $n = 1$. У разі $\Delta' > \text{КР}$ і лівій частині узагальнюючого рівняння системи більшій нуля, аналогічно описаному вище алгоритму виконують другий і наступні цикли аналогічних обчислень і перевірок для $d'' = 2 - \Delta d$ і $d^{n \dots n} = 2 + n\Delta d$.

Таким чином, запропонований спосіб дозволяє повністю виключити домінуючу в оптичній термометрії методичну складову із похибок вимірювань. Наприклад, для отриманого експериментально спадаючого опуклого розподілу випромінювальної здатності вольфраму, а також для його дзеркальних спадаючих увігнутих і зростаючих опуклих і увігнутих розподілів методичні похибки відомого способу сягають відповідно 0,50; 0,50; 0,90 і 1,25 % при оптимальних для кремнієвого детектора налаштуваннях багатокольорової пірометричної системи ($\lambda_3 - \lambda_1 \geq 0,6$ мкм і $\lambda_2 = 0,8$ мкм). Запропонований спосіб дозволяє повністю виключити зазначені методичні похибки, тобто при реальній інструментальній складовій 0,2 % знизити похибку вимірювань відповідно в 3,50; 3,50; 5,50 і 7,25 рази. При $\lambda_3 - \lambda_1 \geq 0,6$ мкм похибки різко знижуються за рахунок підвищення відносної лінійності розподілів до відповідно 0,5; 0,5; 0,9 і 1,25 %, тобто практично в 1,5-2,2 рази. Додаткове зниження похибки при нелінійних розподілах випромінювальної здатності забезпечується також вибором довжини другої хвилі в середині спектрального діапазону з найбільш лінійним розподілом і високим значенням випромінювальної здатності, що забезпечує вимірювання першої і третьої умовних температур в межах робочого спектрального діапазону пірометра. Наприклад, похибки при $\lambda_2 = 0,8$ мкм для зазначених вище монотонних нелінійних розподілів відповідно рівні 0,5; 0,5; 1,2 і 1,3 %, а при зміщенні другої хвилі в діапазон з більш лінійними розподілами ($\lambda_2 = 1,0$ мкм) ці похибки знижуються відповідно до 0,2; 0,2; 0,6 і 0,6 %, тобто в 2,0-2,5 рази. При такому виборі λ_2 похибки додатково знижуються за рахунок підвищення випромінювальної здатності. Наприклад, в спектральному діапазоні 0,5-1,1 мкм випромінювальна здатність вольфраму становить 0,3588-0,4661 і визначає похибку в 0,5 %. При підвищенні випромінювальної здатності на 0,4 тобто до 0,7588-0,8661 похибка зменшується від 0,5 до 0,3 %. Причому, при цьому зміщенні λ_2 необхідно забезпечити вимірювання першої і третьої умовних температур в межах робочого спектрального діапазону пірометра. Наприклад, при $\lambda_2 = 1,0$ мкм і $\lambda_3 - \lambda_1 = 0,6$ мкм робочий спектральний діапазон пірометра повинен перекривати ділянку спектра від 0,7 до 1,3 мкм. Таким чином, запропонований вибір $\lambda_3 - \lambda_1$ і λ_2 забезпечує підвищення точності вимірювань в 1,5-2,5 рази.

Використання запропонованого способу дозволяє в порівнянні з відомим рішенням в 1,5-2,5 рази знизити похибки вимірювань температури об'єктів з реальними монотонними нелінійними

спадаючими, зростаючими, опуклими і увігнутими розподілами випромінювальної здатності, за рахунок запропонованого вибору довжин хвиль λ_1 , λ_2 і λ_3 .

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

5

1. Спосіб вимірювання температури, що включає вимірювання пірометром на симетрично розподілених по спектру трьох робочих хвилях трьох однокольорових умовних температур, які пов'язані з дійсною температурою об'єкта через його відповідні випромінювальні здатності трьома пірометричними рівняннями, для вирішення системи яких значення випромінювальної здатності на другій робочій хвилі визначають часткою від ділення суми випромінювальних здатностей на першій і третій робочих хвилях на дільник d , після чого отриману систему трьох пірометричних рівнянь з трьома невідомими вирішують відносно дійсної температури об'єкта чисельним методом, для якого послідовні обчислення виконують для температур в діапазоні, обмеженому максимальною однокольоровою умовною температурою і максимально можливою технологічною температурою, який **відрізняється** тим, що в першому циклі обчислень, виконуваному при $d' = 2$ та $\varepsilon'_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2$, визначають максимально наближене до лівої границі контрольованого температурного діапазону значення розрахункової температури T'_p , при якому ліва частина узагальнюючого рівняння системи максимально наближається до нуля, потім перевіряють правильність рішення системи, тобто значення T'_p по розрахунковому значенню другої умовної температури, його відхиленню Δ' від виміряного значення цієї умовної температури $\Delta' = S'_{2p} - S_2$ і значенню критерію відповідності KP , причому при $\Delta' < KP$ значення T приймають рівним T'_p , а в разі $\Delta' > KP$ і при лівій частині узагальнюючого рівняння системи меншій нуля виконують другий цикл аналогічних обчислень і перевірок для $d'' = 2 - \Delta d$ і при $\Delta'' < KP$ значення T приймають рівним T''_p , а при $\Delta' > \Delta'' > \dots > \Delta^{n-1} > KP$ проводять третій і наступні цикли аналогічних обчислень і перевірок для $d''' = 2 - 2\Delta d$ і $d^{n-1} = 2 - n\Delta d$, а у разі перевищення або рівності значення Δ чергового наступного циклу значенням Δ попереднього циклу використовують n рівне середньому арифметичному n для цих сусідніх циклів.
2. Спосіб по пункту 1, який **відрізняється** тим, що при лівій частині узагальнюючого пірометричного рівняння системи більший нуля n в розрахункових формулах дільника d використовують зі знаком плюс.

25

30

Комп'ютерна верстка М. Ломалова

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601