

БЮДЖЕТ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ МЕТОДАМИ МОНОХРОМАТИЧНОЇ ОДНО- Й ДВОКОЛЬОРОВОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ З КОРЕКЦІЄЮ НА ВИПРОМІНЮВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ

Петренко Д. О., молодший науковий співробітник.

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ, Україна;

e-mail: dima-petrenko@meta.ua

Готра О. З., доктор технічних наук, професор.

Люблінський технологічний університет, Люблін, Польща;

e-mail: o.hotra@pollub.pl

Анотація

Роботу спрямовано на підвищення точності вимірювання термодинамічної температури нагрітих об'єктів за власним тепловим випроміненням, при застосуванні не більше двох монохроматичних каналів вимірювання спектральної густини енергетичної яскравості об'єкта.

Виконано класифікацію методів одно- та двокольорової пірометрії випромінення з корекцією на випромінювальну здатність об'єкта. Встановлено, в їх основі лежить узагальнююче рівняння опосередкованого вимірювання температури, що витікає з опису спектральної густини енергетичної яскравості об'єкта формулою Віна.

Всі досліджувані методи пірометрії випромінення зведено до одних й тих же величин-аргументів в рівняннях вимірювань. Цими величинами є умовні однокольорові (яскравісні) температури, довжини хвиль та параметри корекції, які враховують спектральну випромінювальну здатність об'єкта. Кількість величин-аргументів для однокольорових методів складає 4, а для більшості двокольорових – 6. Лише два двокольорових метода використовують 5 вхідних величин, завдяки 1 параметру корекції.

З урахуванням специфіки апаратної реалізації пірометричної системи (мікроспектрометр), систематизовано джерела невизначеностей величин-аргументів. Виходячи з набору величин-аргументів, які супроводжуються відповідними стандартними невизначеностями, сформовано бюджет невизначеності опосередкованого вимірювання температури методами монохроматичної одно- та двокольорової пірометрії випромінення. Отримано формули оцінювання стандартної та розширеної, з рівнем довіри 0,95, невизначеностей результату вимірювання температури, з урахуванням можливої кореляції між параметрами корекції. Для оцінювання розширеної невизначеності застосовано метод ексцесів. Показано, що при однакових невизначеностях величин-аргументів, невизначеності результатів вимірювань температури різними методами залежать лише від відповідних коефіцієнтів чутливості. Показано необхідність кількісного оцінювання коефіцієнтів чутливості. Це дозволить проаналізувати комплексний вплив невизначеностей величин-аргументів на точність вимірювання температури різними методами пірометрії випромінення з метою пошуку найбільш точного метода в конкретних умовах вимірювання або ж формулювання умов, за яких обраний метод має найвищу точність.

Ключові слова

Термодинамічна температура, монохроматична умовна одно- та двокольорова температура, спектральна випромінювальна здатність, параметри корекції, бюджет невизначеності, коефіцієнти чутливості.

1. Вступ

За відсутності надлишкових вимірювань спектральної густини енергетичної яскравості (СГЕЯ) [1] на множині монохроматичних спектральних каналів (довжин хвиль), з метою мінімізації інструментальної складової невизначеності вимірювання температури доцільно використовувати методи пірометрії випромінення (ПВ) з мінімальною кількістю довжин хвиль – одно й двокольорові. На сучасному етапі розвитку науки й техніки одно- та двокольорові сенсори теплового випромінення з монохроматичними (шириною до 10 нм) та квазімонохроматичними (10-25 нм) спектральними каналами є досить поширеними [2, 3]. Завдяки простоті конструкції й порівняно невисокій вартості, одно- й двокольорові пірометри зі згаданими сенсорами складають чималу частку ринку безконтактних засобів вимірювання температури для промисловості, зокрема, високотемпературних об'єктів в металургії [4]. Також одно- та двокольорові режими роботи підтримуються всіма багатокольоровими пірометрами (можна обирати комбінації з двох довжин хвиль на зареєстрованій ділянці спектра випромінення). Це важливо у випадках, коли існують обмеження за спектральним діапазоном реєстрації теплового електромагнітного випромінення об'єкта й необхідна строга селекція довжин хвиль [5]. Наприклад, за умов нестабільного пропускання проміжного середовища внаслідок наявності смуг селективного поглинання речовин-забруднювачів (водяна пара, газ, дим, які виділяються з поверхні металевих розплавів, тощо).

2. Недоліки

На сьогодні, незважаючи на численні дослідження в галузі вимірювання високих температур за випроміненням, відсутня систематизація методів монохроматичної одно- двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність. Вони належать до методів опосередкованих вимірювань, оскільки термодинамічна температура

визначається на основі рівнянь вимірювань. Останні містять деякі вхідні величини, зокрема, умовні температури, пропорційні виміряній СГЕЯ на одній чи двох довжинах хвиль. Невирішеним лишається питання зведення рівнянь вимірювань до одних й тих же величин-аргументів, систематизація джерел їх невизначеностей, а також метрологічний аналіз ланцюга трансформації невизначеностей величин-аргументів в невизначеність результату вимірювання температури тим чи іншим методом.

Наведеного в роботах [6,7,8] аналізу інструментальних та методичних похибок деяких методів монохроматичної одно- та двокольорової ПВ не достатньо для вичерпної характеристики їх точності. Для цього, за однакових умов, необхідно оцінити середньоквадратичні чи довірчі/граничні похибки вимірювання температури або ж відповідні стандартні/розширені невизначеності. Так, в роботі [6] отримано залежності для інструментальної середньоквадратичної похибки від таких же похибок вимірювань безрозмірних інтенсивностей випромінювання на одній/двох довжинах хвиль, для методів яскравісної, спектрального відношення й взаємнокореляційної умовних температур без корекції на випромінювальну здатність. Згадані методи адекватні лише для об'єктів, які являють собою абсолютно чорне тіло (АЧТ) з $\varepsilon_1 \equiv \varepsilon_2 \equiv 1$. Для методів з корекцією на випромінювальну здатність забарвленого («нечорного») об'єкта стверджується, що оцінки інструментальної похибки лишаються таким ж самими. Це некоректно, оскільки коефіцієнти чутливості, обчислені при $\varepsilon_1 \neq 1, \varepsilon_2 \neq 1$ відрізнятимуться від обчислених при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \equiv 1$.

В наведених в роботі [7] виразах для інструментальної та методичної складових похибок вимірювання температури деякими методами двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність, відносні похибки вимірювань інтенсивності ($\Delta I_1; \Delta I_2$) та випромінювальної здатності ($\Delta \varepsilon_1; \Delta \varepsilon_2$) входять з урахуванням знаку. Це справедливо лише тоді, коли останні мають систематичний характер. Причому, ($\Delta \varepsilon_1; \Delta \varepsilon_2$) можна вважати систематичними, а от щодо ($\Delta I_1; \Delta I_2$) таке припущення некоректне, оскільки вони мають випадкову природу, що обумовлено шумами сенсорів та вимірювальних каналів.

В роботі [8] проаналізовано систематичні методичні похибки вимірювання температури методами яскравісної, спектрального відношення й двокольорової компенсаційної умовних температур з корекцією на випромінювальну здатність об'єкта, при монохроматичних спектральних каналах. Встановлено, що останній метод має найнижчу методичну похибку при значних ($>>1$) відношеннях систематичної похибки задання коефіцієнта селективності випромінювання до похибки задання середнього рівня випромінювального здатності.

Виконаний в роботі [9] детальний аналіз джерел невизначеностей вимірювання температури інфрачервоними термометрами виконано для методу однокольорової ПВ з монохроматичним спектральним каналом вимірювання СГЕЯ. Окрім того, що аналіз не враховує специфіку монохроматичної ПВ, на його основі не очевидним є перехід від невизначеності сигналу інфрачервоного термометра до невизначеності власне результату вимірювання температури.

3. Мета роботи

Метою роботи є формуванням бюджету невизначеності вимірювання температури методами одно- та двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність, на основі аналізу рівнянь вимірювань та систематизації джерел невизначеностей вимірювань величин-аргументів. Бюджет невизначеності дає уявлення про вклад невизначеностей величин-аргументів в сумарну невизначеність вимірювання температури тим чи іншим методом ПВ. На його основі виконують оцінювання, за типом В, стандартних та розширених невизначеностей вимірювання температури, для порівняння точності різних методів ПВ в однакових умовах.

4. Огляд методів монохроматичної одно- та двокольорової ПВ

Відомо, що задача знаходження термодинамічної температури об'єкта за виміряною СГЕЯ на множині довжин хвиль, без будь-якої апіорної інформації про об'єкт, є некоректно поставленою – має безліч розв'язків [10, 11]. Про це свідчить перевищення на одиницю кількості невідомих над кількістю рівнянь в системі, що складається, наприклад, з $n=3$ однокольорових пірометричних рівнянь (одне рівняння на монохроматичний спектральний канал) [12]. Відповідно, щоб задача стала коректно поставленою (одним із критеріїв чого є існування єдиного розв'язку відносно термодинамічної температури), необхідно урівняти кількість невідомих та рівнянь в системі. Для однокольорової ПВ єдиним шляхом є апіорна оцінка монохроматичного значення ε_i спектральної нормальної випромінювальної здатності (коефіцієнту теплового випромінювання, коефіцієнту емісії, ступеню чорноти) [1] об'єкта на відповідній довжині хвилі λ_i . Стосовно двокольорової ПВ, це можна зробити двома способами:

- обираючи деяку модельну залежність спектральної випромінювальної здатності від довжини хвилі – $\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda)$, яка має бути тотожна реальній залежності $\varepsilon(\lambda)$. Причому, така залежність описується експоненційно-степенною функцією [6, 13], з певним чином заданим (з урахуванням довжин хвиль спектральних каналів λ_1 й λ_2) показником степеню.

- апіорі задаючи монохроматичні значення ε_1 й ε_2 спектральної випромінювальної здатності на відповідних довжинах хвиль.

Недоліком першого шляху є те, що існує лише 3 методи двокольорової ПВ з відповідними $\varepsilon_{\text{мод}}=f(\lambda)$, які забезпечують рівність виміряної умовної та термодинамічної температур при тому, що $\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda) \equiv \varepsilon(\lambda)$ [6]. Наприклад, метод умовної температури спектрального відношення, яка дорівнює термодинамічній лише при «сірому» спектральному розподілові випромінювальної здатності об'єкта ($\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda) = \text{const} \rightarrow \varepsilon_1/\varepsilon_2 \equiv 1$). Тому згадані методи мають обмежене застосування (треба підбирати об'єкт контролю під заданий $\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda)$) й тут не розглядатимуться. Більш універсальними двокольоровими методами, на думку автора, є ті, які реалізують другий спосіб.

В результаті аналізу літератури [6-8,13-15] встановлено, що всі методи монохроматичної одно- та двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність зводяться до наступного узагальнюючого рівняння вимірювання температури

$$T_{ПВ} = 1 / (1 / S_{1К,2К} + \Delta_{1К}), \quad (1)$$

де $T_{ПВ}$, К – шукана термодинамічна температура об'єкта контролю;

$S_{1К,2К}$, К – вимірювана умовна одно- або двокольорова температура [1], пропорційна СГЕЯ на одній або двох довжинах хвиль;

$\Delta_{1К,2К}$, K^{-1} – поправка на систематичну методичну похибку умовної одно- або двокольорової температури.

Систематична похибка обумовлена відмінністю від одиниці добутку спектральної випромінювальної здатності об'єкта контролю на коефіцієнт пропускання проміжного середовища для однієї/двох довжин хвиль. Згаданий добуток дорівнює 1 лише при візуванні пірометричної системи на термодинамічно рівноважне випромінювання моделі абсолютно чорного тіла (АЧТ), за умови ідеально прозорого (з одиничним спектральним коефіцієнтом пропускання) проміжного середовища.

Рівняння (1) витікає з пірометричних рівнянь для умовних одно- та двокольорових температур, наведених в роботі [12], за умови апроксимації СГЕЯ формулою Віна. Це справедливо для видимої та ближньої інфрачервоної областей спектра теплового випромінювання, зокрема, 500...1100 нм, за температури випромінювача від 1200 К. Зокрема, за таких умов відбувається вимірювання температури залізвуглецевих розплавів в металургії [12]. Слід сказати, що при точному математичному описі СГЕЯ згідно формули Планка, рівняння (1) стає некоректним.

На Рис. 1 наведено запропоновану автором класифікацію методів монохроматичної одно- та двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність.

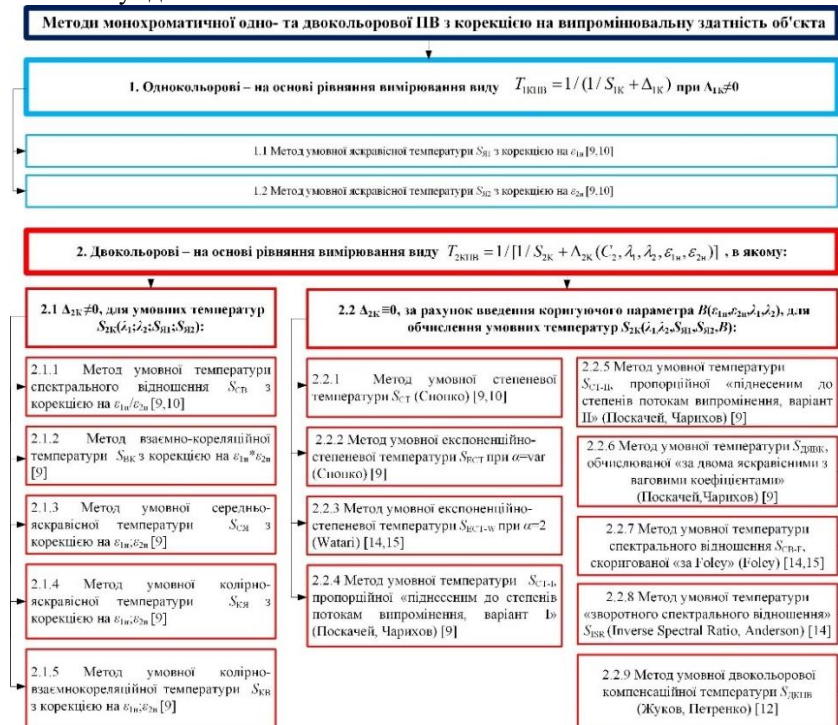


Рис. 1. Методи монохроматичної одно- та двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність.

Класифікація ґрунтується на умовних температурах, які покладено в основу рівнянь опосередкованих вимірювань температури. Двокольорові методи є найбільш численними. Їх поділено на 2 підгрупи, в які входять 5 та 9 методів, відповідно. Як видно з Рис. 1, у випадку умовних яскравісних температур для кожної з двох довжин хвиль, корекція систематичної методичної похибки виконується лише шляхом формування ненульової поправки $\Delta_{1К}$. Для двокольорових умовних температур додатково з'являється можливість обнулити відповідну поправку за рахунок використання коригуючого параметра, який «штучно» вводять в рівняння вимірювання умовної температури (див. п.2.1.2). За рахунок цього обчислена умовна температура дорівнює термодинамічній.

З метою корекції систематичної похибки будь-якої умовної температури згідно узагальнюючого рівняння (1), необхідні апіорні оцінки добутку спектральної випромінювальної здатності об'єкта на коефіцієнт пропускання проміжного середовища для однієї або двох довжин хвиль – $\epsilon_{1н} \cdot \tau_{1н}$ та/або $\epsilon_{2н} \cdot \tau_{2н}$. Для спрощення аналізу в рамках цієї роботи, вважатимемо, що $\tau_{1н} = \tau_{2н} = 1$. Виходячи з практики пірометричних вимірювань, оцінки спектральної випромінювальної здатності можуть бути як фіксованими, так й обчислюватись згідно окремих алгоритмів [9]. Причому, для більшості об'єктів контролю, наприклад металевих розплавів, ϵ_1 та ϵ_2 зазвичай корельовані з коефіцієнтом 1 (іншими словами, існують залежності виду $\epsilon_2 = f(\epsilon_1)$) [6]. Відповідно, при застосуванні алгоритмів корекції, які це враховують, отримаємо корельовані $\epsilon_{1н}$ й $\epsilon_{2н}$. Внаслідок суттєвої нелінійності таких залежностей, при позитивній кореляції між $\epsilon_{1н}$ й $\epsilon_{2н}$, їх середнє арифметичне $\epsilon_{ср.н} = (\epsilon_{1н} + \epsilon_{2н}) / 2$ та відношення $K_{ср.н} = \epsilon_{1н} / \epsilon_{2н}$ можуть бути або ж не бути корельованими. Тому вказані величини більш

інформативні, ніж $\varepsilon_{1н}$ й $\varepsilon_{2н}$, з точки зору аналізу невизначеностей вимірювання температури при застосуванні різних алгоритмів корекції. Надалі використовуватимемо саме $\varepsilon_{ср.н}$ й $K_{сн}$ в якості параметрів корекції систематичної методичної похибки умовних температур. В найпростішому випадку (апріорне усереднене настроювання [8]), їх задають як середні арифметичні величин ($\varepsilon_{ср.мин}, \varepsilon_{ср.мак}$) й ($K_{ср.мин}, K_{ср.мак}$). Останні належать до апріорної інформації про об'єкт контролю.

Формули обчислення умовних температур, поправок та коригуючих параметрів до них, наведено в Табл. 1-3.

Табл. 1. Математичні моделі методів однокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність.

Метод ПВ згідно Рис.1	Рівняння вимірювання умовних температур за СГЕЯ	Формула обчислення $\Delta_{1К}$
1.1	$S_{я1} = -\frac{C_2}{\lambda_1 \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1})}$	$\Delta_{я1} = -\frac{\lambda_1}{C_2} \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1})$
1.2	$S_{я2} = -\frac{C_2}{\lambda_2 \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})}$	$\Delta_{я2} = -\frac{\lambda_2}{C_2} \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1})$

Табл. 2. Математичні моделі методів двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність за п.2.1 ($\Delta_{2К} \neq 0$) [6].

Метод ПВ згідно Рис.1	Рівняння вимірювання умовних двокольорових температур за СГЕЯ	Рівняння вимірювання умовних двокольорових температур за однокольоровими	Формула обчислення $\Delta_{2К}$
2.1.1	$S_{св} = -[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_2}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{св} = 1 / (\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{я1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{я2}})$	$\Delta_{св} = -\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \ln(K_{сн})$
2.1.2	$S_{вк} = -[\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_2}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{вк} = 1 / (\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{я1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{я2}})$	$\Delta_{вк} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \ln[\frac{4 \cdot \varepsilon_{ср.н}^2 \cdot K_{сн}}{(K_{сн} + 1)^2}]$
2.1.3	$S_{ср} = -[\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_1}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) + \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_2}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{ср} = 1 / (\frac{1}{2 \cdot S_{я1}} + \frac{1}{2 \cdot S_{я2}})$	$\Delta_{ср} = \frac{1}{2 \cdot C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot [\lambda_1 \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1}) + \lambda_2 \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1})]$
2.1.4	$S_{кя} = -[\frac{3 \cdot \lambda_2 - \lambda_1}{4 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \frac{\lambda_1}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) + \frac{\lambda_2 - 3 \cdot \lambda_1}{4 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \frac{\lambda_2}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{кя} = 1 / (\frac{3 \cdot \lambda_2 - \lambda_1}{4 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \frac{1}{S_{я1}} + \frac{\lambda_2 - 3 \cdot \lambda_1}{4 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \frac{1}{S_{я2}})$	$\Delta_{кя} = -\frac{1}{4 \cdot C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot [\lambda_2 \cdot (3 \cdot \lambda_1 - \lambda_2) \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1}) - \lambda_1 \cdot (3 \cdot \lambda_2 - \lambda_1) \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1})]$
2.1.5	$S_{кв} = -[\frac{\lambda_2^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} \cdot \frac{\lambda_1}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) + \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \cdot \frac{\lambda_2}{C_2} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{кв} = 1 / (\frac{\lambda_2^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} \cdot \frac{1}{S_{я1}} + \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \cdot \frac{1}{S_{я2}})$	$\Delta_{кв} = -\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \cdot [\lambda_1 \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1}) - \lambda_2 \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1})]$

Табл. 3. Математичні моделі методів двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність за п.2.2 ($\Delta_{2К}=0$). [6,7,14,15].

Метод ПВ згідно Рис.1	Рівняння вимірювання умовних двокольорових температур за однокольоровими та коригуючим параметром В	Формула обчислення В
2.2.1	$S_{сг} = 1 / [\frac{B_{сг}}{C_2} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \ln(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}) + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{я1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{я2}}]$	$B_{сг} = \log_{\lambda_2/\lambda_1}(K_{сн})$
2.2.2	$S_{сгт} = 1 / (\frac{\lambda_2^{B_{сгт}+1}}{\lambda_2^{B_{сгт}+1} - \lambda_1^{B_{сгт}+1}} \cdot \frac{1}{S_{я1}} + \frac{\lambda_1^{B_{сгт}+1}}{\lambda_1^{B_{сгт}+1} - \lambda_2^{B_{сгт}+1}} \cdot \frac{1}{S_{я2}})$	$B_{сгт} = \log_{\lambda_2/\lambda_1}[\ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1}) / \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1})]$
2.2.3	$S_{сгт-в} = 1 / (\frac{\lambda_2^{B_{сгт-в}+1}}{\lambda_2^{B_{сгт-в}+1} - \lambda_1^{B_{сгт-в}+1}} \cdot \frac{1}{S_{я1}} + \frac{\lambda_1^{B_{сгт-в}+1}}{\lambda_1^{B_{сгт-в}+1} - \lambda_2^{B_{сгт-в}+1}} \cdot \frac{1}{S_{я2}})$	$B_{сгт-в} = \text{const} = 2$
2.2.4	$S_{сгт-1} = 1 / (\frac{\lambda_2 - \lambda_1 \cdot B_{сгт-1}}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{я1}} + \frac{\lambda_1 \cdot (1 - B_{сгт-1})}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{я2}})$	$B_{сгт-1} = [\ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1}) - \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1})] / [\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1}) - \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1})]$
2.2.5	$S_{сгт-н} = 1 / [(1 + \frac{\lambda_1 \cdot B_{сгт-н}}{\lambda_2}) \cdot \frac{1}{S_{я1}} - \frac{\lambda_1 \cdot B_{сгт-н}}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{я2}}]$	$B_{сгт-н} = [\ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1}) - \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1})] / [\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1}) - \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1})]$
2.2.6	$S_{дьянк} = 1 / [\frac{B_{дьянк} \cdot \lambda_2}{B_{дьянк} \cdot \lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{я1}} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - B_{дьянк} \cdot \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{я2}}]$	$B_{дьянк} = [\ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1})] / [\ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1})]$
2.2.7	$S_{св-ф} = 1 / [\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (\frac{1 - B}{\lambda_1 \cdot S_{я1}} - \frac{1 - B \cdot \lambda_2}{\lambda_2 \cdot S_{я2}})]$	$B_{св-ф} = -\ln(K_{сн}) / [\lambda_2 \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1}) - \lambda_1 \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1})]$
2.2.8	$S_{иср} = 1 / [(1 - B_{иср}) \cdot (\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_2}) + \frac{B_{иср}}{S_{я2}}]$	$B_{иср} = \frac{-1}{\lambda_1 / [((\lambda_1 \cdot \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1)) \cdot (1 - \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1}) / \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1}))] - 1}$
2.2.9	$S_{дкпв} = 2 / (\frac{1}{S_{св}} + \frac{1}{B})$	$B_{дкпв} = \frac{S_{я2} \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н}}{K_{сн} + 1}) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) + C_2}{\lambda_4 \cdot S_{я2} \cdot C_2} + \frac{S_{я1} \cdot \ln(\frac{2 \cdot \varepsilon_{ср.н} \cdot K_{сн}}{K_{сн} + 1}) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2}{\lambda_2 \cdot S_{я1} \cdot C_2}$

В Табл. 1-3 позначено:

λ_1, λ_2, m – довжини хвиль монохроматичних спектральних каналів реєстрації теплового випромінювання об'єкта;

$E_1, E_2, \text{Вт/м}^3 \cdot \text{ср}^{-1}$ – вимірювана СГЕЯ об'єкта контролю на довжинах хвиль λ_1, λ_2 ;

$S_{я1}(E_1), S_{я2}(E_2), K$ – вимірювані умовні однокольорові (яскравісні) температури на довжинах хвиль λ_1, λ_2 ;

$C_1 = (3,74177107 \pm 0,00000029) \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ – перша радіаційна стала;

$C_2 = (1,4387752 \pm 0,0000025) \cdot 10^{-2} \text{ К} \cdot \text{м}$ – друга радіаційна стала.

$B = f(\lambda_1, \lambda_2, \varepsilon_{ср.н}, K_{сн})$ – коригуючий параметр, що забезпечує $S_{2К} = T$.

5. Джерела невизначеностей величин-аргументів, які входять до рівнянь вимірювань температури

Як видно з Табл. 1-3, рівняння вимірювання температури одно- та двокольоровими методами ПВ містять одні й ті ж величини-аргументи. Для однокольорових методів за п.1.1 й 1.2 таких величин-аргументів 4 (S_1 або S_2 , λ_1 або λ_2 , $\varepsilon_{\text{ср.н}}$, $K_{\text{сн}}$) а для двокольорових методів – 6 ($S_1, S_2, \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon_{\text{ср.н}}, K_{\text{сн}}$). Серед останніх винятків становлять лише методи за п.2.1.1 й 2.2.1, в рівняннях вимірювання температури яких наявні 5 величин-аргументів (за рахунок лише одного параметра корекції – $K_{\text{сн}}$).

На рис. 2 наведено діаграму Ісікави для джерел невизначеності вимірювання температури методами монохроматичної одно- та двокольорової ПВ, з урахуванням специфіки апаратної реалізації пірометричної системи (мікроспектрометр з багатоелементним сенсором випромінювання на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), який працює в видимій та ближній інфрачервоній областях спектра [16]).



Рис. 2. Діаграма Ісікави для джерел невизначеностей вимірювання температури методами монохроматичної одно- та двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність.

Залучення мікроспектрометра пояснюється вимогою високого ступеню монохроматичності спектральних каналів вимірювання яскравісних температур, з шириною не більше 10...12 нм [17]. Ланцюг перетворення вимірюваних величин в ПЗЗ-сенсорі має наступний вигляд: СГЕЯ→заряд→постійна напруга→цифровий відлік напруги→умовна яскравісна температура [16]. Цей процес супроводжується накопиченням невизначеностей, викликаних специфічними шумами сенсора. Так, в роботах [16, 18], для сенсорів електромагнітного випромінювання на основі ПЗЗ виділяють наступні види шумів:

- шум зчитування (readout noise), обумовлений вбудованими схемами обробки сигналу в кожному каналі (підсилювачі заряду та напруги) сенсора та незалежний від часу інтегрування сигналу;
- фотоелектронний або дробовий шум (photoelectron or shot noise), внаслідок статистичної варіації швидкості надходження фотонів до сенсора внаслідок квантової природи світла;
- темновий шум (dark noise), обумовлений тепловою енергією електронів в напівпровідникових структурах та, відповідно, пропорційний часу інтегрування сигналу та температурі сенсора;
- шум квантування (quantization noise) внаслідок скінченної розрядності аналого-цифрового перетворювача мікроспектрометра.

Оскільки згадані шуми являють собою випадкові величини, для їх кількісних оцінок використовуватимемо відповідні середньоквадратичні значення – $\sigma(N_{\text{ш.зч}})$, $\sigma(N_{\text{ш.ф}})$, $\sigma(N_{\text{ш.т}})$, $\sigma(N_{\text{ш.кв}})$. Шум зчитування та темновий характеризуються нормальним законом розподілу, фотоелектронний шум – розподілом Пуассона, а шум квантування – рівномірним.

Ще одним джерелом невизначеності вимірювання умовних яскравісних температур є процедура калібрування сигналу мікроспектрометра за моделлю АЧТ. Вона визначається калібрувальною схемою отримання умовних яскравісних температур [17], згідно якої враховують такі дестабілізуючі фактори, як нестабільність спектральної випромінювальної здатності порожнини моделі АЧТ, невизначеність задання температури, неізотермічність та часову нестабільність температури цієї моделі. Типові кількісні оцінки («нормальні» та «найкращі») невизначеності калібрування умовних яскравісних температур для різних калібрувальних схем наведено в роботі [17].

Стандартні невизначеності вимірювання умовних яскравісних температур для кожного спектрального каналу (оцінювання за типом В) обчислюють за наступними формулами

$$u_1 = u(S_1) = \sqrt{\left(\frac{\partial S_1}{\partial N_1}\right)^2 \cdot (\sigma^2(N_{\text{ш.зч}}) + \sigma^2(N_{\text{ш.ф}}) + \sigma^2(N_{\text{ш.т}}) + \sigma^2(N_{\text{ш.кв}})) + u_{\text{кл}}^2(S_1)}, \quad (2)$$

$$u_2 = u(S_2) = \sqrt{\left(\frac{\partial S_2}{\partial N_2}\right)^2 \cdot (\sigma^2(N_{\text{ш.зч}}) + \sigma^2(N_{\text{ш.ф}}) + \sigma^2(N_{\text{ш.т}}) + \sigma^2(N_{\text{ш.кв}})) + u_{\text{кл}}^2(S_2)}, \quad (3)$$

де $S_1(N_1) = \frac{C_2}{\lambda_1 \cdot \ln(C_1 \cdot K_1 \cdot t / ((N_1 - B_1) \cdot \pi))}$, $S_2(N_2) = \frac{C_2}{\lambda_2 \cdot \ln(C_1 \cdot K_2 \cdot t / ((N_2 - B_2) \cdot \pi))}$ – рівняння вимірювань умовних яскравісних температур для 1-го та 2-го спектральних каналів сенсора;

N_1, N_2 – виміряні, протягом часу інтегрування t , відліки цифрового сигналу для 1-го та 2-го спектральних каналів ПЗЗ-сенсора, пропорційні відповідним значенням СГЕЯ об'єкта контролю;

K_1, K_2, B_1, B_2 – константи калібрування для 1-го та 2-го спектральних каналів сенсора, отримані при калібруванні сигналів за СГЕЯ термодинамічно рівноважного випромінення моделі АЧТ [16];

t – час інтегрування заряду ПЗЗ-сенсором;

$u_{кл}(S_1), u_{кл}(S_2)$ – невизначеності калібрування 1-го та 2-го спектральних каналів сенсора, які отримують за результатами процедури калібрування в акредитованій метрологічній установі або за паспортом конкретного мікроспектрометра.

Треба зазначити, що на невизначеності вимірювання умовних яскравісних температур можуть також впливати такі фактори, як нестабільність спектрального коефіцієнта пропускання оптичної системи, нестабільність коефіцієнтів перетворення СГЕЯ в електричний сигнал для спектральних каналів внаслідок зміни температури середовища, яке оточує сенсор, тощо [13]. Зазвичай, такий вплив усувають ретельною стабілізацією умов вимірювання яскравісних температур. У випадку, якщо це не можливо, стандартні невизначеності вимірювання яскравісних температур підлягають експериментальному оцінюванню в конкретних умовах (за типом А).

Невизначеності $u_3=u_{кл}(\lambda_1)$ й $u_4=u_{кл}(\lambda_2)$ відповідних довжин хвиль сенсора, визначаються процедурою калібрування за еталонною лампою з газовим робочим середовищем (наприклад, Ocean Optics HG-1 Mercury-Argon Calibration Source) [19]. Така лампа генерує випромінення з точно заданими довжинами хвиль, що відповідають вузьким смугам випромінення газів з лінійчатим спектром. Типові оцінки невизначеності довжин хвиль для мікроспектрометрів Ocean Optics складають 0,4...0,6 нм [19].

Приписавши величинам $\varepsilon_{ср.н}$, Kc рівномірний закон розподілу з границями $[\varepsilon_{ср.мін}, \varepsilon_{ср.макс}]$ й $[Kc_{мін}, Kc_{макс}]$ та враховуючи, що оцінками цих величин є параметри корекції $\varepsilon_{ср.н}$ й Kc_n , обчислюємо невизначеності параметрів корекції за формулами

$$u_5 = u(\varepsilon_{ср.н}) = \frac{\varepsilon_{ср.макс} - \varepsilon_{ср.мін}}{2 \cdot \sqrt{3}}, \quad (4)$$

$$u_6 = u(Kc_n) = \frac{Kc_{макс} - Kc_{мін}}{2 \cdot \sqrt{3}}. \quad (5)$$

Також, за наявності лише оцінок $\varepsilon_{1н}$ й $\varepsilon_{2н}$ з відповідними невизначеностями, можна перейти до невизначеності параметрів корекції за формулами [20]

$$u_5 = u(\varepsilon_{ср.н}) = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot u^2(\varepsilon_{1н}) + \frac{r(\varepsilon_{1н}, \varepsilon_{2н})}{2} \cdot u(\varepsilon_{1н}) \cdot u(\varepsilon_{2н}) + \frac{1}{4} \cdot u^2(\varepsilon_{2н})}, \quad (6)$$

$$u_6 = u(Kc_n) = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{2н}^2} \cdot u^2(\varepsilon_{1н}) - 2 \cdot r(\varepsilon_{1н}, \varepsilon_{2н}) \cdot \frac{\varepsilon_{1н}}{\varepsilon_{2н}^3} \cdot u(\varepsilon_{1н}) \cdot u(\varepsilon_{2н}) + \frac{\varepsilon_{1н}^2}{\varepsilon_{2н}^4} \cdot u^2(\varepsilon_{2н})}, \quad (7)$$

де $u(\varepsilon_{1н})$ й $u(\varepsilon_{2н})$ – стандартні невизначеності $\varepsilon_{1н}$ й $\varepsilon_{2н}$;

$r(\varepsilon_{1н}, \varepsilon_{2н})$ – коефіцієнт кореляції між $\varepsilon_{1н}$ й $\varepsilon_{2н}$.

6. Бюджет невизначеності вимірювання температури монохроматичної одно- та двокольорової ПВ

На основі Рис. 2 сформуємо бюджет невизначеності вимірювання температури методами монохроматичної одно- та двокольорової ПВ (Табл. 4).

Табл. 4. Бюджет невизначеності вимірювання температури методами монохроматичної одно- та двокольорової ПВ з корекцією на випромінювальну здатність.

i	Оцінка i -ї величини-аргумента	Станд. невизн. i -ї величини-аргумента	Закон розп. невизн.	Ексцес закону розп. невизн.	Коефіцієнт чутливості C_{ij} j -го метода ПВ до невизначеності i -ї величини-аргумента	Вклад невизначеності i -ї величини-аргумента	
1. Інструментальна складова невизначеності вимірювання температури							
1	$S_{я1}$, К	u_1 , К	НЗР	$\eta_1=0$	$C_{1j} = \partial T_{ПВj} / \partial S_{я1}$	$C_{1j} \cdot u_1$	
2	$S_{я2}$, К	u_2 , К		$\eta_2=0$	$C_{2j} = \partial T_{ПВj} / \partial S_{я2}$	$C_{2j} \cdot u_2$	
3	λ_1 , м	u_3 , м		$\eta_3=0$	$C_{3j} = \partial T_{ПВj} / \partial \lambda_1$	$C_{3j} \cdot u_2$	
4	λ_2 , м	u_4 , м		$\eta_4=0$	$C_{4j} = \partial T_{ПВj} / \partial \lambda_2$	$C_{4j} \cdot u_4$	
2. Методична складова невизначеності вимірювання температури							
5	$\varepsilon_{ср.н}$	u_5	РЗР	$\eta_5=-1,2$	$C_{5j} = \partial T_{ПВj} / \partial \varepsilon_{ср.н}$	$C_{5j} \cdot u_5$	
6	Kc_n	u_6		$\eta_6=-1,2$	$C_{6j} = \partial T_{ПВj} / \partial Kc_n$	$C_{6j} \cdot u_6$	
Коефіцієнт кореляції між параметрами корекції: $-1,0 \leq r_{5-6} = r(\varepsilon_{ср.н}, Kc_n) \leq 1,0$							
3. Характеристики точності результату вимірювання температури j -м методом ПВ							
Оцінка результату вимірювання температури i -м		Комбінована станд. невизн., К	Сумарний ексцес закону розп. невизн. результату вимірювання		Рівень довіри $P_{пор.}$	Коеф. охоплення k	Сумарна розширена невизн., К

методом ПВ, К		температури			
$T_{ПВj}=f(S_{я1}, S_{я2}, \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon_{ср.н}, K_{сн})$	$u_c(T_{ПВj})=f(C_{1j}, \dots, C_{6j}, u_1, \dots, u_6, r_{5-6})$	$\eta_{\Sigma j}=f(\eta_5, \eta_6, C_{5j}, C_{6j}, u_5, u_6, r_{5-6}, u_c(T_{ПВj}))$	0,95	$k_j=f(\eta_{\Sigma j}, P_{дов})$	$U(T_{ПВj})=f(u_c(T_{ПВj}), k_j)$

Наведених в Табл. 4 даних достатньо, щоб оцінювати, за типом В, невизначеність результату вимірювання температури будь-яким з вищезгаданих методів ПВ. Загалом, закони розподілів невизначеностей величин-аргументів можуть відрізнятися від наведених в Табл. 4. Це враховується заданням відповідних ексцесів законів розподілів. Також приділено увагу тому факту, що деякі алгоритми обчислення параметрів корекції обумовлюють існування кореляційного зв'язку між параметрами корекції з коефіцієнтом $r_{5-6} \neq 0$.

Характеристики точності [20] результату вимірювання температури обчислюють наступним чином.

1. Результат вимірювання температури оцінюють згідно узагальнюючого рівняння вимірювання (1), в яке підставляють формули обчислення конкретної умовної температури та поправки/коригуючого параметра (Табл.1-3).

2. Обчислюють абсолютну комбіновану стандартну невизначеність результату вимірювання температури (виходячи з того, що величини-аргументи 1-4 не корельовані між собою та іншими величинами-аргументами)

$$u_c(T_{ПВj}) = \sqrt{u_{ис}^2(T_{ПВj}) + u_m^2(T_{ПВj})}, \quad (8)$$

де $u_{ис}(T_{ПВj})$ й $u_{мет}(T_{ПВj})$ – інструментальна та методична складові невизначеності, відповідно.

Для них використовують наступні формули

$$u_{ис}(T_{ПВj}) = \sqrt{C_{1j}^2 \cdot u_1^2 + C_{2j}^2 \cdot u_2^2 + C_{3j}^2 \cdot u_3^2 + C_{4j}^2 \cdot u_4^2}, \quad (9)$$

$$u_{мет}(T_{ПВj}) = \sqrt{C_{5j}^2 \cdot u_5^2 + C_{6j}^2 \cdot u_6^2 + 2 \cdot r_{5-6} \cdot C_{5j} \cdot C_{6j} \cdot u_5 \cdot u_6}. \quad (10)$$

3. Обчислюють інтервальну характеристику результату вимірювання – розширену невизначеність, яка являє собою добуток комбінованої стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення (coverage factor) $K(P_{дов.})$, при заданому рівні довіри $P_{дов.}$.

$$U(T_{ПВj}) = k(P_{дов.}) \cdot u_c(T_{ПВj}). \quad (11)$$

При цьому, для коректної оцінки розширеної невизначеності треба правильно визначити коефіцієнт охоплення при заданому рівні довіри $P_{дов.}$ З цією метою, скористаємося методом ексцесів, який було адаптовано для оцінки розширеної невизначеності результату вимірювання в роботах [21, 22]. Так, коефіцієнт охоплення для результуючого закону розподілу невизначеності вимірюваної величини обчислюють на основі сумарного ексцесу розподілу невизначеності вимірюваної величини, з використанням апроксимуючої залежності, запропонованої в роботах [21]. Сумарний ексцес закону розподілу невизначеності результату вимірювання температури визначимо за правилом підсумовування ексцесів розподілів вхідних величин [21]. За відсутності кореляції між параметрами корекції ($r_{5-6}=0$) отримаємо наступну формулу

$$\eta_{\Sigma j} = \frac{\eta_{5-6} \cdot (C_{5j}^4 \cdot u_5^4 + C_{6j}^4 \cdot u_6^4)}{u_c^4(T_{ПВj})}. \quad (12)$$

За корельованих параметрів корекції ($r_{5-6} \neq 0$), формула (12) набуває вигляду

$$\eta_{\Sigma j} = \frac{\sum_{i=1}^4 \eta_i \cdot (C_{ij} \cdot u_i)^4 + \eta_{5-6} \cdot (C_{5j}^2 \cdot u_5^2 + 2 \cdot r_{5-6} \cdot C_{5j} \cdot C_{6j} \cdot u_5 \cdot u_6 + C_{6j}^2 \cdot u_6^2)^2}{u_c^4(T_{ПВj})}. \quad (13)$$

В формулах (12) й (13) позначено:

$\eta_i = 0$ – ексцес розподілів величин-аргументів 1-4, яким приписано НЗР;

$\eta_{5-6} = \eta_5 = \eta_6 = -1,2$ – ексцес розподілу параметрів корекції, яким приписано РЗР.

Коефіцієнт охоплення, для рівня довіри 0,95, обчислюють як [21,23]

$$k(\eta_{\Sigma j}, P_{дов.} = 0,95) = 0,1085 \cdot \eta_{\Sigma j}^3 + 0,1 \cdot \eta_{\Sigma j} + 1,96. \quad (14)$$

З наведених формул випливає, що на невизначеність вимірювання температури тим чи іншим методом ПВ впливатимуть відповідні коефіцієнти чутливості (часткових похідних від рівняння вимірювання за величинами-аргументами), а також наявність кореляційного зв'язку між параметрами корекції.

Очевидно, що першим етапом підвищення точності вимірювання температури методами монохроматичної одно- та двокольорової ПВ є мінімізація невизначеностей величин-аргументів рівнянь вимірювань. Так, для цього слід підвищувати точність вимірювання умовних яскравісних температур, а також знижувати невизначеності обчислення параметрів корекції шляхом вибору найбільш релевантного, для конкретного об'єкта, алгоритма.

Другим етапом підвищення точності вимірювання температури є вибір метода, який в конкретних умовах демонструватиме мінімальну невизначеність. Зокрема, висновок про необхідність такого вибору зроблено в роботі [11]. На основі сформованого бюджету невизначеності, треба дослідити трансформацію вхідних невизначеностей в невизначеності результатів вимірювання температури різними методами ПВ. Відповідно, необхідні аналітичні вирази коефіцієнтів чутливості $C_{1j}, \dots, C_{6j}$ для кожного j -го метода ПВ. Підстановка останніх в формули (8-11), дозволить отримати якісні й кількісні закономірності комплексного впливу невизначеностей вимірювання умовних яскравісних температур та задання параметрів корекції на невизначеності вимірювання температури різними методами ПВ, при однакових величинах-аргументів. Результатом аналізу цих закономірностей має стати формулювання умов, за яких той чи інший метод ПВ характеризується мінімальною невизначеністю вимірювання температури або ж пошук такого методу за конкретних умов вимірювання, які

описуються оцінками величин-аргументів, їх невизначеностями та можливою кореляцією між параметрами корекції.

7. Висновки

Таким чином, в результаті виконаного аналізу встановлено, що монохроматичні методи одно- та двокольорової пірометрії випромінювання з корекцією на випромінювальну здатність ґрунтуються на узагальнюючому рівнянні вимірювання температури. Воно витікає з апроксимації спектральної густини енергетичної яскравості об'єкта формулою Віна. Рівняння вимірювання конкретного метода містить базову (ту, за якою названо метод) умовну температуру з відповідною поправкою чи коригуючим параметром, який враховує спектральну випромінювальну здатність об'єкта контролю.

В результаті подальшого аналізу рівнянь опосередкованих вимірювань температури підтверджено те, що досліджувані методи пірометрії випромінювання використовують одні й ті ж вхідні величин (величини-аргументи в рівняннях вимірювань). З урахуванням специфіки апаратної реалізації пірометричної системи, визначено фактори, що обумовлюють невизначеності величин-аргументів та описано способи їх кількісного оцінювання. В результаті сформовано бюджет невизначеності опосередкованого вимірювання температури й отримано формули оцінювання стандартної та розширеної, з рівнем довіри 0,95, невизначеностей результату вимірювання температури. Показано, що при однакових невизначеностях величин-аргументів, точність методів пірометрії випромінювання визначається лише значеннями відповідних коефіцієнтів чутливості. Обґрунтовано необхідність отримання аналітичних виразів для обчислення коефіцієнтів чутливості. Це дозволить, за однакових умов, проаналізувати комплексний вплив невизначеностей величин-аргументів на точність вимірювання температури досліджуваними методами пірометрії випромінювання з метою визначення найбільш точного (з мінімальною невизначеністю) метода в конкретних умовах вимірювання або ж умов, за яких обраний метод має найвищу точність.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи немає.

Список використаної літератури

- [1] A. Prokhorov et al., *Spaceborne optoelectronic sensors and their radiometric calibration terms and definitions. Part 1. Calibration techniques. NIST Interagency/Internal Report 7203*. US Department of Commerce, Gaithersburg, 2021.
- [2] Ratio Pyrometers Datasheet – Williamson Corporation. [Online]. Available: https://info.williamsonir.com/hubfs/Offer_Docs/Pro%20Ratio%20Pyrometer%20DS.pdf
- [3] Principle, advantages, limitations and applications of two-colour pyrometers in thermal processes – Keller GmbH [Online]. Available: <https://www.keller.de/dl.php?f=gisul-bogoseo-two-colour-pyrometer&h=f6861e87d41f43cL3Zhci93d3cvdmhvc3RzL2tlbGxlc5kZS9odHRwZG9jcy9zdG9yYWdlL2Z0cC9pdHMvSVRTL8O2ZmZlbnRsaWN0ZXIgcVpZlWljaCBmcmVpZlZlWnVnYW5nL2VuLzA0IFRIY2huaWNhbCBSZXBvcnRzLzAxIEZlbnRhbWVudGFscy9UUUUiBUd28tY29sb3VyIHB5cm9tZXRLcl9JRDl1MTNmMjAxNTA3X2VuLnBkZg>
- [4] Pyrometers – A Global Market Overview. January, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5527563/pyrometers-a-global-market-overview?srsltid=AfmBOooFTyVII0zbL7UfSY0nFcwHxXoHJUIHedQyfwGubsOsHVKuhst>
- [5] M. Sugiura et al., “Two-color Method for Steel Temperature Measurement Unaffected by Water-induced Obstructions”, *ISIJ International*, vol. 63, p. 346–353, 2023.
- [6] В. Н. Снопко, *Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения*. Минск: Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ, 1999.
- [7] Н. Є. Гоц, “Аналіз похибок вимірювання температури методами двоканальної термометрії випромінювання”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» (Комп'ютерні системи та мережі)*, № 688, с. 83–90, 2010.
- [8] Л. Ф. Жуков, та Д.О. Петренко, “Вплив випромінювальних характеристик металевих сплавів на методичні похибки двокольорової компенсаційної та класичної термометрії”, *Вимірювальна техніка та метрологія*, т. 80, вип. 3, с. 39–45, 2019.
- [9] N. Hots, “Investigation of Temperature Measurement Uncertainty Components for Infrared Radiation Thermometry” in *Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. Series: Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 543, “International Conference on Systems, Control and Information Technologies–2016”, Springer, 2016, pp. 556–566.
- [10] A. Araujo, R. Silva, “Surface temperature estimation in determined multi-wavelength pyrometry systems”, *The Review of scientific instruments*, vol. 91, iss. 5, 054901, 2020.
- [11] J. Chen et al., “A data processing method for two-color pyrometers in accurate temperature measurement of high-temperature flow fields”, *Measurement*, vol. 243, 116431, 2025.

- [12] Л. Ф. Жуков, Д. О. Петренко, “Ресурсозберігаючий безперервний оптичний контроль температури рідкого металу в металургії енергетичного машинобудування”, *Системні дослідження в енергетиці*, вип. 3 (74), с. 64–77, 2023.
- [13] Z. Zhang, B. Tsai, G. Machin, *Radiometric Temperature Measurements II. Applications*. New York: Academic Press (Elsevier), 2010.
- [14] B. K. Tsai, R. L. Shoemaker, D. P. DeWitt et al., “Dual-wavelength radiation thermometry: Emissivity compensation algorithms”, *International Journal of Thermophysics*, vol. 11, pp. 269–281, 1990.
- [15] B. K. Tsai, D. P. DeWitt, G. J. Dail, “Application of dual-wavelength radiation thermometry to the aluminum industry”, *Measurement*, vol. 11, iss. 3, p. 211–221, 1993.
- [16] Y. Zhang et al., “Measurement Performance Analysis for a Charge-Coupled-Device-based Near-Infrared Multi-spectral Pyrometer”, *Infrared Physics & Technology*, vol. 106, 103273, 2020.
- [17] P. Saunders et al., *Uncertainty estimation of primary radiometric temperature measurements*. Technical report of International Committee for Weights and Measures, 2018.
- [18] J. J. Davenport, J. Hodgkinson, J. R. Saffell, R. P. Tatam, “Noise analysis for CCD-based ultraviolet and visible spectrophotometry”, *Applied Optics*, vol. 54, iss. 27, pp. 8135–8144, 2015.
- [19] USB4000 Fiber Optic Spectrometer. Installation and Operation Manual [Online]. Available: <https://focenter.com/media/wysiwyg/documents/Ocean-Optics-Inc-Ocean-Optics-USB4000-Fiber-Optic-Spectrometer-Fiber-Optic-Center.pdf>
- [20] О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, *Основи теорії невизначеності вимірювань*. Херсон : Олді-плюс, 2020.
- [21] И. П. Захаров, Е. А. Климова, “Применение метода эксцессов для получения достоверной оценки расширенной неопределенности”, *Системы обработки информации*, вип. 3 (119), с. 24–28, 2014.
- [22] I. Zakharov, P. Neyezhnikov, O. Botsiura, “Expanded uncertainty evaluation taking into account the correlation between estimates of input quantities”, *Ukrainian Metrological Journal*. no. 1, pp. 4–8, 2021.