



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **104511** (13) **C2**  
(51) МПК (2014.01)  
**G01J 5/00**

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: <b>а 2012 10887</b>	(72) Винахідник(и): <b>Луданов Костянтин Іванович (UA)</b>
(22) Дата подання заявки: <b>18.09.2012</b>	(73) Власник(и): <b>Луданов Костянтин Іванович,</b> вул. Боженка, 14, м. Боярка, Київська обл., 08151 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>10.02.2014</b>	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 63080 A; 15.01.2004; UA 85425 C2; 26.01.2009; UA 56614 A; 15.05.2003; RU 60716 U1; 27.01.2007; US 2008/0062404 A1; 13.03.2008; US 3832068; 27.08.1974;
(41) Публікація відомостей про заяву: <b>11.11.2013, Бюл.№ 21</b>	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.02.2014, Бюл.№ 3</b>	

## (54) ПІРОМЕТРИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВИПРОМІНЮЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВЕРХНІ

### (57) Реферат:

Винахід належить до галузі пірометрії і може бути використаний при спільному безконтактному визначенні дійсної температури селективної поверхні та її випромінюючої здатності. Спосіб безконтактного визначення абсолютної температури селективної поверхні є способом "часткової" пірометрії і містить вимір інтенсивності теплового випромінювання поверхні  $\Delta E$  в робочому діапазоні спектра пірометра. Додатково визначають "колірну" температуру  $T_C$  шляхом вимірів двох "яскравісних" температур ( $T_{S1}$  та  $T_{S2}$ ) на межах діапазону  $\lambda_1 \div \lambda_2$  "часткової" радіаційної пірометрії (для хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ ), дійсну температуру поверхні визначають шляхом послідовних наближень з ітераційної формули, використовуючи як перше наближення "колірну" температуру  $T_C$ , а спектральні випромінюючі здатності селективної поверхні  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  та її середню випромінюючу здатність  $\bar{\varepsilon}_{12}$  на ділянці спектра також визначають з формул по значенню дійсної температури. Технічним результатом винаходу є визначення абсолютної температури поверхні аналітичним методом з ітераційної формули шляхом послідовних наближень.

UA 104511 C2



Винахід належить до галузі пірометрії і може бути використаний при спільному безконтактному визначенні дійсної температури селективної поверхні та її випромінюючої здатності.

Відомий спосіб колірної пірометрії, в якому шляхом вимірювання двох так названих "яскравіших" температур  $T_{S1}(\lambda_1)$  та  $T_{S2}(\lambda_2)$  попередньо визначають "колірну" температуру  $T_C$  з формули:

$$1/T_C = [1/(\lambda_2 T_{S2}) - 1/(\lambda_1 T_{S1})] / (1/\lambda_2 - 1/\lambda_1),$$

а дійсну температуру поверхні  $T_o$  розраховують на основі так названої "колірної" температури та логарифму відношення випромінюючих здатностей  $\ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2)$  поверхні для робочих довжин хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  колірної пірометра з формули:

$$1/T_o = 1/T_C + \ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2) / [C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)].$$

(див. Свет Д.Я. Оптические методы измерений истинных температур. Наука. М. 1982).

Оскільки в більшості випадків відношення  $(\varepsilon_1/\varepsilon_2)$  апіорі невідоме, то для оцінки дійсної температури поверхні використовують наближення  $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ , в цьому випадку  $\ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2) \approx 0$ , а тому зазвичай приймають  $T_o \approx T_C$ .

Недоліком способу-прототипу є те, що загалом випромінюючі здатності поверхні  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  для робочих довжин хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  колірної пірометра можуть значно відрізнятися, в цьому випадку логарифм їх відношення  $\ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2) \neq 0$ , а припущення  $T_o \approx T_C$  призводить до значної похибки і тому цей спосіб не можна пропонувати для точного вимірювання дійсної температури поверхні  $T_o$  та її випромінюючої здатності  $\varepsilon$ .

Найбільш близьким по технічній суті та досягаємому результату є спосіб "часткової" радіаційної пірометрії, в якому визначають так названу "радіаційну" температуру  $T_R$  шляхом вимірювання щільності власного випромінювання поверхні  $\Delta E$  (причому не в повному спектрі, а в діапазоні довжин хвиль  $\Delta\lambda_{12} = \lambda_2 - \lambda_1$ ), а "радіаційну" температуру  $T_R$  мають визначати з формули:

$$\Delta E = 15\sigma \cdot (T_R/\pi) \{ [C_2/\lambda_2 T_R]^3 + 3(C_2\lambda_2/T_R)^2 + 6(C_2/\lambda_2 T_R) + 6 \} \exp(-C_2/\lambda_2 T_R) - \\ - \{ [C_2/\lambda_1 T_R]^3 + 3(C_2\lambda_1/T_R)^2 + 6(C_2/\lambda_1 T_R) + 6 \} \exp(-C_2/\lambda_1 T_R) \}.$$

(див. Свет Д.Я... 1982)

Основним недоліком способу-прототипу є те, що для визначення дійсної температури  $T_o$  необхідно апіорі мати значення середньоінтегрального коефіцієнта випромінювання  $\bar{\varepsilon}_{12}$  поверхні в робочому діапазоні хвиль  $\Delta\lambda_{12}$  пірометра, бо її дійсна температура  $T_o$  може дуже сильно відрізнятися від "радіаційної" температури, яку дає пірометр:  $T_o = T_R / (\bar{\varepsilon}_{12})^{0.25}$ .

Крім того, з цього рівняння неможливо отримати вираз  $T_R$  у явному вигляді, а тому приведена формула для отримання "радіаційної" температури практично не використовується, а шкала пірометра в даному разі встановлюється шляхом тарування його шкали з використанням моделей "абсолютно чорного тіла".

В основу винаходу поставлена задача уточнення та розширення функціональних можливостей способу "часткової" радіаційної пірометрії, в якому шляхом проведення додаткового вимірювання колірної температури поверхні  $T_C$  визначають значення середньоінтегральної випромінюючої здатності  $\bar{\varepsilon}_{12}$  (а точніше її середньгеометричного

наближення  $\bar{\varepsilon}_{12} = \sqrt{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}$  через спектральні випромінюючі здатності  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  з виразів "яскравіших" температур  $T_{S1}$  та  $T_{S2}$ , котрі отримані в рамках додаткового визначення "колірної"

температури  $T_C$ :  $\ln(\varepsilon_i) = C_2(T_o^{-1} - T_{Si}^{-1})/\lambda_i$  і яка має вигляд:

$$\bar{\varepsilon}_{12} = \sqrt{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2} = \sqrt{\exp[C_2(T_o^{-1} - T_{S1}^{-1})/\lambda_1] \cdot \exp[C_2(T_o^{-1} - T_{S2}^{-1})/\lambda_2]},$$

що дає можливість визначати абсолютну температуру поверхні не таруванням шкали пірометра, а аналітичним методом, тобто з ітераційної формули шляхом послідовних наближень, використовуючи попередньо отримане значення "колірної" температури  $T_C$  як перше наближення ( $T_{i=1} = T_C$ ), а також саме з формули визначати і середню випромінюючу здатність селективної поверхні  $\bar{\varepsilon}_{12}$ .

Поставлена задача вирішується тим, що в способі "часткової" радіаційної пірометрії, яка містить вимір інтенсивності випромінювання  $\Delta E$  селективної поверхні в діапазоні спектра  $\lambda_1 \div \lambda_2$ , у відповідності з винаходом додатково визначають "колірну" температуру  $T_C$  шляхом вимірів двох "яскравісних" температур ( $T_{S1}$  та  $T_{S2}$ ) на межах діапазону спектра "часткової" радіаційної пірометрії, тобто для хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ , абсолютну температуру поверхні визначають шляхом послідовних наближень з ітераційної формули:

$$T_{i+1} = \sqrt[4]{\Delta E / [\sigma \cdot (\bar{\epsilon}_{12} \cdot \Delta F_{21})_i]}$$

де  $T_i$  та  $T_{i+1}$  - відповідно, попереднє (i-те) та наступне (i+1) наближення  $T_0$  для кожної ітерації, а як перше наближення до точного значення для  $T_0$  в цій формулі приймають значення "колірної" температури  $T_C$  ( $T_{i=1} = T_C$ );

$$\bar{\epsilon}_{12} = \sqrt{\left\{ \exp[C_2(T_i^{-1} - T_{S1}^{-1})/\lambda_1] \cdot \exp[C_2(T_i^{-1} - T_{S2}^{-1})/\lambda_2] \right\}}; C_2 = 14,388 \text{ мм} \cdot \text{К};$$

$F$  - функція випромінювання абсолютно чорного тіла,  $\Delta F_{21} = F(\lambda_2) - F(\lambda_1) = 0,75 \cdot \{\exp[(1 - \lambda_1 T_i)/b] - \exp[(1 - \lambda_2 T_i)/b]\}$ ,  $b$  - постійна Віна,  $b = 2,8978 \text{ мм} \cdot \text{К}$  (ця формула отримана автором, див. патент України № 63 080А та статтю "Комбинированный способ радиационной пирометрии в материаловедении" // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. Труды ИГМ ПАНУ, серия "Моделирование в материаловедении". Киев-2006, Выпуск 8, с. 104-112),  $\sigma$  - постійна Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,6704 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Крім того, по визначеному вище значенню абсолютної температури поверхні  $T_0$  визначають спектральні випромінюючі здатності поверхні  $\epsilon_1$  та  $\epsilon_2$  з формули  $\epsilon_i = \exp[C_2(T_0^{-1} - T_{Si}^{-1})/\lambda_i]$ , а по них - середню випромінюючу здатність в діапазоні спектра з формули  $\bar{\epsilon}_{12} = \sqrt{(\epsilon_1 \cdot \epsilon_2)}$ .

Такий спосіб комбінованої пірометрії забезпечує спільне визначення по формулах абсолютної температури селективної поверхні  $T_0$  та її випромінюючих здатностей  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  на межах діапазону ( $\lambda_1 \div \lambda_2$ ) та  $\bar{\epsilon}_{12}$  в робочому діапазоні спектра  $\lambda_1 \div \lambda_2$  "часткової" пірометрії із заданою точністю.

Пропозиція пояснюється наступним: в результаті реалізації винаходу, тобто проведенням трьох пірометричних вимірів квазітемператур (одної - часткової радіації і двох - яскравісних) отримують три рівняння, кожне з двома невідомими 1)  $T_R = f_1(\bar{\epsilon}_{12}, T_0)$ , 2)  $T_{S1} = f_2(\epsilon_1, T_0)$  та 3)  $T_{S2} = f_3(\epsilon_2, T_0)$ , таким чином отримують систему трьох рівнянь з чотирма невідомими:  $T_0, \epsilon_1, \epsilon_2$  та  $\bar{\epsilon}_{12}$ , яка не має рішення. Однак цю систему можна вирішити в разі зменшення числа невідомих до трьох (тобто на одне менше, наприклад, на  $\bar{\epsilon}_{12}$ ) шляхом використання рівняння зв'язку  $\epsilon_{12} = \varphi(\epsilon_1, \epsilon_2)$ . Таке рівняння може бути фізично обґрунтовано твердженням, що середня випромінююча здатність  $\bar{\epsilon}_{12}$  селективної поверхні в діапазоні спектра  $\lambda_1 \div \lambda_2$  дорівнює в першому наближенні середньоарифметичному від спектральних випромінюючих здатностей на її межах:  $\bar{\epsilon}_{12} = (\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$ , таким чином вона виключається з числа невідомих. У цьому випадку отримуємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими ( $T_0, \epsilon_1, \epsilon_2$ ), яка, як відомо, має рішення.

Оскільки у вираженнях "яскравісних" температур  $T_{Si}$  відповідні спектральні випромінюючі здатності представлені під знаком натурального логарифму:  $\ln(\epsilon_i)$ , то середньоарифметичну трактовку залежності  $\bar{\epsilon}_{12} = \varphi(\epsilon_1, \epsilon_2)$ , краще представити в логарифмічній формі:  $\ln(\bar{\epsilon}_{12}) = (\ln \epsilon_1 + \ln \epsilon_2)/2$ , звідки  $\bar{\epsilon}_{12} = \sqrt{(\epsilon_1 \cdot \epsilon_2)}$ , тобто  $\bar{\epsilon}_{12}$  в даному разі є середнім пропорційним (або середнім геометричним) від  $\epsilon_1$  та  $\epsilon_2$ :

$\bar{\epsilon}_{12} = \sqrt{(\epsilon_1 \cdot \epsilon_2)}$ . Насамкінець, прирівнюючи  $\bar{\epsilon}_{12}$  з виразу температури "часткової" радіації до кореня з добутку  $\epsilon_1$  та  $\epsilon_2$  з відповідних виразів "яскравісних" температур, отримуємо замкнутий аналітичний вираз у вигляді неявної залежності невідомої абсолютної температури поверхні  $T_0$  тільки від відомих величин ( $\Delta E, T_{S1}, T_{S2}, \lambda_1$  та  $\lambda_2$ ). Невідому  $T_0$  не можна виразити з отриманого співвідношення в явному вигляді, тому її можна вирахувати використовуючи це співвідношення у вигляді ітераційної формули скориставшись методом поступових наближень:

$$T_{i+1} = \sqrt[4]{\Delta E / [\sigma \cdot (\bar{\epsilon}_{12} \cdot \Delta F_{21})_i]}$$

де  $T_i$  та  $T_{i+1}$  - відповідно, попереднє ( $i$ -те) та наступне ( $i+1$ ) наближення до точного значення  $T_0$  для кожної ітерації, а як перше наближення для  $T_0$  в цій формулі приймають значення "колірної" температури  $T_C$  ( $T_{i=1} = T_C$ );

$$\bar{\varepsilon}_{12} = \sqrt{\left\{ \exp\left[C_2(T_i^{-1} - T_{S1}^{-1})/\lambda_1\right] \cdot \exp\left[C_2(T_i^{-1} - T_{S2}^{-1})/\lambda_2\right] \right\} C_2 = 14,388 \text{ мм} \cdot \text{К};$$

5  $F$  - функція випромінювання абсолютно чорного тіла,  
 $\Delta F_{21} = F(\lambda_2) - F(\lambda_1) = 0,75 \cdot \{\exp[1 - (\lambda_1 T_i)/b] - \exp[1 - (\lambda_2 T_i)/b]\}$ ,  $b$  - постійна Віна,  $b = 2,8978 \text{ мм} \cdot \text{К}$ ,  
 $\sigma$  - постійна Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,6704 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Здійснивши декілька ітерацій щодо розрахунку по ітераційній формулі по уточненню першого наближення (зазвичай не більше 3-х) можна отримати результат з будь-якою наперед заданою точністю, тобто будь-якою кількістю однакових перших цифр в чисельному вираженню  $T_0$ .

Отримавши точне значення абсолютної температури поверхні  $T_0$ , досить просто знайти спектральні випромінюючі здібності селективної поверхні  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  для меж спектрального діапазону по формулах:  $\varepsilon_i = \exp[C_2(T_0^{-1} - T_{Si}^{-1})/\lambda_i]$ , та середню випромінюючу здатність поверхні на ділянці спектра  $\bar{\varepsilon}_{12} = \sqrt{(\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2)}$ .

Таким чином, у способі спільного визначення чотирьох невідомих:  $T_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2$  та  $\bar{\varepsilon}_{12}$  необхідно і достатньо провести лише три виміри: радіаційна температура "часткової" радіації  $T_R$  та двох "яскравісних" температур  $T_{S1}$  і  $T_{S2}$  (в рамках визначення "колірної" температури  $T_C$ ), бо одна з невідомих  $\bar{\varepsilon}_{12}$  повністю визначається двома іншими:  $\bar{\varepsilon}_{12} = \sqrt{(\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2)}$ . Математично можливість аналітичного вирішення системи трьох рівнянь з трьома невідомими дозволяє знайти для всіх шуканих величин  $T_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2$  та  $\bar{\varepsilon}_{12}$  замкнуті аналітичні вирази та достатньо точно визначити їх значення для монотонного характеру дисперсії спектральної випромінюючої здатності селективної поверхні в робочому діапазоні спектра  $\Delta\lambda_{12} = \lambda_2 - \lambda_1$  і, таким чином, являє собою математичну основу запропонованого способу комбінованої пірометрії, оскільки дозволяє вирішити задачу винаходу.

Заявлений спосіб комбінованої пірометрії забезпечує спільне визначення абсолютної температури  $T_0$  селективної поверхні і її випромінюючої здатності (спектральної - на межах робочого діапазону і інтегральної - всередині діапазону) з точних аналітичних виразів, що виключає необхідність тарування шкали пірометра на моделях "абсолютно чорного тіла".

## ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб безконтактного визначення абсолютної температури селективної поверхні способом часткової пірометрії, що включає вимір інтенсивності теплового випромінювання поверхні  $\Delta E$  в робочому діапазоні спектра пірометра або так званої радіаційної температури  $T_R = \sqrt[4]{[\Delta E / (\sigma \cdot \Delta F_{21})]}$ , який **відрізняється** тим, що додатково визначають колірну температуру  $T_C$  шляхом вимірів двох яскравісних температур ( $T_{S1}$  та  $T_{S2}$ ) на межах діапазону  $\lambda_1 \div \lambda_2$  часткової радіаційної пірометрії для хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ , а абсолютну температуру селективної поверхні визначають шляхом послідовних наближень з ітераційної формули:

$$T_{i+1} = \sqrt[4]{\Delta E / [\sigma \cdot (\bar{\varepsilon}_{12} \cdot \Delta F_{21})_i]},$$

де  $T_i$  та  $T_{i+1}$  - відповідно, попереднє ( $i$ -те) та наступне ( $i+1$ ) наближення до точного значення  $T_0$  для кожної ітерації, а як перше наближення для  $T_0$  в цій формулі приймають значення колірної температури  $T_C$  ( $T_{i=1} = T_C$ );

$$\bar{\varepsilon}_{12} = \sqrt{(\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2)} = \sqrt{\left\{ \exp\left[C_2(T_i^{-1} - T_{S1}^{-1})/\lambda_1\right] \cdot \exp\left[C_2(T_i^{-1} - T_{S2}^{-1})/\lambda_2\right] \right\} C_2 = 14,388 \text{ мм} \cdot \text{К};$$

45  $\Delta F_{21} = F(\lambda_2) - F(\lambda_1) = 0,75 \cdot \{\exp[1 - (\lambda_1 T_i)/b] - \exp[1 - (\lambda_2 T_i)/b]\}$ ,  $b$  - постійна Віна,  $b = 2,8978 \text{ мм} \cdot \text{К}$ ,  
 $F$  - функція випромінювання абсолютно чорного тіла;  $\sigma$  - постійна закону Стефана-Больцмана,  
 $\sigma = 5,6704 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ,

а спектральні випромінюючі здатності селективної поверхні  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  та її середню випромінюючу здатність  $\bar{\varepsilon}_{12}$  на ділянці спектра  $(\lambda_1 \div \lambda_2)$  визначають з формул:

$$\varepsilon_1 = \exp\left[C_2(T_0^{-1} - T_{S1}^{-1})/\lambda_1\right], \varepsilon_2 = \exp\left[C_2(T_0^{-1} - T_{S2}^{-1})/\lambda_2\right], \bar{\varepsilon}_{12} = \sqrt{(\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2)}.$$

---

Комп'ютерна верстка В. Мацело

---

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