

Винахід відноситься до області кольорової пірометрії і може бути використаний при визначенні істинної температури $T_{\text{іст}}$ селективно випромінюючої поверхні з відомим характером залежності спектральної випромінюючої спроможності від довжини хвилі $\varepsilon = f(\lambda)$ в діапазоні вимірювань (λ_1, λ_3) .

Відомий спосіб трихроматичної кольорової пірометрії з визначення $T_{\text{іст}}$ селективно випромінюючої поверхні у випадку, коли її спектральна випромінююча спроможність ε_λ лінійно залежить від довжини хвилі: $\varepsilon_\lambda = f(\lambda) = a + b\lambda$ [див. "Цветовой пирометр истинной температуры", а.с. №476464, СССР. У цьому способі спочатку вимірюють три яскравісні температури для трьох довжин хвиль λ_1 , λ_2 і λ_3 , відповідно, а потім по них визначають дві невідомі: істинну температуру $T_{\text{іст}}$ і комплекс $a(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (\varepsilon_{\lambda 3} - \varepsilon_{\lambda 1}) / \varepsilon_{\lambda 2}$ шляхом рішення системи двох трансцендентних рівнянь:

$$\begin{cases} \ln \frac{b_{\lambda 1}}{b_{\lambda 2}} = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \frac{1}{T_{\text{іст}}} - 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \ln \left[1 - \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_2} \cdot a(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \right] \\ \ln \frac{b_{\lambda 1}}{b_{\lambda 2}} = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \frac{1}{T_{\text{іст}}} - 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \ln \left[1 - \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_2} \cdot a(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \right] \end{cases}$$

[див. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. М., 1961].

Основний недолік способу-аналогу полягає в тому, що $T_{\text{іст}}$ не виражається з однієї формули і для її визначення необхідно вирішити систему двох трансцендентних рівнянь, що містять крім $T_{\text{іст}}$ невідомий комплекс $a(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, який залежить від ε_1 , ε_2 і ε_3 .

Найбільш близьким за технічною сутністю і досягаемому результату є спосіб трихроматичної кольорової пірометрії, так званий спосіб подвійного спектрального відношення, в якому попередньо визначаються три яскравісні температури: $T_{\text{я}}(\lambda_1)$, $T_{\text{я}}(\lambda_2)$ і $T_{\text{я}}(\lambda_3)$ для діапазону $\lambda \in (\lambda_1, \lambda_3)$ з лінійною залежністю спектральної випромінюючої спроможності від довжини хвилі: $\varepsilon(\lambda) = a + b\lambda$. Потім, по вимірних значеннях $T_{\text{я}1}$, $T_{\text{я}2}$ і $T_{\text{я}3}$ знаходять дві кольорові температури $T_{\text{к}12}$ і $T_{\text{к}23}$ за формулою:

$$T_{\text{к}ij} = \frac{\lambda_i^{-1} - \lambda_j^{-1}}{(\lambda_i T_{\text{я}i})^{-1} - (\lambda_j T_{\text{я}j})^{-1}}$$

Комбінуючи два вирази для $T_{\text{к}12}$ і $T_{\text{к}23}$, записують систему двох рівнянь з двома невідомими:

$$T_{\text{к}12}^{-1} = T_{\text{іст}}^{-1} - \frac{\Lambda_{12}}{C_2} \ln(1 + S)$$

{

$$T_{\text{к}23}^{-1} = T_{\text{іст}}^{-1} - \frac{\Lambda_{23}}{C_2} \ln(1 - S \cdot L)$$

де S - невідомий комплекс, $S = (\varepsilon_{\lambda 1} - \varepsilon_{\lambda 3}) / \varepsilon_{\lambda 2}$,

$$L = \frac{\varepsilon_{\lambda 2} - \varepsilon_{\lambda 3}}{\varepsilon_{\lambda 1} - \varepsilon_{\lambda 2}} = \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

L - відомий комплекс,

Спільне вирішення системи двох трансцендентних рівнянь чисельним методом дозволяє визначити істинну температуру $T_{\text{іст}}$. Другою невідомою тут є комплекс S , що містить лінійну залежність $\varepsilon_\lambda = a + b\lambda$, в неявній формі [див. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М., 1982]. Однак, якщо значення ε_λ , що входять у рівняння даної системи, розкласти в ряд і скористатися тільки першими членами розкладання, то для $T_{\text{іст}}$ можна отримати вираз в явному вигляді:

$$T_{\text{іст}} = \frac{T_{\text{к}23} T_{\text{к}12} (\lambda_3 - \lambda_1)}{\lambda_3 T_{\text{к}23} - \lambda_1 T_{\text{к}12}}$$

де $T_{\text{к}12}$ і $T_{\text{к}23}$ - кольорові температури двох спектральних відношень:

$\varepsilon_1/\varepsilon_2$ і $\varepsilon_2/\varepsilon_3$ [Див. Гордов А.Н. Основы пирометрии. М., 1971].

Суттєвим недоліком способу-прототипу є те, що якщо у першому випадку знову ж таки необхідно вирішувати систему двох трансцендентних рівнянь, то у другому маємо вкрай неточний вираз для $T_{\text{іст}}$, хоч він і в явному вигляді: похибка визначення $T_{\text{іст}}$ по ньому у п'ять разів вище, ніж похибка визначення кольорових температур $T_{\text{к}12}$ і $T_{\text{к}23}$ [див. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М., 1982].

Крім того, не так часто дисперсію спектральної випромінюючої спроможності $\varepsilon = f(\lambda)$ можна точно апроксимувати лінійною залежністю, так само як і лінійною залежністю типу $\ln \varepsilon_\lambda = a + b\lambda$ [див. Патенти США №3537314, Великобританії №1207984, ФРН №1648233 та ін., автор - Свет Д.Я.]. Для будь-яких інших типів залежності $\varepsilon = f(\lambda)$ методів коректного врахування дисперсії спектральної випромінюючої спроможності немає.

Основним недоліком способу подвійного спектрального відношення є слабка залежність результуючого сигналу від температури і погане відтворення даних досліді [див. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М., 1982]. Тому цей спосіб широкого розповсюдження не отримав.

В основу винаходу покладена задача удосконалення способу подвійного спектрального відношення, в якому - введенням процедури попереднього визначення проміжної довжини хвилі λ_2 по двох крайніх (базових) значеннях λ_1 та λ_3 і по характеру функціональної залежності $\varepsilon = f(\lambda)$, причому такого вибору λ_2 який забезпечує $\varepsilon_2 = \varepsilon_p = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2$, - та визначенням додаткової кольорової температури $T_{\text{к}13}$ (разом з $T_{\text{к}12}$ і $T_{\text{к}23}$) по вимірних раніше яскравісним $T_{\text{я}}(\lambda_1)$ і $T_{\text{я}}(\lambda_3)$, забезпечується точне визначення істинної температури $T_{\text{іст}}$ селективно випромінюючої поверхні та її спектральної випромінюючої спроможності для трьох довжин хвиль: $\varepsilon(\lambda_1)$, $\varepsilon(\lambda_2)$, $\varepsilon(\lambda_3)$ із замкнутих аналітичних виразів і при будь-якому наперед заданому характері залежності $\varepsilon = f(\lambda)$ в

діапазоні (λ_1, λ_3) .

Поставлена задача вирішується тим, що в способі трихроматичної кольорової пірометрії, що містить вимірювання яскравісних температур на базових довжинах хвиль $T_{я}(\lambda_1)$, $T_{я}(\lambda_3)$ для селективно випромінюючої поверхні з відомим характером залежності спектральної випромінюючої спроможності від довжини хвилі $\varepsilon=f(\lambda)$, у відповідності з винаходом попередньо визначають значення проміжної довжини хвилі λ_2 за формулою:

$$\lambda_2 = f^{-1}(\varepsilon_{ар}) = F(\lambda_1, \lambda_3),$$

де $f^{-1}(\varepsilon) = F(\varepsilon)$ - функція, зворотня до заданих для $\varepsilon=f(\lambda)$, $\varepsilon_{ар}$ - середньоарифметичне від ε_1 і ε_3 :

$$\varepsilon_{ар} = \frac{1}{2}[(\varepsilon(\lambda_1) + \varepsilon(\lambda_3))] \equiv \frac{1}{2}[(f(\lambda_1) + f(\lambda_3))].$$

Одночасно з $T_{я1}$ і $T_{я3}$ вимірюють яскравісну температуру $T_{я2}$ для проміжної довжини хвилі λ_2 , знайденої вище, потім разом з $T_{к12}$ і $T_{к23}$ додатково визначають з формули по $T_{я1}$ та $T_{я3}$ значення кольорової температури $T_{к13}$ для базових значень λ : (λ_1 та λ_3), а істинну температуру $T_{іст}$ визначають методом послідовних наближень із замкнутого аналітичного виразу:

$$\frac{1}{T_{і+1}} = \frac{1}{T_{к13}} - 2 \frac{\Lambda_{13}}{C_2} \cdot \text{arth} \left\{ \frac{1}{2} \left(\exp \left[\frac{C_2}{\Lambda_{12}} \left(\frac{1}{T_{к12}} - \frac{1}{T_i} \right) \right] - \exp \left[\frac{C_2}{\Lambda_{23}} \left(\frac{1}{T_{к23}} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \right) \right\},$$

де T_i і $T_{і+1}$ - відповідно попереднє (i-те) і наступне (i+1-ше) наближення $T_{іст}$ для кожної ітерації, в якості першого наближення для $T_{іст}$ беруть значення:

$$T_{іст(1)} \equiv T_{і=1} = T_{к23} \cdot T_{к12} \cdot (\lambda_3 - \lambda_1) / (\lambda_3 T_{к23} - \lambda_1 T_{к12}),$$

де $T_{к12}$ і $T_{к23}$ - кольорові температури, що віднаходяться за формулою:

$$T_{кij} = (\lambda_i^{-1} - \lambda_j^{-1}) / (\lambda_i^{-1} \cdot T_{яi}^{-1} - \lambda_j^{-1} \cdot T_{яj}^{-1}).$$

Останніми знаходять невідомі значення спектральної випромінюючої спроможності селективної поверхні $\varepsilon(\lambda_1)$, $\varepsilon(\lambda_2)$ і $\varepsilon(\lambda_3)$, які визначають за формулою:

$$\varepsilon(\lambda_j) = \exp \left[\frac{C_2}{\lambda_j} \left(\frac{1}{T_{іст}} - \frac{1}{T_{яj}} \right) \right],$$

де $T_{іст}$ - істинна температура, знайдена вище; $T_{яj}$ - значення яскравісних температур, заміряних для трьох довжин хвиль, відповідно $j = 1, 2$ і 3 .

Такий спосіб трьоххвильової пірометрії забезпечує безпосереднє визначення по точних формулах істинної температури селективно випромінюючої поверхні $T_{іст}$ та її спектральну випромінюючу спроможність ε для трьох довжин хвиль в діапазоні $\lambda \in (\lambda_1, \lambda_3)$ з будь-яким характером дисперсії $\varepsilon=f(\lambda)$, а це виключає методичну похибку при визначенні $T_{іст}$, гарантує високу точність отриманих результатів, властиву саме кольоровій пірометрії, і різко розширює можливості вимірювання температур селективно випромінюючої поверхні з будь-яким характером дисперсії: $\varepsilon=f(\lambda)$.

Пропозиція пояснюється наступним: лише в одному-єдиному випадку, при $\varepsilon_2 = \varepsilon_{ар} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2$ система трьох рівнянь, кожне з яких являє собою вираз для кольорової температури через відношення значень спектральної випромінюючої спроможності:

$$T_{кij}^{-1} = T_{іст}^{-1} - \frac{\Lambda_{ij}}{C_2} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda i}}{\varepsilon_{\lambda j}}, \Lambda_{ij} = \lambda_i^{-1} - \lambda_j^{-1},$$

"замикається" з виключенням зразу трьох невідомих: ε_1 , ε_2 і ε_3 . У цьому випадку логарифм відношення $\varepsilon_1/\varepsilon_3$ можна виразити через логарифм $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ і $\varepsilon_3/\varepsilon_2$:

$$\ln \frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 3}} = \ln \frac{\varepsilon_{ар} + \Delta\varepsilon/2}{\varepsilon_{ар} - \Delta\varepsilon/2} = 2 \text{arth} \left(\frac{\Delta\varepsilon}{2\varepsilon_{ар}} \right), \Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_3,$$

де перемінна функції арктангенс гіперболічний $\Delta\varepsilon/2\varepsilon_{ар}$ виражається таким чином:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2\varepsilon_{ар}} = \frac{\varepsilon_{\lambda 1} - \varepsilon_{\lambda 3}}{2\varepsilon_{\lambda 2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 2}} - \frac{\varepsilon_{\lambda 3}}{\varepsilon_{\lambda 2}} \right), \varepsilon_{\lambda 2} \equiv \varepsilon_{ар}.$$

Отже, в результаті вирішення системи трьох рівнянь - виражень для трьох кольорових температур $T_{к13} = \varphi(\varepsilon_1/\varepsilon_3)$, $T_{к12} = \varphi(\varepsilon_1/\varepsilon_2)$ і $T_{к23} = \varphi(\varepsilon_2/\varepsilon_3)$ - отримують замкнутий аналітичний вираз, що включає тільки одне невідоме - істинну температуру $T_{іст}$. Однак $T_{іст}$ не можна виразити з нього в явному вигляді, тому знайти невідоме в даному випадку можна лише скориставшись методом поступових наближень:

$$\frac{1}{T_{і+1}} = \frac{1}{T_{к13}} - 2 \frac{\Lambda_{13}}{C_2} \cdot \text{arth} \left\{ \frac{1}{2} \left(\exp \left[\frac{C_2}{\Lambda_{12}} \left(\frac{1}{T_{к12}} - \frac{1}{T_i} \right) \right] - \exp \left[\frac{C_2}{\Lambda_{23}} \left(\frac{1}{T_{к23}} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \right) \right\},$$

де T_i і $T_{і+1}$ - відповідно попереднє (i-те) і наступне (i+1-ше) наближення $T_{іст}$ для кожної ітерації, в якості першого наближення для $T_{іст}$ беруть значення:

$$T_{іст(1)} \equiv T_{і=1} = T_{к23} \cdot T_{к12} \cdot (\lambda_3 - \lambda_1) / (\lambda_3 T_{к23} - \lambda_1 T_{к12}).$$

Здійснивши декілька ітерацій "уточнення" першого наближення для $T_{іст}$ (за звичаєм, не більше 3-х) можна отримати результат з будь-якою наперед заданою точністю, тобто будь-якою кількістю однакових перших цифр в чисельному вираженні $T_{іст}$. Визначивши точне значення істинної температури селективно випромінюючої поверхні, можна знайти і абсолютні значення спектральної випромінюючої спроможності ε із виразу для яскравісної температури $T_{я}$ за допомогою $T_{іст}$ і $T_{я}(\lambda_j)$ для трьох довжин хвиль λ_1 , λ_2 і λ_3 :

$$\varepsilon(\lambda_j) = \exp \left[\frac{C_2}{\lambda_j} \left(\frac{1}{T_{іст}} - \frac{1}{T_{яj}} \right) \right].$$

Однак, щоб отримати всі ті результати, що викладені вище, необхідно таким чином вибрати величину

проміжної довжини хвилі λ_2 , щоб задовольнити рівність: $\varepsilon(\lambda_2) = \varepsilon_{ap} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2$. Цю умову можна задовольнити математично точно скориставшись поняттям "зворотної" функції $\lambda = f^{-1}(\varepsilon)$ для дисперсії спектральної випромінюючої спроможності в діапазоні $\lambda \in (\lambda_1, \lambda_3)$. При цьому для $\lambda_2 = f^{-1}(\varepsilon_2) = F(\varepsilon_2)$, де $\varepsilon_2 = \varepsilon_{ap}$, отримуємо:

$$\lambda_2 = f^{-1}(\varepsilon_{ap}) = f^{-1}\left(\frac{1}{2}[\varepsilon(\lambda_1) + \varepsilon(\lambda_3)]\right) \equiv F\left(\frac{1}{2}[f(\lambda_1) + f(\lambda_3)]\right).$$

У підсумку, значення проміжної довжини хвилі залежить тільки від базових довжин хвиль λ_1 і λ_3 , а також характеру функціональної залежності $\varepsilon = f(\lambda)$ і не залежить від абсолютних значень спектральної випромінюючої спроможності ε_1 , ε_2 і ε_3 . Якщо базові значення крайніх довжин хвиль діапазону $(\lambda_{1,3})$ вибирають виходячи з мінімуму інструментальної похибки (наприклад, для кольорового пірометра із "зникаючою ниткою" $\lambda_1 = 0,43 \text{ мкм}$, $\lambda_3 = 0,65 \text{ мкм}$ - це історично перше "синє-червоне" відношення, хвилі λ_1 та λ_3 є краями "вікна чутливості" людського ока), то λ_2 повністю визначається характером дисперсії спектральної випромінюючої спроможності $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$ селективної поверхні.

Таким чином, в способі посереднього визначення чотирьох невідомих T_{ict} і ε_1 , ε_2 і ε_3 з відомим характером дисперсії $\varepsilon = f(\lambda)$ необхідно і достатньо провести три виміри яскравісних температур, бо одна з невідомих ε_2 повністю визначається двома іншими: $\varepsilon_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2$. Можливість аналітичного вирішення системи трьох рівнянь (трьох виражень для кольорової температури - максимально можливої кількості комбінацій по дві довжини λ_i хвилі з трьох, при яких вимірюються яскравісні температури) дозволяє знайти для всіх шукомих величин T_{ict} і ε_1 , ε_2 , ε_3 замкнуті аналітичні вирази та достатньо точно визначити їх значення для будь-якого характеру дисперсії спектральної випромінюючої спроможності селективної поверхні і, таким чином, являє собою математичну основу запропонованого способу кольорової пірометрії, оскільки дозволяє вирішити задачу даного винаходу.

Заявлений спосіб трихроматичної кольорової пірометрії забезпечує спільне визначення істинної температури T_{ict} селективної поверхні і спектральної випромінюючої спроможності на трьох довжинах хвиль для будь-якого характеру дисперсії $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$ 3 точних замкнутих аналітичних виразів і без наявності інформації про абсолютні значення спектральної випромінюючої спроможності селективної поверхні.