

Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2003. – № 492. – С.100–107. 5. Голембо В. А., Бочкар'юв О. Ю., Гребеняк А. В. Проблема організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". – 2009. – № 650. – С. 168–173. 6. Paley D., Zhang F., Leonard N., *Cooperative Control for Ocean Sampling: The Glider Coordinated Control System*, *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, April 30, 2006. 7. Jonathan Dixon, Oliver Henlich. *Mobile Robot Navigation (Final Report)* // Imperial College, London, information systems engineering year 2: Surprise 1997: http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_97/journal/vol4/jmd/ 8. Pub. No.: US 2006/161405 A1. *Methods for locating targets and simulating mine detection via a cognitive, swarm intelligence-based approach.* / Munirajan V.K. Pub. Date: 2006-07-20. 9. Pub. No.: US 2009/099768 A1. *Methods and Apparatus for Swarm Navigation of Multiple Agents.* / Bauer P.K., Scheutz M.. Pub. Date: 2009-04-16. 10. Pub. No.: WO0208843 A2. *Method and apparatus for controlling the movement of a plurality of agents.* / Howard M., Payton D., Hoff B., Lee C., Daily M.. Pub. Date: 2009-04-16

УДК 536.521.2

Н. Гоц

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ МЕТОДАМИ ДВОКАНАЛЬНОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ ВИПРОМІНЕННЯ

© Гоц Н., 2010

Розглянуто особливості застосування двоканальних методів вимірювання температури об'єктів за випромінення. На основі математичного моделювання проаналізовано інструментальну та методичну складові похибки вимірювання температури різними методами.

Ключові слова: температура за випроміненням, похибка вимірювання.

In the article the features of application of twochannel methods of measuring of temperature of objects are considered for a radiation. On the basis of mathematical design the analysis of errors of measuring of temperature is conducted by different methods.

Keywords: radiation temperature, measurement error.

Вступ. Для дослідження фізичних властивостей речовин, контролю природних явищ та технологічних процесів широко застосовуються такі безконтактні засоби вимірювання температури, як двоканальні термометри випромінення [1–3].

Вони функціонують на основі методів двоканальної термометрії випромінення (ДКТВ), а саме на основі вимірювання спектральної енергетичної яскравості на двох спектральних ділянках випромінення, утворення їх різних комбінацій та прирівнювання до аналогічних комбінацій яскравостей абсолютно чорного тіла (АЧТ) за однаковою температурою. В результаті розвитку теоретичної бази пірометрії існує велика кількість локальних методів ДКТВ, які розрізняються за способом опрацювання інформації, що несе потік випромінення від поверхні досліджуваного об'єкта. Ці методи використовують переважно з метою зменшення різних видів похибок, розглянутих в [4], та поділяються на дві основні групи:

- методи двоканальної монохроматичної пірометрії;
- методи двоканальної широкоспектральної пірометрії.

Постановка задачі. Для аналізу застосування існуючих локальних методів двоканальної пірометрії, встановлення умов їх використання та визначення напрямку їх практичної реалізації на базі термометрів випромінювання доцільно провести огляд існуючих методів та порівняння їх за точністю вимірювання температури за випромінюванням.

Огляд літературних джерел. Методи монохроматичної двоканальної пірометрії ґрунтуються на вимірюванні спектральної енергетичної яскравості об'єкта дослідження (ОД) на двох робочих довжинах хвиль випромінювання, утворенні їх різних комбінацій та прирівнюванні до аналогічних комбінацій яскравостей АЧТ при тій самій температурі. Вони використовуються з метою зменшення похибки від відсутності або неточності інформації про значення коефіцієнта випромінювання досліджуваної поверхні. Найвідоміші методи монохроматичної двоканальної пірометрії та формули визначення відповідної умовної та термодинамічної температури локального методу наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Методи монохроматичної двоканальної термометрії випромінювання

Назва методу монохроматичної ДКТВ	Формула визначення умовної температури монохроматичної ДКТВ	Формула термодинамічної температури
Метод спектрального відношення, [6].	$T_{\kappa}^{-1} = -\frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{I_2}{I_1}$	$T^{-1} = T_{\kappa}^{-1} - \frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{e_2}{e_1}$
Взаємкореляційний метод, [4]	$T_{\text{вк}}^{-1} = -\frac{L_{\text{вк}}}{C_2} \cdot \ln(I_1 \cdot I_2)$	$T^{-1} = T_{\text{вк}}^{-1} + \frac{L}{C_2} \cdot \ln(e_1 \cdot e_2)$
“Оптимальний” метод визначення температури за власним випромінюванням шляхом нелінійного перетворення з інваріантним сигналом [4].	$\begin{aligned} {}^{\text{онм}}T_{\text{я1}}^{-1} &= T_{\text{я1}}^{-1} + \frac{I_1}{C_2 \cdot (I_2 - I_1)} \cdot J_{2,1} \\ {}^{\text{онм}}T_{\text{вк1}}^{-1} &= T_{\text{вк1}}^{-1} + \frac{2I_1I_2}{C_2 \cdot (I_2^2 - I_1^2)} \cdot J_{2,1} \end{aligned}$	$\begin{aligned} T^{-1} &= {}^{\text{онм}}T_{\text{я1}}^{-1} - \frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{e_2}{e_1} \\ T^{-1} &= {}^{\text{онм}}T_{\text{вк1}}^{-1} - \frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{e_2}{e_1} \end{aligned}$
Метод визначення комбінованої середньо-яскравісної температури $T_{\text{ся}}^{-1} = 0,5(T_{\text{я1}}^{-1} + T_{\text{я2}}^{-1})$, [7]	$T_{\text{ся}}^{-1} = -\frac{I}{2C_2} \cdot (I_1 \ln I_1 + I_2 \ln I_2)$	$T^{-1} = T_{\text{ся}}^{-1} + \frac{I}{2C_2} \cdot (I_1 \ln e_1 + I_2 \ln e_2)$
Метод визначення комбінованої температури $T_{\kappa}^{-1} = 0,5(T_{\text{ц}}^{-1} + T_{\text{вк}}^{-1})$, [7].	$T_{\text{ком}}^{-1} = \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1I_2}{I_2^2 - I_1^2} \cdot (I_1 \ln I_2 + I_2 \ln I_1)$	$T^{-1} = T_{\text{ком}}^{-1} - \frac{I_1I_2}{C_2 \cdot (I_2^2 - I_1^2)} \cdot (I_1 \ln e_2 - I_2 \ln e_1)$
Метод визначення комбінованої кольорово-яскравісної температури $T_{\text{кя}}^{-1} = 0,5(T_{\kappa}^{-1} + T_{\text{вк}}^{-1})$, [7].	$\begin{aligned} T_{\text{кя}}^{-1} &= \frac{I}{4C_2(I_2 - I_1^2)} \times \\ &\times [I_2(3I_1 - I_2) \ln I_2 + I_1(3I_2 - I_1) \ln I_1] \end{aligned}$	$\begin{aligned} T^{-1} &= T_{\text{кя}}^{-1} - \\ &- \frac{I_2(3I_1 - I_2) \ln e_2 - I_1(3I_2 - I_1) \ln e_1}{4C_2 \cdot (I_2 - I_1)} \end{aligned}$
Експоненційно-степеневий метод, [8].	$\begin{aligned} T_{\text{ес}}^{-1} &= \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1I_2}{I_2^{a+1} - I_1^{a+1}} \cdot \\ &\cdot (I_1^a \ln I_2 - I_2^a \ln I_1) \end{aligned}$	$\begin{aligned} T^{-1} &= T_{\text{ес}}^{-1} - \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1I_2}{I_2^{a+1} - I_1^{a+1}} \cdot \\ &\cdot (I_1^a \ln e_2 - I_2^a \ln e_1) \end{aligned}$
Степеневий метод [8].	$\begin{aligned} T_{\text{см}}^{-1} &= \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1I_2}{I_2 - I_1} \cdot \\ &\cdot \left(\ln I_2 - \ln I_1 + a \ln \frac{I_2}{I_1} \right) \end{aligned}$	$\begin{aligned} T^{-1} &= T_{\text{см}}^{-1} - \frac{I}{C_2} \cdot \frac{I_1I_2}{I_2 - I_1} \cdot \\ &\cdot \left(\ln e_2 - \ln e_1 + a \ln \frac{I_2}{I_1} \right) \end{aligned}$
Універсальний метод визначення температури за двома умовними температурами з введенням вагових коефіцієнтів [9].	$T_y^{-1} = \frac{I}{C_2} \cdot \frac{q_1 \ln I_1 - q_2 \ln I_2}{q_2/I_2 - q_1/I_1}$	$T^{-1} = T_y^{-1} - \frac{I}{C_2} \cdot \frac{q_1 \ln e_1 - q_2 \ln e_2}{q_2/I_2 - q_1/I_1}$

У таблиці використано такі позначення: C_1 та C_2 – сталі [5]; λ_1 та λ_2 – робочі довжини хвилі відповідно для першого та другого каналу пірометра; T – термодинамічна температура; ε_1 та ε_2 – значення коефіцієнтів випромінювання при відповідних значення довжин хвиль, α – показник степені; L – еквівалентна довжина хвилі методу ДКТВ; I_1 та I_2 – виміряна інтенсивність випромінювання відповідним спектральним каналом пірометра; інваріант J – вираз, утворений шляхом нелінійного перетворення спектральних інтенсивностей випромінювання; q_1 та q_2 – вагові коефіцієнти.

У результаті аналізу формул визначення термодинамічної температури різними методами монохроматичної ДКТВ можна сформулювати узагальнений вираз визначення умовної та термодинамічної температури:

$$T = \frac{T_{ум} \cdot C_2}{C_2 - k_i T_{ум} \cdot L_{ум} \sum_{i=1}^n (b_i \ln(e_i))}, \text{ де } T_{ум} = \frac{C_2}{L_{ум} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \ln(I_i))}, \quad (1)$$

де a_i та b_i – коефіцієнти, які залежать від обраного методу; i – кількість робочих спектральних каналів ДКТВ, $i=2$; $L_{ум}$ – еквівалентна довжина хвилі відповідного методу монохроматичної ДКТВ; $k_i = \pm 1$ залежно від використаного методу.

Методи широкополосної двоканальної пірометрії ґрунтуються на вимірюванні спектральної енергетичної яскравості об'єкта дослідження (ОД) у двох робочих спектральних інтервалах випромінювання, утворенні їх різних комбінацій та прирівнюванні до аналогічних комбінацій яскравостей АЧТ при тій самій температурі (табл. 2). На практиці вимірювання спектральної яскравості завжди здійснюється не на фіксованій довжині хвилі, а згідно з (2) у деякому спектральному інтервалі, який задається оптичним каналом та параметрами приймача випромінювання пірометра:

$$U(I, T) = k \cdot \int_{I_1}^{I_2} y(I, T) \cdot L(I, T) dI; \quad (2)$$

Але використання (5) викликає такі труднощі: складність визначення апаратної функції $\Psi(\lambda)$, необхідність розрахунку калібраційної кривої та проведення чисельного інтегрування. Ці недоліки усуваються при використанні наближень, за якими реєстрація широкополосного випромінювання замінюється монохроматичною або інтегральною реєстрацією випромінювання.

Тому в двоканальній широкополосній пірометрії при переході від запису сигналу (2), що реєструє широкополосне випромінювання, до монохроматичної реєстрації використовують методи врахування немонохроматичності спектрального каналу шляхом введення поняття ефективної довжини хвилі (ЕДХ) та різних видів ЕДХ, таких як: гранична ЕДХ; референсна ЕДХ; середньозважена ЕДХ.

Таблиця 2

Методи широкополосної двоканальної термометрії випромінювання

Методи широкоспектральної ДКТВ	Формула розрахунку термодинамічної температури
Метод визначення ефективної кольорової температури [10].	$T_{ек}^{-1} = \frac{I_1 I_2}{C_2 \cdot (I_2 - I_1)} \cdot \ln \left[\left(\frac{I_2}{I_1} \right)^5 \frac{Y_1 U_2}{Y_2 U_1} \right]$
Метод визначення кольорової температури з використанням коригувальних множників [11]	$T_{к}^{-1} = \frac{I_1 I_2}{(I_2 - I_1)} \cdot \left(\frac{1}{I_1 T_1} - \frac{1}{I_2 T_2} \right) + \frac{1}{C_2} \ln \left[\frac{R_2^0(T_2) \cdot R_1^0(T_k(I))}{R_1^0(T_1) \cdot R_2^0(T_k(I))} \right]$

Для визначення оптимального методу термометрії випромінювання для певних умов вимірювання доцільно провести порівняння точності визначення температури методами двоканальної пірометрії.

Основна частина. Аналіз похибок вимірювання температури за випромінюванням. Порівняння існуючих методів вимірювання температури за випромінюванням проведено на основі зіставлення відповідних інструментальних та методичних складових похибок визначення температури різними методами.

Інструментальна складова похибки виникає внаслідок недосконалості засобів вимірювальної техніки, зумовлена впливом на вихідний сигнал параметрів оптичної системи, електричної схеми, приймача випромінювання. Загальний вираз, що описує інструментальну складову похибки має вигляд:

$$DT_{in} = K_{in} \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot \frac{DI_i}{I_i}, \quad (3)$$

де K_{in} – передавальний коефіцієнт складової інструментальної похибки вимірювання температури, вираз та значення якого залежать від відповідного методу пірометрії; $k_i = \pm 1$ залежно від використаного методу; i – кількість робочих спектральних каналів.

Методична похибка [12–14] – це складова похибки вимірювання, що зумовлена неадекватністю об’єкта вимірювання та його моделі, прийнятої при вимірюванні. Основними факторами, що спричиняють виникнення методичної похибки вимірювання температури за випромінюванням, є використані теоретичні спрощення (зокрема використання формули Віна та неврахування немонохроматичності спектральних каналів), відсутність достовірної інформації про випромінювальні властивості досліджуваного об’єкта, нехтування впливом фонового випромінювання та проміжного середовища. Вираз складової методичної похибки вимірювання температури за випромінюванням у пірометрії визначається як сума часткових похідних від виразу визначення термодинамічної температури цим методом за ϵ_i , λ_i . Загальний вираз складової методичної похибки має вигляд:

$$DT_{мет} = K_{мет} \cdot \left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot \frac{De_i}{e_i} + \sum_{i=1}^n p_i \cdot \frac{DI_i}{I_i} \right), \quad (4)$$

де $K_{мет}$ – передавальний коефіцієнт складової методичної похибки вимірювання температури, значення якого залежать від методу пірометрії; m та p – коефіцієнти впливу складових похибок.

Вирази складових інструментальної та методичної похибок найуживаніших методів пірометрії наведено у табл. 3, графічні залежності – на рис. 1–6.

Таблиця 3

Вирази інструментальної та методичної складових похибки вимірювання температури методами ДКТВ

Методи пірометрії	Вираз складової інструментальної складової похибки	Вираз складових методичної похибки
Взаємодіючий метод	$\frac{C_2}{L_{\text{вк}} \cdot \ln(I_1 I_2)^2} \cdot \left[\frac{DI_1}{I_1} + \frac{DI_2}{I_2} \right]$	$-\frac{T_{\text{вк}}^2 \cdot C_2 \cdot L_{\text{вк}}}{(T_{\text{вк}} \cdot L_{\text{вк}} \cdot \ln(e_1 e_2) + C_2)^2} \cdot \left[\ln(e_1 e_2) \cdot \frac{DL_{\text{вк}}}{L_{\text{вк}}} + \frac{De_1}{e_1} + \frac{De_2}{e_2} \right]$
Метод спектрального відношення	$\frac{C_2}{L_{\text{св}}} \cdot \frac{1}{\ln(I_2/I_1)^2} \cdot \left[\frac{DI_2}{I_2} - \frac{DI_1}{I_1} \right]$	$\frac{T_{\text{св}}^2 \cdot C_2 \cdot L_{\text{св}}}{(-T_{\text{св}} \cdot L_{\text{св}} \cdot \ln(e_2/e_1) + C_2)^2} \cdot \left[\ln(e_2/e_1) \cdot \frac{DL_{\text{св}}}{L_{\text{св}}} - \frac{De_1}{e_1} + \frac{De_2}{e_2} \right]$
Степеневий метод	$\frac{C_2(I_2 - I_1)}{I_2 I_1 \cdot (\ln(I_2/I_1) + a \ln(I_2/I_1))^2} \cdot \left[\frac{DI_1}{I_1} - \frac{DI_2}{I_2} \right]$	$\frac{1}{\left(\frac{1}{T_c} - \frac{I_2 I_1 \cdot (\ln(e_2/e_1) + a \ln(I_2/I_1))}{C_2(I_2 - I_1)} \right)^2} \cdot \left[\frac{I_2 I_1}{C_2(I_2 - I_1)} \left(\frac{De_1}{e_1} - \frac{De_2}{e_2} \right) - A \frac{DI_1}{I_1} - B \frac{DI_2}{I_2} \right]$

При використанні широкоспектральної пірометрії використовуються квазімонохроматичні методи, тобто вимірювання температури відбувається в широкому спектральному інтервалі, а розрахунок температури – з використанням монохроматичних співвідношень шляхом введення різних видів ефективної довжини хвилі. Тому аналіз похибок вимірювання температури проводиться на прикладі методів монохроматичної пірометрії.

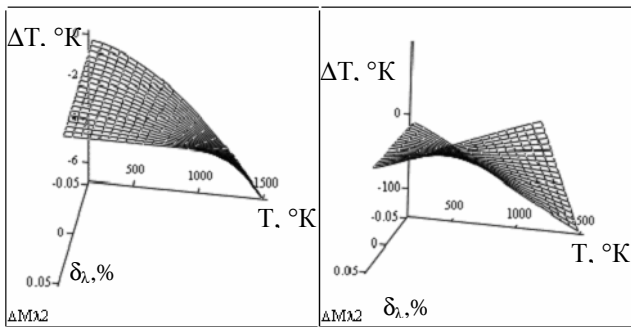


Рис. 1. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни I) за взаємкореляційним методом
 а)- $I_{p1}=2 \text{ мкм}$, $I_{p2}=4 \text{ мкм}$,
 б)- $I_{p1}=12 \text{ мкм}$, $I_{p2}=14 \text{ мкм}$

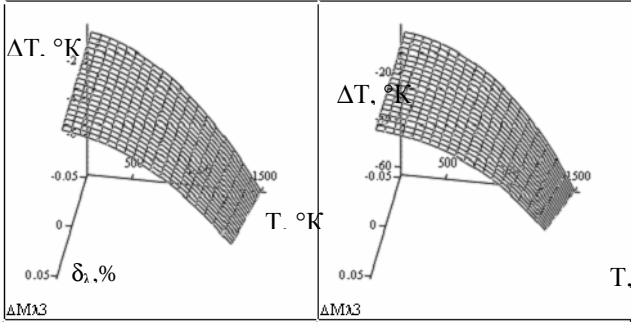


Рис. 2. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни I) за методом спектрального відношення
 а)- $I_{p1}=2 \text{ мкм}$, $I_{p2}=4 \text{ мкм}$,
 б)- $I_{p1}=12 \text{ мкм}$, $I_{p2}=14 \text{ мкм}$

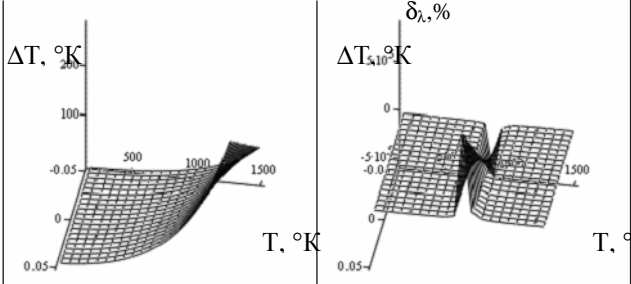


Рис. 3. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни I) степеневим методом
 а)- $I_{p1}=2 \text{ мкм}$, $I_{p2}=4 \text{ мкм}$,
 б)- $I_{p1}=12 \text{ мкм}$, $I_{p2}=14 \text{ мкм}$

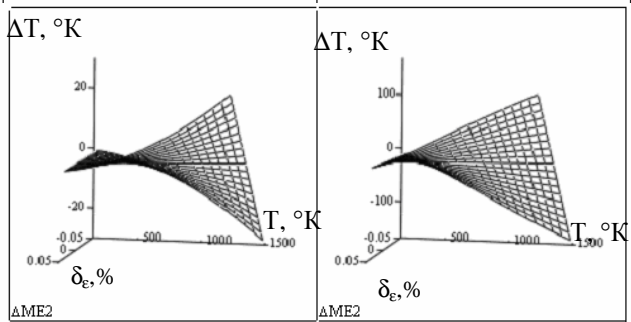


Рис. 4. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни ϵ) методом спектрального відношення
 а)- $I_{p1}=2 \text{ мкм}$, $I_{p2}=4 \text{ мкм}$,
 б)- $I_{p1}=12 \text{ мкм}$, $I_{p2}=14 \text{ мкм}$

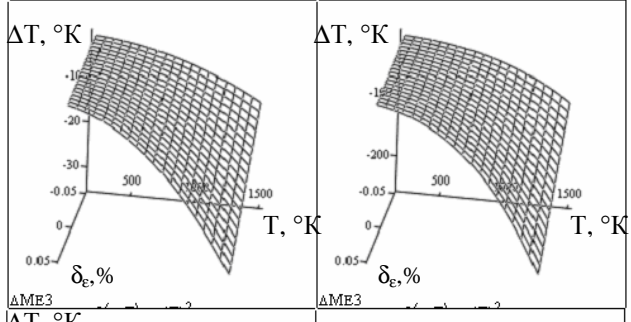


Рис. 5. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни ϵ) за взаємкореляційним методом
 а)- $I_{p1}=2 \text{ мкм}$, $I_{p2}=4 \text{ мкм}$,
 б)- $I_{p1}=12 \text{ мкм}$, $I_{p2}=14 \text{ мкм}$

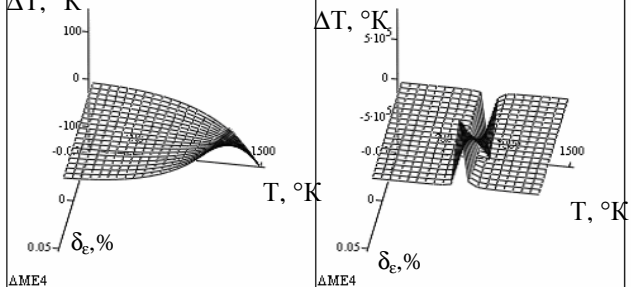


Рис. 6. Температурна залежність методичної складової похибки вимірювання температури (від зміни ϵ) за степеневим методом
 а)- $I_{p1}=2 \text{ мкм}$, $I_{p2}=4 \text{ мкм}$,
 б)- $I_{p1}=12 \text{ мкм}$, $I_{p2}=14 \text{ мкм}$

Проведено комп'ютерне моделювання залежності похибки вимірювання температури різними методами залежно від зміни інтенсивності випромінення, довжини хвилі та коефіцієнта випромінення в наступних діапазонах фізичних величин:

- температура – від 200 до 1500 °К;
- діапазон довжин хвиль – від 2 до 15 мкм;
- робочі довжини хвиль – 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 мкм;
- коефіцієнт випромінення від 0,5 до 1.
- відносна зміна впливних факторів – від 0 до 10 %;

Розглянемо похибки вимірювання умовної та термодинамічної температури різними методами пірометрії. Для двоканальної пірометрії інструментальна похибка наближається до нуля лише при вимірюванні температури взаємкореляційним методом, що відбувається внаслідок зменшення еквівалентної довжини хвилі, що використовується у цьому методі. На всьому спектральному діапазоні від 300 до 1500°К похибка не перевищує одиниць градусів та прямує до нуля з ростом температури та значень робочих довжин хвиль. Але негативно на точність вимірювання температури можуть впливати неконтрольовані зміни параметрів оптичної системи каналів та приймачів випромінення.

Інші методи двоканальної пірометрії доцільно застосовувати для окремих температурних діапазонів, оскільки існують ділянки температури, де інструментальна складова похибки різко зростає. Рекомендовані температурні діапазони для методу спектрального відношення: – від 200 до 600°К для короткохвильової області спектра та від 600 до 1500°К для довгохвильової області спектра, де складові інструментальної похибки не перевищують 20°К. Зменшення складової інструментальної похибки досягається зменшенням значення еквівалентної довжини хвилі даного методу та покращенням характеристик вимірювального тракту.

Складова інструментальної похибки вимірювання температури ступеневим методом є достатньо велика та зменшується лише на невеликих ділянках розглянутого температурного діапазону – від 1000 до 1500°К у короткохвильовій області спектра при мінімальних змінах значень довжин хвиль; від 1100 до 1500°К в довгохвильовій області спектра похибка не перевищує 50°К.

Аналогічною є ситуація з складовою методичної похибки від зміни λ в короткохвильовій області спектра – найменші значення похибки вимірювання температури є при використанні взаємкореляційного методу (рис.1).

Складова методичної похибки від зміни λ методу спектрального відношення не перевищує 10°К, але різко зростає з температурою при роботі в довгих довжинах хвиль (рис. 2). Тому в інфрачервоній області не доцільно вимірювати цим методом температури понад 500°К.

Неточності визначення або зміни еквівалентної довжини хвилі при використанні ступеневого методу значно впливають на значення складової методичної похибки вимірювання (рис. 3). Лише від 200 до 800°К для короткохвильової області спектра похибка не перевищує 30°К. Для довгохвильової області спектра мінімальне значення похибки становить близько 25%, що робить цей спектральний діапазон не придатним для вимірювання температури. Отже даний метод вимірювання температури є достатньо чутливим до точності визначення робочих довжин хвиль.

Позитивною характеристикою методу спектрального відношення є низьке значення методичної складової похибки від неточності визначення коефіцієнта випромінення, яке в короткохвильовій області спектра в діапазоні температур від 200 до 1000°К не перевищує 1%, що надає переваги використанню цього діапазону (рис. 4). У довгохвильовій області лише в діапазоні температур від 200 до 500°К ця похибка становить аж 20°К, що надзвичайно обмежує використання методу в інфрачервоних тепловізійних камерах. За умови наближення значень коефіцієнтів випромінення в обох спектральних областях ця складова методичної похибки може дорівнювати нулеві. Але за умови впливу потужного фонового випромінення та зміни спектрального коефіцієнта випромінення, складова методичної похибки може некеровано зростати, що також обмежує використання методу спектрального відношення в промисловості. Негативною особливістю

вимірювання температури двоканальною пірометриєю взаємокореляційним методом значна складова методичної похибки від неточності визначення ϵ внаслідок неточності визначення коефіцієнта випромінення. При роботі в короткохвильовій області спектра значення похибки не перевищує 5 %, але стрімко зростає з температурою та при переході в довгохвильову спектральну ділянку (рис. 5). Тому пріоритетною є температура до 1000°K. Складова методичної похибки вимірювання температури від зміни ϵ з використанням степеневого методу в довгохвильовій області спектра досягає значних значень, що накладає особливі вимоги на вибір показника степеня методу. Тільки в короткохвильовій області спектра похибка вимірювання температури від зміни ϵ в діапазоні температур від 200 до 1000°K не перевищує 20°K (рис. 6).

Висновки. Методи монохроматичної двоканальної пірометрії, на відміну від методів широкополосної двоканальної пірометрії, мають перевагу в тому, що дають змогу вимірювати температуру без наявності апріорної інформації про значення коефіцієнта випромінення ОД. При дослідженні похибок визначення температури різними методами двоканальної пірометрії встановлено появу ділянок, на яких багатократно зростають похибки вимірювання. То визначає доцільність використання тих або інших методів двоканальної пірометрії для певних значень температури, довжини хвилі та спектральних інтервалів.

На підставі проведеного аналізу математичних залежностей можна стверджувати, що методи двоканальної пірометрії розрізняються алгоритмами опрацювання сигналів потоку випромінення від об'єкта дослідження на двох спектральних ділянках. Тому доцільно розробляти засоби вимірювання температури за випроміненням з можливістю оптимального вибору методу пірометрії для вимірювання температури залежно від умов вимірювань та властивостей об'єкта дослідження. Це доцільно реалізувати на основі їх відповідного програмного забезпечення, яке б давало змогу залежно від умов вимірювання та властивостей об'єкта обирати оптимальний метод вимірювання температури за випроміненням, робочі довжини хвиль та метод опрацювання результату вимірювання.

1. <http://www.mikroninfrared.com/catalog>. 2. <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/ProductsAndAccessories>. 3. <http://www.fluke.co.uk>. 4. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982. – 295 с. 5. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – С. 79. 6. Рибо Г. Оптическая пирометрия. – М.;Л: Гостехтеориздат, 1934. – 455 с. 7. Снопко В.Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности. – Минск: Наука и техника, 1988. – 248 с. 8. Снопко В.Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения. Минск: Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 1999. – 224 с. 9. Поскачей А.А., Чарихов Л.А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. – М.: Металлургия, 1978. – 200 с. 10. Снопко В.Н. Эффективная длина волны цветового пирометра // Измерительная техника. – 1994. – №2. – С. 37–38. 11. Nabs J.W. Rhee C. Calculation of temperature error in a two-color pyrometer designet with the reference wavelength method // Appl. Opt. 1988. V. 27, 10. P. 1916–1918. 12. 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення. - Введ. 01.01.95. – К.: Держстандарт України, 1995. – 66 с. 13. Обозовський С.С. Інформаційно-вимірювальна техніка (Методологічні питання теорії вимірювань). – К.: ІСДО, 1993. – 424 с. 14. Основы метрології та вимірювальної техніки: підручник: У 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик; За ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2005. – Т. 1. Основы метрології. – 532 с.