

Методи монохроматичної одно- й двокольорової термометрії випромінення розплавів в металургії. Частина 2

В статті розглядається друга група методів монохроматичної одно- й двокольорової термометрії випромінення — ті, в моделях вимірювань яких наявні параметри корекції для врахування спектральної випромінювальної здатності забарвлених об'єктів, до яких належать металеві розплави. На відміну від багатокольорових, ці методи характеризуються меншою інструментальною складовою невизначеності вимірювання температури, тому їх застосування має сенс з точки зору підвищення точності вимірювання й вірогідності контролю температури розплавів. На основі узагальнюючих моделей вимірювань термодинамічної температури запропоновано класифікацію методів другої групи термометрії випромінення. Відповідно до неї, виявлені 25 методів підпадають під 4 узагальнюючі моделі вимірювань. Встановлено, що для переважної більшості (1 підгрупа) методів справедлива узагальнююча модель, яка впливає з формули Віна. При цьому 15 методів 1 підгрупи характеризуються однаковим набором вхідних величин, включно зі значеннями спектральної випромінювальної здатності на відповідних довжинах хвиль. Узагальнюючі моделі для решти 3 підгруп методів є емпіричними або ж ґрунтуються на деяких апріорних залежностях між значеннями спектральної випромінювальної здатності на двох довжинах хвиль. Це обмежує область їх адекватного застосування. Найбільш універсальними визнано ті методи термометрії випромінення, моделі вимірювань яких містять значення спектральної випромінювальної здатності в явному вигляді. Обґрунтовано, що в умовах суттєво змінних випромінювальних характеристик розплавів найбільш метрологічно ефективною є корекція визначених методів термометрії випромінення "in situ", в режимі реального часу. Для цього необхідні сторонні безконтактні методи вимірювання спектральної випромінювальної здатності, огляд яких виконано. Враховуючи складність технічної реалізації й вартість, найбільш прийнятними у випадку розплавів є пасивні методи, які ґрунтуються на вимірюванні, за власним випроміненням об'єкта, інваріантних до температури величин й апріорних моделях спектральної випромінювальної здатності. Запропоновано двоетапну концепцію підвищення точності вимірювання температури розплавів. Визначено перелік методів термометрії випромінення й вимірювання спектральної випромінювальної здатності, які підлягають подальшому метрологічному аналізу в рамках реалізації концепції.

Ключові слова: монохроматична одно- й двокольорова термометрія випромінення, розплав, термодинамічна та умовна температура, спектральна випромінювальна здатність, корекція, модель (рівняння) вимірювання, невизначеність вимірювання.

Вступ. Температура й хімічний склад розплаву є ключовими параметрами [1], які характеризують хід технологічних процесів виплавки залізовуглецевих сплавів та є визначальними для ресурсо-, в тому числі, енергозатрат їх отримання [2]. Наприклад, в роботі [2] обґрунтовано використання фактора термочасової обробки розплаву синтетичного сірого чавуну для

визначення оптимального часу перегрівання й витримки останнього при плавці в індукційних тигельних печах. Контроль цього фактора в режимі реального часу неможливий без безперервного вимірювання температури.

В Україні технології експресного контролю й регулювання хімічного складу розплавів, зокрема, синтетичного чавуну, на основі термічного дерива-

тивного аналізу й статистичного моделювання методом Монте-Карло, активно розвиваються фахівцями відділу безперервного лиття та деформаційних процесів ФТІМС НАН України [3, 4]. Підвищенню якості вимірювання температури розплавів, зокрема, безконтактним способом (за спектральною густиною енергетичної яскравості (СГЕЯ) [5] поверхні, через проміжне газове середовище) приділено значно менше уваги. І це при тому, що протягом останніх 25 років відбувся якісний стрибок в сторону підвищення надійності й зниження вартості первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) теплового випромінювання, які є технічною базою для реалізації методів термометрії випромінювання (ТВ). Наприклад, в Японії регулярно публікують огляди з вимірювальних технологій для сталеливарної галузі [6, 7], які свідчать про значну частку робіт, присвячених безконтактному безперервному вимірюванню температури, зокрема розплавів чавуну на випуску з доменних печей та в інших металургійних агрегатах, а також поверхні сталених заготовок в станах гарячої прокатки. Японські фахівці підкреслюють, що такі вимірювання є запорукою сталого функціонування сучасних ливарних підприємств, а також основою для створення цифрових двійників (Digital Twins) виробництв й кіберфізичних систем (Cyber-Physical Systems). Цифрові двійники, поєднані з машинним навчанням, зокрема, дозволять в режимі реального часу виявляти відхилення від нормального перебігу процесу й швидко на них реагувати без участі людини-оператора, а кіберфізичні системи збирають великі масиви даних вимірюваних параметрів для подальшого моделювання технологічного процесу з метою його оптимізації й підвищення продуктивності [7].

Свого часу фахівці ФТІМС НАН України (О.В. Богдан, М.І. Смірнов, В.М. Крупник та А.Л. Корнієнко під керівництвом д.т.н. Л.Ф. Жукова) доклали чимало зусиль для розробки методів монохроматичної багатокольорової (3—6 довжин хвиль) ТВ [8—11], спрямованих на мінімізацію методичної складової невизначеності вимірювання температури металевих сплавів в рідкій та твердій фазах. Для їх технічної реалізації необхідне досить дороге обладнання — мікроспектрометр [9] з відповідним програмним забезпеченням чи багатохвильовий термометр випромінювання [12]. Також в ході теоретичних досліджень було залишено поза увагою [8—10] або ж оцінено некоректно [11] інструментальну складову невизначеності, що породило ілюзію безумовного підвищення точності вимірювання температури розплавів згаданими методами. Виходячи з моделей вимірювань, вони належать до класів детермінованої поліхроматичної й подвійного спектрального відношення ТВ [5], де коефіцієнт трансформації невизначеностей умовних яскравісних температур [5, 8] в інструментальну складову невизначеності вимірювання термодинамічної температури різко зростає зі збільшенням кількості довжин хвиль. Відповідно, щоб інструментальна складова була менша або співмірна з методичною (лише тоді, при мінімізованій методичній складовій, досягається заяв-

лене зниження сумарної невизначеності вимірювання температури), стандартні невизначеності вимірювання умовних яскравісних температур мають бути в межах десятих долей Кельвіна, що можна гарантувати лише на високоточному обладнанні в лабораторних умовах.

Значно менший коефіцієнт трансформації невизначеностей яскравісних умовних температур в невизначеність вимірювання температури характерний для методів ТВ з не більш ніж двома монохроматичними довжинами хвиль вимірювання СГЕЯ. Цей клас методів автором було поділено на 2 групи, залежно від наявності в моделях вимірювань температури інформації про спектральну випромінювальну здатність (коефіцієнт емісії, коефіцієнт теплового випромінювання, ступінь чорноти) $\varepsilon(\lambda)$ [5, 9] об'єкта. В попередній роботі [13] проаналізовано першу групу — найпростіші методи, які не містять параметрів корекції для врахування $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта. Встановлено, що ця група методів ТВ може адекватно застосовуватися лише в комплексі з технологіями нормалізації випромінювання об'єкта, які, у випадку залізобетонних розплавів, дорогі, технічно складні, а деякі з них несуть потенційну небезпеку виникнення аварійних ситуацій. Без цих технологій згадані методи ТВ не можуть забезпечити вимірювання температури розплавів в металургії з необхідною для отримання якісної металопродукції точністю.

Поточна робота — це друга частина тематичного огляду монохроматичної одно- й двокольорової ТВ розплавів в металургії. Метою її є систематизація та аналіз моделей вимірювання температури методами монохроматичної одно- й двокольорової ТВ з корекцією на $\varepsilon(\lambda)$ забарвленого об'єкта, а також огляд методів вимірювання $\varepsilon(\lambda)$, придатних для корекції методів ТВ “in situ”, в режимі реального часу. Це допоможе визначитися з методами для подальшого дослідження метрологічних характеристик, спрямованого на досягнення максимальної точності вимірювання температури розплавів.

Виклад основного матеріалу. Наведені в [13, с. 9—10] пірометричні рівняння, які є наслідком апроксимації спектральної густини енергетичної яскравості (СГЕЯ) розжареного тіла формулою Віна (Wien), дозволяють у явному вигляді встановити залежність термодинамічної температури від умовних температур, довжин хвиль й значень спектральної випромінювальної здатності. Звідси випливає узагальнююче рівняння вимірювання температури для переважної більшості методів одно- й двокольорової ТВ з корекцією на випромінювальну здатність об'єкта:

$$T_{\text{ТВ}} = \frac{1}{\frac{1}{S_{1\text{К}2\text{К}}} + \Delta_{1\text{К}2\text{К}}}, \quad (1)$$

де $T_{\text{ТВ}}$, К — шукана термодинамічна температура об'єкта;

$S_{1\text{К}2\text{К}}$, К — вимірювана умовна одно- або двокольорова температура;

$$\Delta_{1K} = (\lambda_i / C_2) \cdot \ln[\varepsilon(\lambda_i)], \quad i = 1, 2 \text{ та } \Delta_{2K} = (\lambda_{\text{екв}} / C_2) \cdot \ln(\varepsilon_{\text{екв}}), \quad \text{K}^{-1}$$

— поправки на випромінювальну здатність до умовних однокольорової та двокольорової температур, відповідно;

$\lambda_{\text{екв}} = f(\lambda_1, \lambda_2)$, м та $\varepsilon_{\text{екв}} = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \lambda_1, \lambda_2)$ — еквівалентні [8, 9] довжина хвилі й випромінювальна здатність двокольорової умовної температури, відповідно;

$\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon_1$, $\varepsilon_2 = \varepsilon(\lambda_2)$ — значення спектральної випромінювальної здатності об'єкта на відповідних довжинах хвиль;

λ_1, λ_2 , м — довжини хвиль вимірювання СГЕЯ/умовних однокольорових температур об'єкта.

Другий доданок в знаменнику формули (1) являє собою систематичну методичну похибку умовної температури, взяту з протилежним знаком. Вона дорівнює нулю при термодинамічно рівноважному випроміненні абсолютно чорного тіла ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{\text{екв}} \equiv 1$), а також за деяких співвідношень між ε_1 й ε_2 забарвленого («нечорного») об'єкта, що детально розглянуто в [13].

Об'єкти вимірювання температури в металургії, в тому числі залізобудівні розплави в ході обробки й розливання, належать до забарвлених тіл з $\varepsilon_1 < 1$ й $\varepsilon_2 < 1$. Причому, у випадку чистої (без оксидної плівки/шлаку) металевої поверхні розплаву $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$, [2, 5]. Тому очевидно, що в таких умовах $\Delta_{1K,2K}$ в рівнянні (1) буде відмінною від 0. Саме формування ненульової поправки, шляхом апріорного задання ε_1 та/або ε_2 , лежить в основі першого способу врахування в методах ТВ апріорної інформації про випромінювальні характеристики об'єкта.

Другий спосіб врахування цієї інформації застосовний лише в двокольоровій ТВ, а саме для умовних температур, визначених через відношення значень СГЕЯ на двох довжинах хвиль. Це реалізується шляхом введення в формулу відповідної умовної температури додаткового коригуючого параметра $B = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \lambda_1, \lambda_2)$, завдяки чому $\varepsilon_{\text{екв}} = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \lambda_1, \lambda_2, B) \equiv 1$ й, відповідно, $\Delta_{2K} \equiv 0$.

В роботі [14] описано емпіричне рівняння вимірювання температури виду:

$$T_{\text{ТВ}} = S_{1K,2K} + \Delta_{1K,2K}, \quad (2)$$

де $\Delta_{1K,2K} = T_n - S_{1K,2K}$, К — поправка до умовної температури, яку визначають за умов калібрування (при термодинамічній температурі T_n й умовній $S_{1K,2K}$).

Це рівняння є найпростішим серед усіх та базується на апріорній інформації, що об'єкт має стабільну випромінювальну здатність ($\varepsilon_i = \text{const}$ або $\varepsilon_{\text{екв}} = \text{const}$). Але, при відхиленні T об'єкта від T_n , з'являється додаткова систематична похибка, що є «платою» за простоту рівняння вимірювання.

В ході досліджень випромінювальних характеристик розплавів чавуну в вагранках, електродугових та індукційних тигельних печах Л.Ф. Жуковим (L.F. Zhukov) було запропоновано узагальнююче рівняння вимірювання температури [2, 15, 16], застосовне як для широкосмугової, так й монохроматичної ТВ:

$$T_{\text{ТВ}} = S_{1K,2K} \cdot K + A, \quad (3)$$

де K , K^{-1} та A , К — апріорі задані мультиплікативний та адитивний коефіцієнти корекції, відповідно (підлягають експериментальному визначенню на об'єкті).

Рівняння (3) ґрунтується на припущенні, в певному температурному діапазоні, про лінійну залежність ε_i або $\varepsilon_{\text{екв}}$ об'єкта від температури останнього. Це справедливо у випадку чистої, оптично рівної поверхні залізобудівних розплавів. Але така поверхня спостерігається в досить обмежених умовах, наприклад, якщо температура суттєво перевищує температуру рівноваги реакції відновлення кремнезему вуглецем розплаву (так звана «тигельна» реакція [2] в печах з кислото футерівкою). До того ж, крутизна цієї температурної залежності мала. Загалом в рівняння (3) можуть входити будь-які умовні двокольорові температури, а не лише умовна температура спектрального відношення, як це описано в [15].

Також відомі методи ТВ [17—21], які підпадають під узагальнюючу модель вимірювання температури виду:

$$F[\varepsilon_1(\varepsilon_2), \lambda_1, \lambda_2, S_{Я1}, S_{Я2}, T_{\text{ТВ}}] = 0, \quad (4)$$

де $\varepsilon_1(\varepsilon_2)$ — апріорі відома залежність між значеннями спектральної випромінювальної здатності об'єкта на двох довжинах хвиль.

Загалом модель (4) ускладнює аналіз невизначеностей вимірювання температури за типом В [22], оскільки для знаходження коефіцієнтів чутливості необхідно виконати диференціювання неявно заданої функції.

На рис. 1 наведено запропоновану автором класифікацію методів монохроматичної одно- й двокольорової ТВ з корекцією на випромінювальну здатність об'єкта. За основу взято класифікацію [23, с. 20].

Як видно з рис. 1, найбільш численною є перша група методів ТВ. Методи за п. 1.1, 1.2 (табл. 1) ґрунтуються на умовних температурах, розглянутих в роботі [13], там же наведено вирази для обчислення двокольорових температур через дві яскравісні чи два значення СГЕЯ.

Як відомо [13], першими було введено поняття яскравісної та спектрального відношення (колірної) умовних температур. Тому не дивно, що методи ТВ на їх основі (п. 1.1.1—1.1.3) стали найбільш популярними та використовуються в переважній більшості комерційних монохроматичних термометрів випромінення. Методи, які ґрунтуються на решті 4 умовних «некласичних» температурах, на сьогодні не є поширеними та знайомі переважно фахівцям в галузі високотемпературної термометрії випромінення.

Формули поправок для методів ТВ за п. 1.2.1—1.2.3 виведено автором монографії [5] на основі припущення про лінійну залежність поправки від вимірюваного інваріанта. Очевидно, що для цього у об'єкта має бути деяка нелінійна залежність між

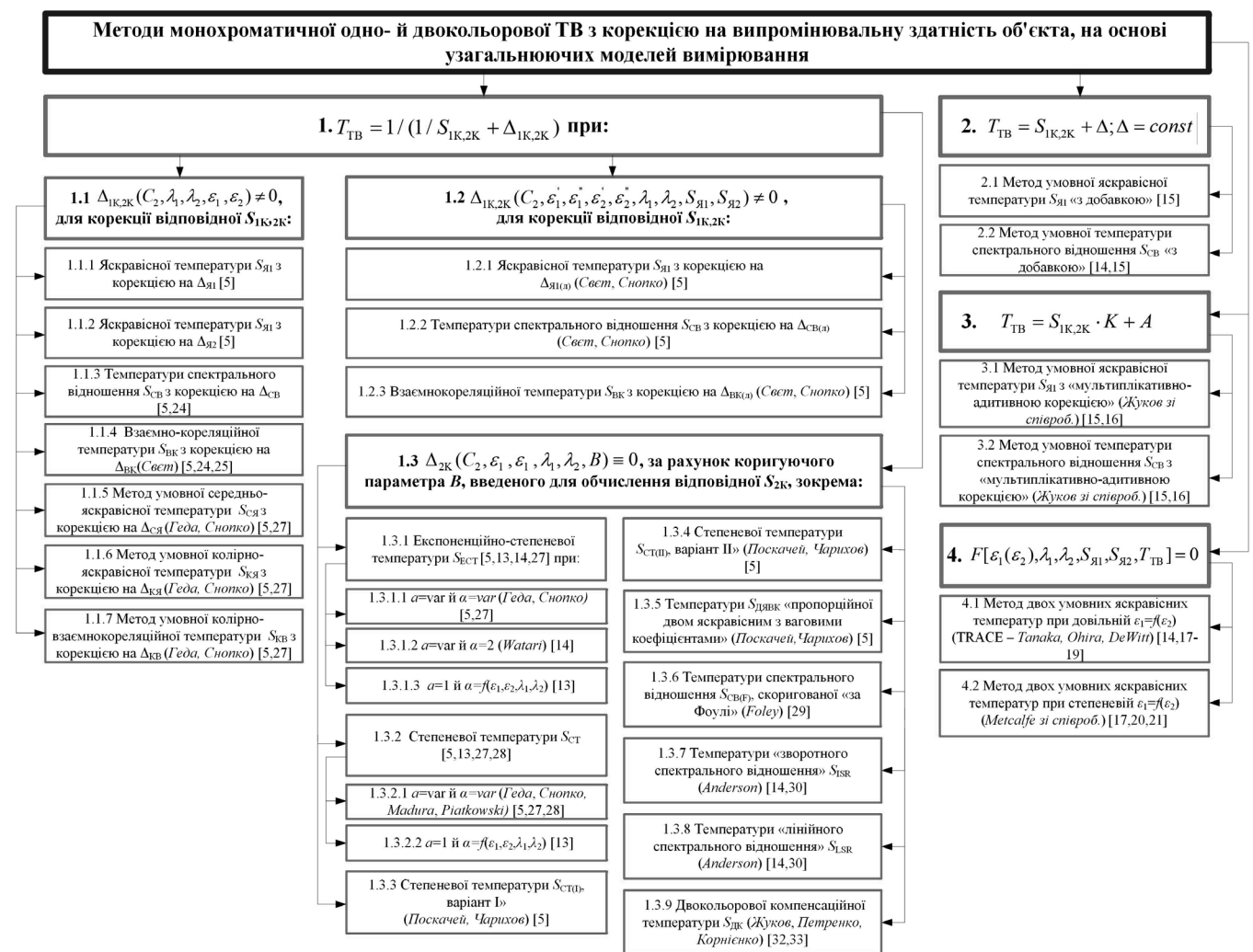


Рис. 1.

Класифікація методів монохроматичної одно- й двокольорової ТВ з корекцією на $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта

двома значеннями спектральної випромінювальної здатності, наприклад, виду $\varepsilon_2(\varepsilon_1)$, визначена на областях $[\varepsilon_1' \dots \varepsilon_1'']$ й $[\varepsilon_2' \dots \varepsilon_2'']$.

Визначення термодинамічної температури методами ТВ за п. 1.3 (табл. 2) зводиться до вимірювання однієї з умовних температур, в формулі якої вплив спектральної випромінювальної здатності «нечорного» об'єкта враховано коригуючим параметром B .

Окремо слід сказати про умовні експоненційно-степеневу й степеневу температури [5, 27] (п. 1.3.1 й 1.3.2). Їх назви походять від відповідних модельних залежностей спектральної випромінювальної здатності (див. табл. 2), якими запропоновано описувати реальну $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта. Очевидно, що для обчислення $S_{ЕСТ}$ й $S_{СТ}$ необхідне апріорне знання показника степеню α згаданих модельних залежностей, що, в свою чергу, вимагає експериментальної оцінки $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта термометрії на множині довжин хвиль. Автором статті отримано формули [23] обчислення згаданих показників степенів через значення спектральної випромінювальної здатності лише на двох довжинах хвиль (методи за п. 1.3.1.3 й 1.3.2.2). Дійсно, якщо підставити $B_{ЕСТ}$ в вираз еквівалентної

випромінювальної здатності для $S_{ЕСТ}$, отримаємо

$$\varepsilon_{\text{ЕВ}}(ЕСТ) = \varepsilon_2 \lambda_1^{\alpha_{ЕСТ}} / \varepsilon_1 \lambda_2^{\alpha_{ЕСТ}} = \varepsilon_2 \lambda_1^{\log_{\lambda_2/\lambda_1} [1/\ln(\varepsilon_2)/\ln(\varepsilon_1)]} / \varepsilon_1 \lambda_2^{\log_{\lambda_2/\lambda_1} [1/\ln(\varepsilon_2)/\ln(\varepsilon_1)]} \equiv 1.$$

Методи ТВ за п. 1.3.6—1.3.8 експериментально досліджувалися в ході вимірювання температури алюмінієвих сплавів 1100, 2224, 5052, 7075 [14], при різних станах поверхні та режимах їх термічної обробки. Встановлено, що гранична похибка вимірювання температури становить 10 °С, в температурному діапазоні 350...500 °С, при центральних довжинах хвиль спектральних каналів $\lambda_1 = 2100$ й $\lambda_2 = 2400$ нм. Основний вклад в похибку вносить методична складова, внаслідок зміни $\varepsilon(\lambda)$ сплавів відносно тих її значень, за якими обчислено коригуючі параметри.

Особливістю методів ТВ за п. 2—3, рис. 1 (табл. 3) є те, що з набору вхідних величин попередніх методів ТВ в них присутні лише умовні одно- чи двокольорові температури.

В табл. 3 позначено:

T' , T'' , K — граничні значення термодинамічної температури об'єкта;

Умовні температури та поправки до них для методів ТВ за п. 1.1 й 1.2, рис. 1 [5, 12—14, 24, 25]

Метод ТВ	Базова умовна температура	Поправка $\Delta_{1K,2K}$
1.1.1	$S_{Я1}$	$\Delta_{Я1} = (\lambda_1 / C_2) \cdot \ln(\varepsilon_1)$
1.1.2	$S_{Я2}$	$\Delta_{Я2} = (\lambda_2 / C_2) \cdot \ln(\varepsilon_2)$
1.1.3	S_{CB}	$\Delta_{CB} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)$
1.1.4	S_{BK}	$\Delta_{BK} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2)} \cdot \ln(\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2)$
1.1.5	$S_{CЯ}$	$\Delta_{CЯ} = \frac{1}{2 \cdot C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot [\lambda_1 \cdot \ln(\varepsilon_1) + \lambda_2 \cdot \ln(\varepsilon_2)]$
1.1.6	$S_{КЯ}$	$\Delta_{КЯ} = -\frac{1}{4 \cdot C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot [\lambda_2 \cdot (3 \cdot \lambda_1 - \lambda_2) \cdot \ln(\varepsilon_1) - \lambda_1 \cdot (3 \cdot \lambda_2 - \lambda_1) \cdot \ln(\varepsilon_2)]$
1.1.7	S_{KB}	$\Delta_{KB} = -\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \cdot [\lambda_1 \cdot \ln(\varepsilon_2) - \lambda_2 \cdot \ln(\varepsilon_1)]$
1.2.1	$S_{Я1}$	$\Delta_{Я1(n)} = \frac{\lambda_1}{C_2} \cdot \frac{\lambda_2 \cdot [\ln(\varepsilon_1'') \cdot \ln(\varepsilon_2') - \ln(\varepsilon_1') \cdot \ln(\varepsilon_2'')] + J_{21} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_1'}\right)}{\lambda_2 \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_2'}\right) - \lambda_1 \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_1'}\right)}$
1.2.2	S_{CB}	$\Delta_{CB(n)} = -\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \frac{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot [\ln(\varepsilon_1'') \cdot \ln(\varepsilon_2') - \ln(\varepsilon_1') \cdot \ln(\varepsilon_2'')] + J_{21} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_1''} \cdot \frac{\varepsilon_2'}{\varepsilon_2''}\right)}{\lambda_2 \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_2'}\right) - \lambda_1 \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_1'}\right)}$
1.2.3	S_{BK}	$\Delta_{BK(n)} = -\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2)} \cdot \frac{(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot [\ln(\varepsilon_1'') \cdot \ln(\varepsilon_2') - \ln(\varepsilon_1') \cdot \ln(\varepsilon_2'')] + J_{21} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_1''} \cdot \frac{\varepsilon_2'}{\varepsilon_2''}\right)}{\lambda_2 \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_2'}\right) - \lambda_1 \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon_1'}\right)}$

Примітка: тут $J_{21} = f(C_2, S_{Я1}, S_{Я2}) = C_2 \cdot (1/S_{Я1} - 1/S_{Я2})$, м — температурний інваріант [5, 25, 26];

$\varepsilon_1', \varepsilon_1'', \varepsilon_2', \varepsilon_2''$ — апіорі відомі граничні значення випромінювальної здатності на відповідних довжинах хвиль.

$\varepsilon_1', \varepsilon_2', \varepsilon_1'', \varepsilon_2''$ — граничні значення спектральної випромінювальної здатності об'єкта на двох довжинах хвиль, відповідно при T' й T'' ;

$S_{Я1}(T', \lambda_1, \varepsilon_1')$, $S_{Я1}(T'', \lambda_1, \varepsilon_1'')$, К — граничні значення умовної яскравісної температури на λ_1 ;

$S_{CB}(T', \lambda_1, \varepsilon_1'/\varepsilon_2')$, $S_{CB}(T'', \lambda_1, \varepsilon_1''/\varepsilon_2'')$, К — граничні значення умовної температури спектрального відношення на λ_1 й λ_2 .

Замість явно заданих значень спектральної випромінювальної здатності та довжин хвиль використано зміщення Δ або коефіцієнти корекції К й А. Як видно з табл. 3, для обчислення останніх, необхідно виконати по два вимірювання термодинамічної та умовних температур, які є граничними для технологічного процесу плавки.

Методи ТВ за п. 4, рис. 1 (табл. 4) було розроблено, виходячи з апіорної інформації про наявність

у об'єкта вимірювання функціонального зв'язку між значеннями спектральної випромінювальної здатності на двох довжинах хвиль. Як правило, такий зв'язок обумовлений трансформацією поверхні об'єкта (утворення нової фази, зміна хімічного складу, мікрогеометрії) під впливом температури в ході певного технологічного процесу.

Танака, О'хіра й Де Бітт (Tanaka, Ohira й DeWitt, Японія—США) запропонували оригінальний метод TRACE (Thermometry Reestablished by Automatic Compensation of Emissivity, п. 4.1 на рис. 1) для вимірювання температури сталевієї полоси при її цинкуванні [18—19], за температури 700...800 К. Особливістю є те, що $\varepsilon_1(\varepsilon_2)$ може бути довільною неперервною функцією, заданою аналітично. Це зручно з точки зору адаптації методу до різних об'єктів металургії, в тому числі металевих сплавів

Умовні температури та коригуючі параметри для методів за п. 1.3, рис. 1 [5, 14, 26—30]

Метод ТВ	Рівняння вимірювання умовної двокольорової температури за двома яскравісними	Формула коригуючого параметра В
1.3.1.1	$S_{ECT} = \frac{1}{\frac{\lambda_2^{\alpha+1}}{\lambda_2^{\alpha+1} - \lambda_1^{\alpha+1}} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1^{\alpha+1}}{\lambda_1^{\alpha+1} - \lambda_2^{\alpha+1}} \cdot \frac{1}{S_{Я2}}}$	$\alpha \equiv B_{ECT} = var$ для будь-яких $\varepsilon(\lambda) = \exp(a \cdot \lambda^\alpha)$
1.3.1.2		$\alpha \equiv B_{ECT} = 2$ для $\varepsilon(\lambda) = \exp(a \cdot \lambda^2)$
1.3.1.3		$\alpha \equiv B_{ECT} = \log_{\lambda_2/\lambda_1} [\ln(\varepsilon_2)/\ln(\varepsilon_1)]$ для будь-яких ε_2 й ε_1
1.3.2.1	$S_{CT} = \frac{1}{\frac{B_{CT}}{C_2} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}}}$	$\alpha \equiv B_{CT} = var$ для будь-яких $\varepsilon(\lambda) = a \cdot \lambda^{-\alpha}$
1.3.2.2		$\alpha \equiv B_{CT} = \log_{\lambda_2/\lambda_1} (\varepsilon_1/\varepsilon_2)$ для будь-яких ε_2 й ε_1
1.3.3	$S_{CT(1)} = 1 / \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1 \cdot B_{CT(1)}}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1 \cdot (1 - B_{CT(1)})}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}} \right)$	$B_{CT(1)} = [\ln(\varepsilon_1) - \ln(\varepsilon_2)] / [(\lambda_1/\lambda_2) \cdot \ln(\varepsilon_1) - \ln(\varepsilon_2)]$
1.3.4	$S_{CT(11)} = 1 / \left[\left(1 + \frac{\lambda_1 \cdot B_{CT(11)}}{\lambda_2} \right) \cdot \frac{1}{S_{Я1}} - \frac{\lambda_1 \cdot B_{CT(11)}}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}} \right]$	$B_{CT(11)} = \ln(\varepsilon_1) / [\ln(\varepsilon_2) - (\lambda_1/\lambda_2) \cdot \ln(\varepsilon_1)]$
1.3.5	$S_{ДЯВК} = 1 / \left[\frac{B_{ДЯВК} \cdot \lambda_2}{B_{ДЯВК} \cdot \lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - B_{ДЯВК} \cdot \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}} \right]$	$B_{ДЯВК} = \ln(\varepsilon_2) / \ln(\varepsilon_1)$
1.3.6	$S_{CB(F)} = 1 / \left[\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left(\frac{1 - B_F \cdot \lambda_1}{\lambda_1 \cdot S_{Я1}} - \frac{1 - B_F \cdot \lambda_2}{\lambda_2 \cdot S_{Я2}} \right) \right]$	$B_F = -\ln\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) / [\lambda_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) - \lambda_1 \cdot \ln(\varepsilon_1)]$
1.3.7	$S_{SR} = 1 / \left[(1 - B_{SR}) \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}} \right) + \frac{B_{SR}}{S_{Я2}} \right]$	$B_{SR} = \frac{-1}{\lambda_1 / [(\lambda_1 \cdot \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1)] \cdot (1 - \ln(\varepsilon_2) / \ln(\varepsilon_1))} - 1$
1.3.8	$S_{LSR} = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1 - B_{LSR} \cdot \lambda_2) \cdot S_{Я1} \cdot S_{Я2} + B_{LSR} \cdot \lambda_2 \cdot S_{Я2}^2}{\lambda_2 \cdot S_{Я2} - \lambda_1 \cdot S_{Я1}}$	$B_{LSR} = \frac{\lambda_1 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_1) - \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T_H \cdot \ln(\varepsilon_1) \cdot \ln(\varepsilon_2)}{[-\lambda_1 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T_H \cdot \ln(\varepsilon_2) - \lambda_2 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T_H \cdot \ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2) \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_1) - \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T_H \cdot \ln(\varepsilon_1) \cdot \ln(\varepsilon_2)] - \frac{-\lambda_1 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T_H \cdot \ln^2(\varepsilon_2)}{[-\lambda_1 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T_H \cdot \ln(\varepsilon_2) - \lambda_2 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T_H \cdot \ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2) \cdot \ln(\varepsilon_2) + \lambda_1 \cdot C_2 \cdot \ln(\varepsilon_1) - \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot T_H \cdot \ln(\varepsilon_1) \cdot \ln(\varepsilon_2)]}}$ де T_H — температура, прийнята при калібруванні
1.3.9	$S_{ДК} = 2 / \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}} + \frac{1}{B_{ДК}} \right)$	$B_{ДК} = \frac{S_{Я2} \cdot \ln(\varepsilon_2) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) + C_2}{\lambda_1 \cdot S_{Я2} \cdot C_2} + \frac{S_{Я1} \cdot \ln(\varepsilon_1) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2}{\lambda_2 \cdot S_{Я1} \cdot C_2}$

в рідкій фазі. Спираючись на результати досліджень Д.Я. Света (D.Ya. Svet) та О.І. Бельського [31] можна стверджувати, що монотонна залежність виду, наприклад, $\varepsilon_1(\varepsilon_2)$ має місце й при поверхневому окисленні розплавів чавуну та сталі.

Якщо $\varepsilon_1(\varepsilon_2)$ — степенева функція, то узагальнюючу модель вимірювання (4) можна перетворити на рівняння відносно шуканої температури об'єкта (метод ТВ за п. 4.2, рис. 1). Меткалф (Metcalf) з корпорації Land Infrared (нині AMETEK Land, Великобританія) експериментально встановив, що

така залежність справедлива для оцинкованої сталі й деяких алюмінієвих сплавів в ході гарячої прокатки [20, 21]. Саме наявність степеневі $\varepsilon_1(\varepsilon_2)$ уможливило розрахунок коефіцієнтів корекції за лінійним методом найменших квадратів. Коректність застосування для залізовуглецевих розплавів такої $\varepsilon_1(\varepsilon_2)$ потребує перевірки.

Узагальнюючи, можна сказати, що для адекватного застосування описаних вище методів ТВ необхідна наступна апіорна інформація про об'єкт вимірювання, представлена у вигляді:

Таблиця 3

Умовні температури та коригуючі параметри для методів за п. 2–3, рис. 1 [15, 16]

Метод ТВ	Базова умовна температура	Коригуючий параметр
2.1	$S_{Я1}$	$\Delta_{Я1} = T_H - S_{Я1}(T_H, \lambda_1, \varepsilon_1)$, де $T_H = (T' + T'')/2$.
2.2	S_{CB}	$\Delta_{CB} = T_H - S_{CB}(T_H, \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon_1/\varepsilon_2)$, де $T_H = (T' + T'')/2$
3.1	$S_{Я1}$	$K_{Я1} = [T' - T'']/[S'_{Я1}(T', \lambda_1, \varepsilon'_1) - S''_{Я1}(T'', \lambda_1, \varepsilon''_1)]$, $A_{Я1} = \pm[T'' - K_{Я1} \cdot S''_{Я1}(T'', \lambda_1, \varepsilon''_1)] = \pm[T' - K_{Я1} \cdot S'_{Я1}(T', \lambda_1, \varepsilon'_1)]$
3.2	S_{CB}	$K_{CB} = [T' - T'']/[S'_{CB}(T', \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon'_1/\varepsilon'_2) - S''_{CB}(T'', \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon''_1/\varepsilon''_2)]$, $A_{CB} = \pm[T'' - K_{CB} \cdot S''_{CB}(T'', \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon''_1/\varepsilon''_2)] = \pm[T' - K_{CB} \cdot S'_{CB}(T', \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon'_1/\varepsilon'_2)]$

Таблиця 4

Моделі вимірювань методів ТВ за п. 4, рис. 1 [18–21]

Метод ТВ	Вхідні величини	Модель вимірювання
4.1	$S_{Я1}, S_{Я2}, \lambda_1, \lambda_2, \varepsilon_1(A)$, де $\varepsilon_1(A)$ — довільна, $A = \exp\left[\frac{C_2}{\lambda_2} \cdot \left(\frac{1}{T_{TB}} - \frac{1}{S_{Я2}}\right)\right] \equiv \varepsilon_2$.	$\varepsilon_1(A) - \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_1} \cdot \left(\frac{1}{T_{TB}} - \frac{1}{S_{Я1}}\right)\right) = 0$.
4.2	$S_{Я1}, S_{Я2}, K, A$, де K й A , для лінійної залежності $1/T - 1/S_{Я1} = K \cdot (1/S_{Я1} - 1/S_{Я2}) + A$, визначають методом найменших квадратів при калібруванні на об'єкті	$T_{TB} = \frac{S_{Я1} \cdot S_{Я2}}{(K + 1) \cdot S_{Я2} - K \cdot S_{Я1} + A \cdot S_{Я1} \cdot S_{Я2}}$.

— оцінок ε_1 й ε_2 (методи за п. 1.1, 1.3), а також температури T_H при калібруванні (метод за п. 1.3.8);

— твердження про деяку нелінійну $\varepsilon_1=f(\varepsilon_2)$, за якої поправка до обраної умовної температури є лінійною функцією J_{21} (методи за п. 1.2);

— твердження про $\varepsilon_1 = \text{const}$ чи $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \text{const}$ (методи за п. 2);

— твердження про лінійну $\varepsilon_1=f(T)$ або $\varepsilon_1/\varepsilon_2=f(T)$ (методи за п. 3);

— аналітично заданої $\varepsilon_1=f(\varepsilon_2)$ на областях $[\varepsilon'_1 \dots \varepsilon''_1]$ й $[\varepsilon'_2 \dots \varepsilon''_2]$ (методи за п. 4).

Як бачимо, методи ТВ за п. 1.2, 2–4, рис. 1, накладають жорсткі обмеження на характер змін $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта вимірювання, що обмежує область їх адекватної застосовності. Тому, на думку автора, найбільш універсальними слід визнати ті методи, моделі вимірювань яких містять лише оцінки (ε_1 та/або ε_2) спектральної випромінювальної здатності й вільні від будь-яких апіорі заданих співвідношень між останніми. Такими є методи за п. 1.1, 1.3, рис. 1, які до того ж характеризуються однаковим набором вхідних величин в моделях вимірювань. Це спрощує аналіз невизначеностей за типом В. Звичайно, при цьому також важливим є раціональний вибір довжини хвиль, які у випадку температур, характерних для залізобутуєвих розплавів (1473...1923 К), мають розташовуватись на стику видимої та ближньої інфрачервоної ділянок спектра, з урахуванням «вікон

прозорості» атмосфери.

Оскільки рівняння вимірювань згаданих методів ТВ містять значення $\varepsilon(\lambda)$ в явному вигляді, останні можливо як задавати фіксованими на основі попередніх знань про об'єкт [5, 17, 32, 33], так і визначати «in situ» (безпосередньо на ньому) в режимі реального часу, за допомогою сторонніх методів. Практичний досвід промислової термометрії показав, що за умов суттєво нестабільної $\varepsilon(\lambda)$ залізобутуєвих розплавів, використання фіксованих усереднених оцінок останньої не є вдалим рішенням. Наприклад, при апіорному усередненому налаштуванні з параметрами корекції $\varepsilon_{cp}=(\varepsilon_1+\varepsilon_2)/2=0,417$, $Kc=\varepsilon_1/\varepsilon_2=1,093$ ($\lambda_1=700$ нм, $\lambda_2=900$ нм), заданими з граничними похибками $\Delta\varepsilon_{cp}=\pm 0,1$, $\Delta Kc=\pm 0,093$, границя відносної методичної складової похибки вимірювання температури розплаву з $T=1600$ К методами ТВ за п. 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3 й 1.3.9 складе $\pm 2,2\%$, $\pm 2,9\%$, $\pm 3,0\%$ й $\pm 2,3\%$ відповідно ($P_{дов}=1$) [33]. В реальних умовах плавки сірого чавуну в індукційних тигельних печах граничні похибки фіксованих параметрів корекції будуть в 3–4 рази вищими [15]. Звичайно, можливе застосування тепловізорів [34, 35] для виокремлення областей (в полі візування), які відповідають чистій поверхні розплаву, з апіорі відомою випромінювальною здатністю, але такий підхід суттєво дорожчий порівняно з використанням термометрів випромінення. У зв'язку з цим надзви-

чайно актуальним є оцінювання поточних значень ефективної $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта в полі візування термометра випромінювання, поєднане в часі з самою процедурою вимірювання температури. Така корекція для вищеперелічених методів ТВ має бути найбільш метрологічно ефективною при температурному контролі об'єктів зі змінною протягом технологічного процесу $\varepsilon(\lambda)$, в тому числі залізовуглецевих розплавів. Причому, серед різноманіття існуючих методів оцінювання $\varepsilon(\lambda)$ [36] тут застосовні ли-

ше ті, які ґрунтуються на вимірюванні характеристик власного чи відбитого випромінювання об'єкта й, звичайно, не вимагають попередньої оцінки його термодинамічної температури. Методи вимірювання спектральної випромінювальної здатності, які задовольняють переліченим вимогам, представлено на рис. 2.

Активні методи (п. 1, рис. 2) вимагають стороннього джерела випромінювання. Перший метод (рефлектометрія) [5, 17, 37] ґрунтується на

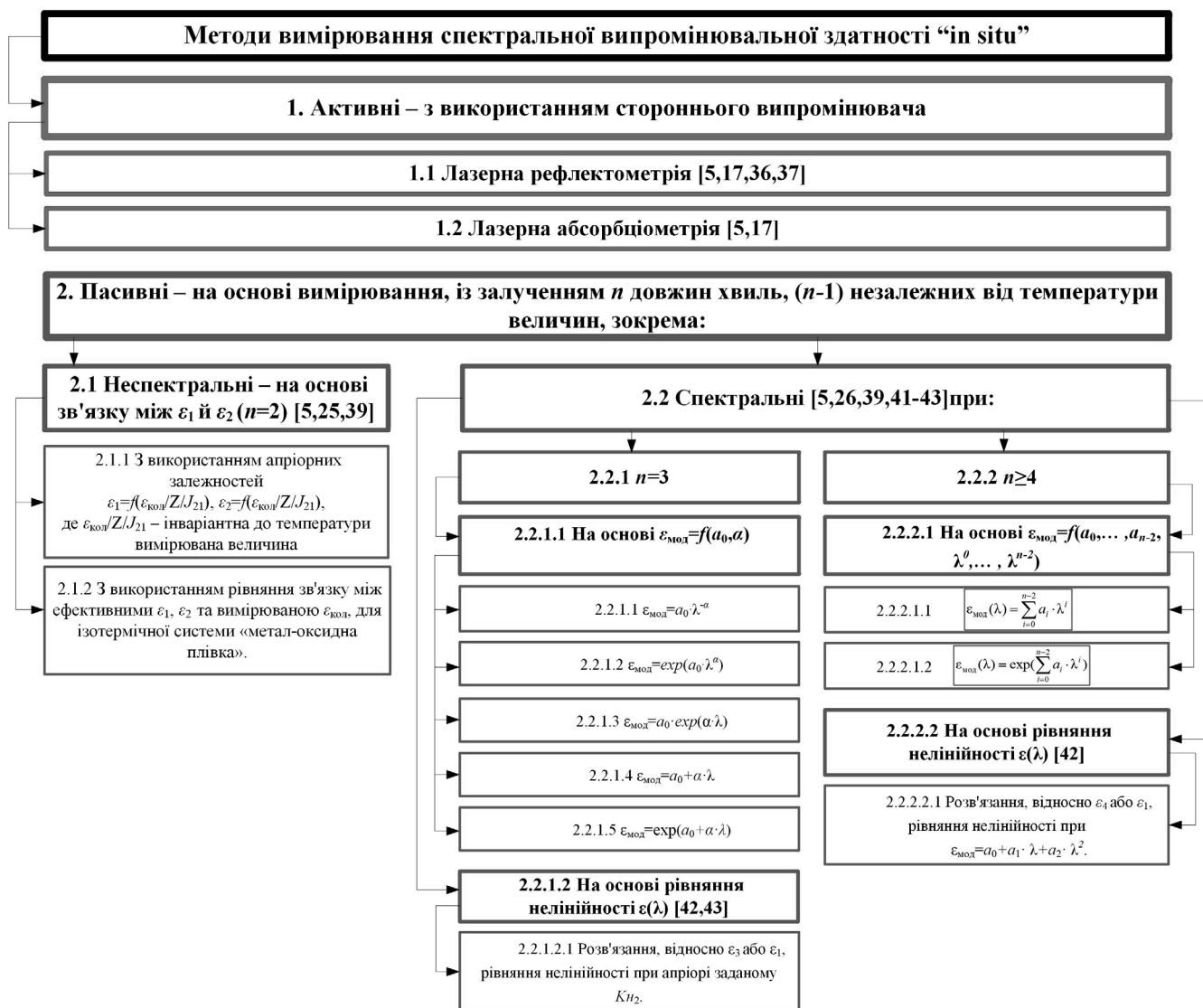


Рис. 2.

Безконтактні методи вимірювання $\varepsilon(\lambda)$ "in situ", для корекції методів ТВ в реальному часі

визначенні спектрального коефіцієнта відбивання непрозорого об'єкта шляхом вимірювання відношення, для заданої довжини хвилі, відбитого об'єктом потоку випромінювання до того, яким було його опромінено. Якщо мова йде про монохроматичний коефіцієнт відбивання, в якості стороннього джерела випромінювання використовують лазер. При цьому, у випадку недзеркальної поверхні тіла, що характерно для частково вкритих оксидними плівками поверхонь металевих розплавів, вимірювання спрямовано-напівсферичного спектрального коефіцієнта відбивання ускладнене необхідністю реєстрації повного потоку відбитого випромінювання [5]. Першість в

плані технічної реалізації цього методу вимірювання випромінювальної здатності в комплексі з одно- й двокольоровою ТВ належить фахівцям компанії Pyrometer Instrument Company (США). Вже 1987 р. на ринку з'явився портативний термометр випромінювання Pyrolaser з лазерною системою вимірювання $\varepsilon(\lambda)$ [38], а сьогодні компанія пропонує широкую лінійку приладів для застосування в різних галузях промисловості, включаючи ливарне виробництво.

Другий метод (лазерна абсорбціометрія на двох/ трьох довжинах хвиль, запропонована 1972 р. Кунцем й Де Віттом (Kunz, DeWitt)) [5, 17], полягає в вимірюванні спектрального коефіцієнта поглинан-

ня тіла, який, згідно з законом Кірхгофа (Kirchoff), дорівнює спектральній випромінювальній здатності. З цією метою поверхню об'єкта нагрівають модульованим потоком лазерного випромінення. В результаті об'єкт стає джерелом модульованого потоку, в якому знаходиться інформація про шукане відношення значень спектральної випромінювальної здатності на двох довжинах хвиль. Проте, технічна реалізація цього методу набагато складніша, ніж попереднього. Незважаючи на серію експериментальних випробувань на сталеливарному заводі [17], комерційно доступна термометрична система для реалізації цього методу досі відсутня.

На відміну від попередніх, пасивні методи (п. 2, рис. 2) використовують лише власне випромінення об'єкта, а тому не вимагають дорогих джерел стороннього монохроматичного випромінення й пов'язаних з ними допоміжних оптичних пристроїв. Це робить їх найбільш реальними кандидатами для використання в складних умовах металургійного виробництва. Пасивні методи ґрунтуються на вимірюванні величин, які в явному вигляді не залежать від T об'єкта і визначаються лише значеннями спектральної випромінювальної здатності на двох чи більше довжинах хвиль. У випадку двох довжин хвиль й апроксимації СГЕЯ розжареного об'єкта за Віном, першою такою величиною була колірна випромінювальна здатність $\varepsilon_{\text{кол}} = f(C_2, \lambda_1, \lambda_2, S_{\lambda_1}, S_{\lambda_2})$ [5], визначена Вортингом (Worthing) 1919 р. Згодом Д.Я. Свет запропонував й інші: відношення Z двох значень СГЕЯ, піднесених до степенів, рівних відповідним довжинам хвиль [25, 39] та температурний інваріант J_{21} [25, 26], які функціонально пов'язані з $\varepsilon_{\text{кол}}$. Перейти від згаданих величин до ε_1 й ε_2 без будь-якої апріорної інформації принципово неможливо внаслідок багатозначності — одному значенню незалежної від температури величини відповідає нескінченна множина пар $(\varepsilon_1; \varepsilon_2)$. Наприклад, в цьому можна переконатися, аналізуючи формулу $\varepsilon_{\text{кол}} = (\varepsilon_1^{\lambda_1} / \varepsilon_2^{\lambda_2})^{\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}}$ [5]. Відповідно, необхідно вводити додатковий зв'язок між ε_1 й ε_2 . Для методів за п. 2.1 він представлений неперервною монотонною залежністю, наприклад, виду $\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2)$, попередньо встановленою для конкретного об'єкта. Цей факт загалом обумовлює існування неперервних монотонних залежностей виду $\varepsilon_{\text{кол}} = f(\varepsilon_1)$, $\varepsilon_{\text{кол}} = f(\varepsilon_2)$, $Z = f(\varepsilon_1)$, $Z = f(\varepsilon_2)$, $J_{21} = f(\varepsilon_1)$, $J_{21} = f(\varepsilon_2)$. Відповідно, вимірявши на об'єкті будь-яку з цих величин та використовуючи згадані залежності, можливо перейти до поточних значень $\varepsilon(\lambda)$ на відповідних довжинах хвиль (метод за п. 2.1.1, рис. 2) або, що по суті теж саме, до поправки $\Delta_{1K,2K}$ до обраної умовної температури. Вперше автоматичну корекцію на основі залежності поправок до «класичних» й взаємнокореляційної умовних температур від вимірюваного J_{21} було реалізовано Д.Я. Светом в пірометрах істинної температури ПІТ для вимірювання температури розплавів чавунів та сталей [31, 39, 40]. У випадку залізобіагцевих розплавів ефективна $\varepsilon(\lambda)$ ізотермічної поверхні розплаву в полі візування термометра випромінення визначається ступенем

N перекриття непрозорою оксидною плівкою/шлаком чистої металевої поверхні, що було експериментально підтверджено для чавуну на випуску з доменної печі [31] та сталі в електричних печах [40]. Спираючись на це, можна визначати ефективну випромінювальну здатність такої поверхні без залучення згаданих залежностей. Зокрема, значення ε_{ef1} й ε_{ef2} ефективної випромінювальної здатності поверхні на двох довжинах хвиль пов'язані з вимірюваною $\varepsilon_{\text{кол}}$ цієї ж поверхні наступним чином (метод за п. 2.1.2, рис. 2):

$$\left\{ \frac{[\varepsilon_{\text{ef1}}]^{\lambda_1}}{[\varepsilon_{\text{ef2}}]^{\lambda_2}} \right\}^{\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}} = \left\{ \frac{[\varepsilon_{1M} + N \cdot (\varepsilon_{1П} - \varepsilon_{1M})]^{\lambda_1}}{[\varepsilon_{2M} + N \cdot (\varepsilon_{2П} - \varepsilon_{2M})]^{\lambda_2}} \right\}^{\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}} = \varepsilon_{\text{кол}}, \quad (5)$$

де $\varepsilon_{1M}, \varepsilon_{2M}, \varepsilon_{1П}, \varepsilon_{2П}$ — апріорі задані значення спектральної випромінювальної здатності на двох довжинах хвиль для чистої металевої поверхні й плівки, відповідно.

N можна визначати як чисельно (методом простої ітерації або послідовного перебору коренів), так й за аналітичною формулою, для отримання якої слід розкласти вирази для ефективних випромінювальних здатностей в лівій частині рівняння (5) в біноміальний ряд Ньютона (для дійсного показника степеню) й обмежитися першими двома членами.

Слід зазначити, що існують деякі нелінійні $\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2)$ (приклад однієї з таких залежностей наведено в роботі [33]), за яких інваріантні до температури величини взагалі лишаються константами та побудовані на їх основі методи вимірювання випромінювальної здатності втрачають сенс. Цей факт потребує перевірки для кожного конкретного об'єкта температурного контролю.

В основі другої групи методів (п. 2.2, рис. 2) [5, 26, 41—43] лежить апроксимація $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта вимірювання деякою модельною функцією $\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda)$ з невідомими коефіцієнтами. При цьому аналітичний опис $\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda)$ обирають з урахуванням кількості n довжин хвиль, яка має перевищувати кількість невідомих коефіцієнтів щонайменше на одиницю. Останні обчислюють шляхом розв'язання системи з $(n-1)$ рівнянь, в яку входить $(n-1)$ інваріантна до температури вимірювана величина, виражена через n умовних яскравісних температур (або значень СГЕЯ) та довжин хвиль. Дещо відрізняються методи за п. 2.2.1.2 й 2.2.2.2, рис. 2, в основі яких лежить рівняння нелінійності $\varepsilon(\lambda)$ [42, 43]. Останнє, при $n = 3$, вимагає задання коефіцієнта нелінійності K_{N_2} й області розташування шуканого розв'язку (оскільки може мати до 3 розв'язків [42]). Рівняння розв'язується чисельно відносно значення спектральної випромінювальної здатності на одній з граничних довжин хвиль. При $n = 4$ й заданій параболічній $\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda)$, K_{N_2} теж визначають чисельно [43]. Якщо критерій відповідності виконується, K_{N_2} знайдено й «автоматично» обчислюються значення спектральної випромінювальної здатності на всіх довжинах хвиль. Загалом рівняння нелінійності, при $n \geq 4$ та модифікації критерію відповідності, дозволяє

використовувати в якості $\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda)$ алгебраїчні або експоненційні поліноми степеню $n-2$.

Критично важливим у випадку спектральних методів є коректний вибір $\varepsilon_{\text{мод}}(\lambda)$ або числового значення K_{H_2} . При неправильному виборі виникатиме невідома систематична методична похибка, виявити яку можливо лише шляхом порівняльних багаторазових вимірювань на об'єкті.

Зважаючи на різноманіття методів оцінювання $\varepsilon(\lambda)$ й власне термометрії випромінювання, було б добре їх оптимально поєднувати з метою зниження невизначеності вимірювання температури. Зокрема, висновок про те, що для підвищення точності безконтактної термометрії алюмінієвих сплавів необхідно удосконалювати «компенсаційні алгоритми» оцінювання $\varepsilon(\lambda)$, зроблено в роботі [14]. Ідею оптимального вибору методу ТВ «залежно від умов вимірювання та властивостей об'єкта» зустрічаємо в роботі [44].

З виконаного аналізу впливає концепція підвищення точності безконтактного вимірювання температури об'єктів металургії, в тому числі розплавів. Вона передбачає:

— мінімізацію невизначеностей оцінок $\varepsilon(\lambda)$ в рівняннях вимірювань методів ТВ, що досягається раціональним вибором методу вимірювання $\varepsilon(\lambda)$ за критерієм мінімальних методичної (максимальна відповідність об'єкту) та інструментальної складових невизначеності;

— мінімізацію коефіцієнта трансформації невизначеностей вимірювань вхідних величин в невизначеність результату вимірювання температури, за рахунок вибору відповідного методу ТВ.

В рамках реалізації концепції, метрологічного аналізу (оцінювання невизначеностей за типом В) потребують методи ТВ за п. 1.1, 1.3, рис. 1. Також, за умов, релевантних характеру змін $\varepsilon(\lambda)$ залізуглецевих розплавів в промислових умовах, необхідно оцінити невизначеності вимірювання спектральної випромінювальної здатності пасивними методами за п. 2.1, 2.2.1, рис. 2 (методи за п. 2.2.2 розглядати не варто через апріорно вищий коефіцієнт трансформації невизначеностей оцінок вхідних величин в невизначеність результату вимірювання). За результатами аналізу мають бути розроблені рекомендації щодо вибору методу ТВ, а також методу вимірювання $\varepsilon(\lambda)$, поєднання яких гарантуватиме мінімально можливу невизначеність вимірювання температури за умов, релевантних конкретним об'єктам металургії, в тому числі, залізуглецевим розплавом, при заданих метрологічних характеристиках термометричної системи.

Висновки

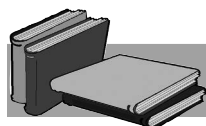
Спираючись на моделі вимірювань термодинамічної температури, систематизовано методи монохроматичної одно- й двокольорової термометрії випромінювання з корекцією на випромінювальну здатність об'єкта, які застосовні, в тому числі, для контролю температури мета-

лех розплавів в металургії. Встановлено, що виявлені 25 методів підпадають під 4 узагальнюючі моделі вимірювань температури, які містять умовні одно- й двокольорові температури й різноманітні параметри корекції для врахування спектральної випромінювальної здатності «нечорного» об'єкта.

Найбільш численною (19 методів) є 1 підгрупа, яка базується на узагальнюючому рівнянні вимірювання, яке витікає з формули Віна для спектральної густини енергетичної яскравості об'єкта. Воно містить умовну одно- чи двокольорову температуру та відповідну поправку. Показано, що 15 методів 1 підгрупи використовують однаковий набір вхідних величин, до якого входять умовні яскравісні температури, довжини хвиль та відповідні значення спектральної випромінювальної здатності. Узагальнюючі моделі вимірювання для решти 3 підгруп методів є емпіричними або ж ґрунтуються на апріорних залежностях між значеннями спектральної випромінювальної здатності на двох довжинах хвиль, що обмежує область їх адекватної застосовності.

Обґрунтовано, що найбільш універсальними слід вважати ті методи термометрії, які використовують значення спектральної випромінювальної здатності в явному вигляді. Це пояснюється тим, що оцінки останніх можуть бути як апріорними фіксованими, так і отримуватися безпосередньо на об'єкті сторонніми методами одночасно з процедурою вимірювання температури. У випадку об'єктів з суттєво нестабільною випромінювальною здатністю, до яких належать залізуглецеві розплави, фіксована корекція обумовлює неприпустимо високу методичну складову невизначеності вимірювання температури. Проаналізовано методи вимірювання випромінювальної здатності "in situ", які підходять для корекції відповідних методів термометрії в режимі реального часу. Враховуючи специфіку металургійного виробництва, найбільш прийнятними, з точки зору вартості й складності технічної реалізації, є пасивні методи. Вони використовують інваріантні до температури об'єкта вимірювані величини й апріорні моделі вимірювання спектральної випромінювальної здатності. Серед останніх найбільш релевантною залізуглецевим розплавом з різним ступенем окислення поверхні можна вважати модель ефективної випромінювальної здатності системи «метал-оксид-на плівка», запропоновану Д.Я. Светом.

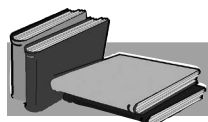
На основі виконаного аналізу, запропоновано двоступеневу концепцію підвищення точності вимірювання температури розплавів. Перший етап передбачає мінімізацію невизначеностей оцінок спектральної випромінювальної здатності шляхом вибору методу вимірювання останньої з мінімальними методичною та інструментальною складовими невизначеності. Другий етап стосується мінімізації невизначеності власне результату вимірювання температури за рахунок вибору методу термометрії випромінювання з мінімальним коефіцієнтом трансформації невизначеностей оцінок вхідних величин в невизначеність результату вимірювання температури.



ЛІТЕРАТУРА

1. Жуков Л.Ф., Гончаров А.Л., Петренко Д.А., Захарченко Э.В., Сиренко Е.А. Инновационные технологии экспрессного контроля температуры и химического состава железоуглеродистых сплавов. *Метал та лиття України*. 2018. Т. 26. № 11–12(306–307). С. 43–53.
2. Жуков Л.Ф. и др. Разработать физические основы, методы и средства комплексного контроля и управления непрерывными процессами получения, обработки и разлива жидкого металла: отчет о НИР № 0104U007860 (закл.) / ФТИМС НАН Украины; рук. Л.Ф. Жуков; отв. исп. А.В. Богдан, М.И. Смирнов. Киев: ФТИМС НАНУ, 2008. 299 с.
3. Zakharchenko E., Sirenko K., Goncharov A., Bogdan A., Burbelko A., Kawalec M. New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality of Melts and Castings. *Journal of Casting and Materials Engineering*. 2019. Vol. 3. No. 2. P. 31–42. <https://doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.31>
4. Сиренко К.А., Дереча Д.О., Мазур В.Л. Застосування методу Монте-Карло в розрахунках шихти й регулюванні хімічного складу чавуну в процесі його виплавлення. *Процеси лиття*. 2023. №4 (154). С. 44–57. <https://doi.org/10.15407/plit2023.04.044>
5. Снопко В.Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения. Минск: Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, 1999. 224 с.
6. Yamada Y. The Latest Trends in Temperature Measurement Technology in Japan and Abroad. *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*. 1998. Vol. 37. No. 3. P. 195–200. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicej1962/37/3/37_3_195/_pdf-char/en (in Japanese) (дата звернення: 31.01.2026).
7. Isei Y. Recent Progress of Instrumentation Technology for Process Automation in Steel Industry. *Tetsu-to-Hagane*. 2020. Vol. 106. Iss. 9. P. 591–601. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-014> (in Japanese).
8. Жуков Л.Ф., Богдан О.В. Дослідження і розробка методів спектрально-компенсаційної багатокольорової пірометрії випромінювання поверхні заготовки під кристалізатором. *Металознавство та обробка металів*. 2003. № 3. С. 56–60.
9. Жуков Л.Ф., Корниенко А.Л., Богдан А.В., Крупник В.М., Крупник Л.В., Писаренко В.Г., Костановский В.В. Инновационные технологии многоцветовой термометрии. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2012. № 73. С. 45–51.
10. Жуков Л.Ф., Корниенко А.Л. Симметрично-волновая многоцветовая термометрия металлургических объектов с неизвестной и случайно изменяющейся излучательной способностью. *Метал та лиття України*. 2012. № 11. С. 36–40.
11. Жуков Л.Ф., Корниенко А.Л. Исследование инструментальных погрешностей многоцветовой симметрично-волновой термометрии металлических сплавов. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація»*. 2014. № 795. С. 7–16.
12. Multi-Wavelength Technology. URL: <https://www.williamsonir.com/multi-wavelength-pyrometers/> (дата звернення: 20.02.2026).
13. Петренко Д.О. Методи монохроматичної одно- й двокольорової термометрії випромінення розплавів в металургії. Частина 1. *Метал та лиття України*. 2025. Т. 33. № 3–4(342–343). С. 8–19. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.008>
14. Tsai B.K., Shoemaker R.L., DeWitt D.P., Cowans B.A., Dardas Z., Delgass W.N., Dail G.J. Dual-wavelength radiation thermometry: emissivity compensation algorithms. *International Journal of Thermophysics*. 1990. Vol. 11. Iss. 1. P. 269–281. <https://doi.org/10.1007/BF00503877>
15. Жуков Л.Ф. Исследование и разработка методов и средств температурного контроля и ресурсосберегающих технологических процессов получения жидкого чугуна в литейном производстве: автореф. дисс. д-ра. техн. наук: 05.11.04, 05.16.04. Киев, Институт проблем литья АН Украины, 1992. 32 с.
16. Жуков Л.Ф., Кучаев А.А. Введение температурной поправки в показания пирометра установки непрерывного контроля температуры жидкого металла при моделировании теплотехнических процессов. *Электронное моделирование*. 1992. Т. 14. № 2. С. 26–27.
17. Iuchi T., Yamada Y., Sugiura M., Torao A. Thermometry in Steel Production. *Radiometric Temperature Measurements II. Applications* / ed. by Z.M. Zhang, B.K. Tsai, G. Machin. London, 2010. P. 217–279.
18. Tanaka F., DeWitt D.P. Theory of New Radiation Thermometry Method and an Experimental Study Using Galvannealed Steel Specimens. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*. 1989. Vol. 25. No. 10. P. 1031–1037. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicetr1965/25/10/25_10_1031/_pdf-char/en (дата звернення: 20.02.2026).
19. Tanaka F., Ohira H. Thermometry Reestablished by Automatic Compensation of Emissivity – the TRACE Method. *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*. Vol. 6 / ed. by J.F. Schooley. New York, 1992. P. 895–900.
20. Metcalfe S.F., Tune A.D., Beynon T. Dual Wavelength Thermometry applied to Hot Rolling of Aluminium and Galvannealing of Steel. *Proc. XIII IMEKO World Congress* / ed. by A. Bray et al. Torino, 1994. P. 1445–1450.
21. Metcalfe S.F. Practical Temperature Measurement of Aluminium Bright Strip using Dual Wavelength Infrared Thermometry. *Proc. TEMPMEKO-1993, 5-th Int. Symp. on Temperature and Thermal Measurement in Industry and Science* / ed. by B. Frank. Prague, 1993. P. 133–144.
22. JCGM 200:2012 (E/F). International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd edition. JCGM, 2012. 108 p. <https://doi.org/10.59161/JCGM200-2012>

23. Petrenko D., Hotra O. Uncertainty budget of temperature measurement by the methods of monochromatic one- and two-color thermometry with emissivity correction. *Measuring Equipment and Metrology*. 2025. Vol. 86. No. 2. P. 18—26. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.02.018>
24. Markin M.O., Markina O.M., Kyshchovy S.M. Measurement of Temperature of Molten Zone at the Directional Crystallization of Blades of the Gas-Turbine Engine. *Progress in Physics of Metals*. 2017. Vol. 18. Iss. 2. P. 141—154. <https://doi.org/10.15407/ufm.18.02.141>
25. Svet D.Ya. Optimal utilization of redundant information in thermal radiation in thermophysical measurements. *High Temperatures—High Pressures*. 1972. Vol. 4. No. 6. P. 715—722.
26. Svet D.Ya. Determination of the emissivity of a substance from the spectrum of its thermal radiation and optimal methods of optical pyrometry. *High Temperatures—High Pressures*. 1976. Vol. 8. No. 5. P. 493—498.
27. Geda Ya.M., Snopko V.N. Methods of bichromatic pyrometry. *High Temperature*. 1981. Vol. 19. No. 6. P. 912—916.
28. Madura H., Piatkowski T. Emissivity compensation algorithms in double-band pyrometry. *Infrared Physics & Technology*. 2004. Vol. 46. Iss. 1–2. P. 185—189. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.024>
29. Foley G.M. Modification of emissivity response of two-color pyrometer. *High Temperatures—High Pressures*. 1978. Vol. 10. No. 4. P. 391—398.
30. Anderson A.S. Accurate noncontact temperature measurement of aluminum surfaces improved radiometer for temperature measuring of the aluminum surface. *Proc. IMEKO TC12 Symposium on major problems of present-day radiation pyrometry*. Moscow, 1986. P. 94—100.
31. Бельский О.И. Исследование оптимальных методов и систем измерения истинной температуры металлов по излучению: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Днепродзержинск, 1978. 149 с.
32. Спосіб вимірювання температури: пат. 118366 Україна: МПК G01J5/00. № u201613291; заявл. 26.12.2016; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 4 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/792662/> (дата звернення: 20.02.2026).
33. Жуков Л.Ф., Петренко Д.О. Вплив випромінювальних характеристик металевих сплавів на методичні похибки двокольорової компенсаційної та класичної термометрії. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2019. Т. 80. Вип. 3. С. 39—45. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.039>
34. Sugiura M., Shinotake A., Nakashima M., Omoto N. Simultaneous Measurements of Temperature and Iron–Slag Ratio at Baphole of Blast Furnace. *International Journal of Thermophysics*. 2014. Vol. 35. P. 1320—1329. <https://doi.org/10.1007/s10765-014-1708-z>
35. Firago V., Wojcik W. High-temperature three-colour thermal imager. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2015. Vol. 91. No. 2. P. 208—214. <https://doi.org/10.15199/48.2015.02.47>
36. Giulietti N., Cosoli G., Napolitano R., Pandarese G., Revel G.M., Chiariotti P. Spectral emissivity measurement for high-temperature applications: a systematic review. *Acta IMEKO*. 2025. Vol. 14. No. 1. P. 1—17. <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v14i1.1846>
37. Sun Y., Pan J., Jiang L., Hao L., Cao Y., Wang H. Multi-Irradiance: A Method for Simultaneous Measurement of the Temperature and Spectral Emissivity of High-Temperature Targets in SWIR. *Sensors*. 2022. Vol. 22(21), 8469. <https://doi.org/10.3390/s22218469>
38. Dmitriyev A. Laser pyrometry offers practical temperature measurement. *Heat treating progress*. May/June 2005.
39. Method and apparatus for measuring true or actual temperature of bodies by radiant energy: pat. 3537314 USA, MPC G01J 5/60. Appl. No. 628474; applied 31.03.1967; publ. 03.11.1970. 7 p.
40. Svet D.Ya. Some new methods and systems of pyrometry and their application. *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry: Papers presented at the 5-th symposium on temperature, vol. 2* / ed. by H. Plumb. Pittsburg, 1972. P. 587.
41. Wen C.-D., Chr Y.-H. The Assessment of Multispectral Radiation Thermometry Using Linear and Log-Linear Emissivity Models for Steel. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*. 2010. Vol. 58. Iss. 1. P. 40—54. <https://doi.org/10.1080/10407790.2010.504696>
42. Zhukov L.F., Petrenko D.A. Indirect, with Respect to the Nonlinearity Equation, Measurement of the Radiating Capacity and Temperature of Opaque Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2023. Vol. 96. Iss. 1. P. 266—277. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02683-3>
43. Жуков Л.Ф., Петренко Д.О. Методи опосередкованих вимірювань випромінювальної здатності вольфраму і залізвуглецевих сплавів. *Український метрологічний журнал*. 2022. № 1. С. 20—26. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258801>
44. Гоц Н.Є. Аналіз похибок вимірювання температури методами двоканальної термометрії випромінювання. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Комп'ютерні системи та мережі»*. 2010. № 688. С. 83—90.



REFERENCES

1. Zhukov, L. F., Goncharov, A. L., Petrenko, D. A., Zakharchenko, E. V., & Sirenko, K. A. (2018). Innovative technologies of express control of ferrous-carbon alloys temperature and chemical composition. *Metal and Casting of Ukraine*, 26(11–12(306–307)), 43–53 [in Russian].
2. Zhukov, L. F. et al. (2008). Razrabotat fizicheskie osnovy, metody i sredstva kompleksnogo kontrolya i upravleniya nepreryvnymi protsessami polucheniya, obrabotki i razlivki zhidkogo metalla: otchet o NIR No. 0104U007860 (zaklyuch.) [To develop physical bases, methods and means for complex control and operation of continuous processes of obtaining, treatment and casting of liquid metal. (Research report No. 0104U007860)]. PTIMA NAS of Ukraine [in Russian].
3. Zakharchenko, E., Sirenko, K., Goncharov, A., Bogdan, A., Burbelko, A., & Kawalec, M. (2019). New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality of Melts and Castings. *Journal of Casting and Materials Engineering*, 3(2), 31–42. <https://doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.31>
4. Sirenko, K. A., Derecha, D. O., & Mazur, V. L. (2023). Application of the Monte Carlo Method in charge calculations and regulation of the chemical composition of pig iron in the process of its melting. *Casting processes*, 4(154), 44–57. <https://doi.org/10.15407/plit2023.04.044> [in Ukrainian].
5. Snopko, V. N. (1999). Osnovy metodov pirometrii po spektru teplovogo izlucheniya [Fundamentals of pyrometry methods by the spectrum of thermal radiation]. Institute of physics named after B.I. Stepanov NASB [in Russian].
6. Yamada, Y. (1998). The Latest Trends in Temperature Measurement Technology in Japan and Abroad. *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, 37(3), 195–200. https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicej1962/37/3/37_3_195/_pdf/-char/en [in Japanese].
7. Isei, Y. (2020). Recent Progress of Instrumentation Technology for Process Automation in Steel Industry. *Tetsu-to-Hagane*, 106(9), 591–601. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-014> [in Japanese].
8. Zhukov, L. F., & Bogdan, A. V. (2003). Doslidzhennia i rozrobka metodiv spektralno-kompensatsiinoi bahatokolirnoi pirometrii vyprominiuvannia poverkhni zahotovky pid krystalizatorom [Investigation and Development of Methods of Multicolour Radiation Thermometry of the billet under crystallizer]. *Metal Science and Treatment of Metals*, 9(3), 56–60 [in Ukrainian].
9. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L., Bohdan, A. V., Krupnyk, V. M., Krupnyk, L. V., Pysarenko, V. H., & Kostanovskiy, V. V. (2012). Innovatsionnyie tehnologii mnogotsvetovoy termometrii [Innovative technologies of multicolour thermometry]. *Measuring Equipment and Metrology*, (73), 45–51 [in Russian].
10. Zhukov, L. F., & Korniyenko, A. L. (2012). Symmetrical-wave multicolor thermometry of metallurgical objects with unknown and randomly changing emissivity. *Metal and Casting of Ukraine*, (11), 36–40 [in Russian].
11. Zhukov, L. F., & Kornienko, A. L. (2014). Issledovanie instrumentalnykh pogreshnostey mnogotsvetovoy simmetrichno-volnovoy termometrii metallicheskih splavov [Investigation of instrumental errors of multicolor symmetrical-wave thermometry of metal alloys]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", series "Thermal power engineering. Environmental Engineering. Automatization"*, (795), 7–16 [in Russian].
12. Multi-Wavelength Technology. <https://www.williamsonir.com/multi-wavelength-pyrometers/>
13. Petrenko, D. O. (2025). Methods of Monochromatic One- and Two-Color Radiation Thermometry of Melts in Metallurgy. Part 1. *Metal and Casting of Ukraine*, 33(3–4(342–343)), 8–19. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.008> [in Ukrainian].
14. Tsai, B. K., Shoemaker, R. L., DeWitt, D. P., Cowans, B. A., Dardas, Z., Delgass, W. N., & Dail, G. J. (1990). Dual-wavelength radiation thermometry: emissivity compensation algorithms. *International Journal of Thermophysics*, 11(1), 269–281. <https://doi.org/10.1007/BF00503877>
15. Zhukov, L. F. (1992). Issledovanie i razrobotka metodov i sredstv temperaturnogo kontrolya i resursosberegayuschih tehnologicheskikh protsessov polucheniya zhidkogo chuguna v liteynom proizvodstve: avtoref. diss. d-ra. tehn. nauk [Investigation and development of methods and means of temperature control and resource-saving technological processes of liquid cast-iron production in foundry engineering]. Abstract of doctoral thesis, Institute of Foundry Problems of Academy of Sciences of Ukraine. PTIMA NASU [in Russian].
16. Zhukov, L. F., & Kuchaev, A. A. (1992). Vvedenie temperaturnoy popravki v pokazaniya pirometra ustanovki nepreryvnogo kontrolya temperatury zhidkogo metalla pri modelirovanii teploenergeticheskikh protsessov [Introduction of temperature correction into readings of pyrometer of continuous temperature control set of liquid metal in modeling of heat power processes]. *Electronic Modelling*, 14(2), 26–27 [in Russian].
17. Iuchi, T., Yamada, Y., Sugiura, M., & Torao, A. (2010). Thermometry in Steel Production. In Z. M. Zhang, B. K. Tsai, & G. Machin (Eds.), *Radiometric Temperature Measurements II. Applications* (pp. 217–279). Academic Press (Elsevier).
18. Tanaka, F., & DeWitt, D. P. (1989). Theory of New Radiation Thermometry Method and an Experimental Study Using Galvannealed Steel Specimens. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 25(10), 1031–1037. https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicetr1965/25/10/25_10_1031/_pdf/-char/en
19. Tanaka, F., & Ohira, H. (1992). Thermometry Reestablished by Automatic Compensation of Emissivity – the TRACE Method. In F. Schooley (Ed.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry* (pp. 895–900). American Institute of Physics.

20. Metcalfe, S. F., Tune, A. D., & Beynon, T. (1994). Dual Wavelength Thermometry applied to Hot Rolling of Aluminium and Galvannealing of Steel. In *Proc. XIII IMEKO World Congress* (pp. 1445-1450). IMEKO
21. Metcalfe, S. F. (1993). Practical Temperature Measurement of Aluminium Bright Strip using Dual Wavelength Infrared Thermometry. In *Proc. TEMPMEKO 1993, 5-th Int. Symp. on Temperature and Thermal Measurement in Industry and Science* (pp. 133-144). IMEKO
22. Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (VIM): 3-rd edition. (JCGM 200:2012 (E/F)). <https://doi.org/10.59161/JCGM200-2012>
23. Petrenko, D., & Hotra, O. (2025). Uncertainty budget of temperature measurement by the methods of monochromatic one- and two-color thermometry with emissivity correction. *Measuring Equipment and Metrology*, 86(2), 18-26. <https://doi.org/10.23939/istcm2025.02.018>
24. Markin, M. O., Markina, O. M., & Kyshchovyi, S. M. (2017). Measurement of Temperature of Molten Zone at the Directional Crystallization of Blades of the Gas-Turbine Engine. *Progress in Physics of Metals*, 18(2), 141-154. <https://doi.org/10.15407/ufm.18.02.141>
25. Svet, D. Ya (1972). Optimal utilization of redundant information in thermal radiation in thermophysical measurements. *High Temperatures–High Pressures*, 4(6), 715-722.
26. Svet, D.Ya. (1976). Determination of the emissivity of a substance from the spectrum of its thermal radiation and optimal methods of optical pyrometry. *High Temperatures–High Pressures*, 8(5), 493-498.
27. Geda, Ya. M., & Snopko, V. N. (1981). Some methods of bichromatic pyrometry. *High temperature*, 19(6), 912-916.
28. Madura, H., & Piatkowski, T. (2004). Emissivity compensation algorithms in double-band pyrometry. *Infrared Physics & Technology*, 46(1-2), 185-189. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.024>
29. Foley, G. M. (1978). Modification of emissivity response of two-color pyrometer. *High Temperatures. High Pressures*, 10(4), 391-398.
30. Anderson, A. S. (1986). Accurate noncontact temperature measurement of aluminum surfaces improved radiometer for temperature measuring of the aluminum surface. In *Proc. IMEKO TC12 Symposium on major problems of present-day radiation pyrometry* (pp. 94-100). IMEKO
31. Belskiy, O.I. (1978). Issledovanie optimalnykh metodov i sistem izmereniya istinnoy temperatury metallov po izlucheniyu: dis. ... kand. tehn. nauk [Investigation of optimal methods and systems of metals true temperature measurement by radiation]. Candidate of Technical Sciences Thesis. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the USSR Academy of Science [in Russian].
32. Zhukov, L. F., & Petrenko, D. O. (2017). *The way of temperature measurement* (Patent of Ukraine No. 118366). State Service for Intellectual Property of Ukraine. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/792662/> [in Ukrainian].
33. Zhukov, L. F., & Petrenko, D. O. (2019). Influence of metal alloys radiative characteristics on methodical errors of two-color compensative and classical thermometry. *Measuring Equipment and Metrology*, 80(3), 39-45. <https://doi.org/10.23939/istcm2019.03.039> [in Ukrainian].
34. Sugiura, M., Shinotake, A., Nakashima, M., & Omoto, N. (2014). Simultaneous Measurements of Temperature and Iron–Slag Ratio at Taphole of Blast Furnace. *International Journal of Thermophysics*, 35, 1320-1329. <https://doi.org/10.1007/s10765-014-1708-z>
35. Firago, V., & Wojcik, W. (2015). High-temperature three-colour thermal imager. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91(2), 208-214. <https://doi.org/10.15199/48.2015.02.47>
36. Giulietti, N., Cosoli, G., Napolitano, R., Pandarese, G., Revel, G. M., & Chiariotti, P. (2025). Spectral emissivity measurement for high-temperature applications: a systematic review. *Acta IMEKO*, 14(1), 1-17. <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v14i1.1846>
37. Sun, Y., Pan, J., Jiang, L., Hao, L., Cao, Y., & Wang, H. (2022). Multi-Irradiance: A Method for Simultaneous Measurement of the Temperature and Spectral Emissivity of High-Temperature Targets in SWIR. *Sensors*, 22(21), 8469. <https://doi.org/10.3390/s22218469>
38. Dmitriyev, A. (2005). Laser pyrometry offers practical temperature measurement. *Heat treating progress*.
39. Svet, D. Ya. (1970). Method and apparatus for measuring true or actual temperature of bodies by radiant energy (Patent of USA No. 3537314). United States Patent and Trademark Office.
40. Svet, D. Ya. (1972). Some new methods and systems of pyrometry and their application. *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry: Papers presented at the 5-th symposium on temperature*, vol. 2 / ed. by H. Plumb. Pittsburg. P. 587.
41. Wen, C.-D., & Chr, Y.-H. (2010). The Assessment of Multispectral Radiation Thermometry Using Linear and Log-Linear Emissivity Models for Steel. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 58(1), 40-54. <https://doi.org/10.1080/10407790.2010.504696>
42. Zhukov, L. F., & Petrenko, D. A. (2023). Indirect, with Respect to the Nonlinearity Equation, Measurement of the Radiating Capacity and Temperature of Opaque Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 96(1), 266-277. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02683-3>
43. Zhukov, L., & Petrenko, D. (2022). Methods of indirect measurement of emissivity of tungsten and ferrous-carbon alloys. *Ukrainian Metrological Journal*, (1), 20-26. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258801> [in Ukrainian].

44. Hots, N. Ye. (2010). Analiz pokhybok vymiriuvannia temperatury metodamy dvokanalnoi termometrii vyprominennia [Analysis of temperature measurement errors using two-channel radiation thermometry methods]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", series "Computer Systems and Networks"*, (688), 83-90 [in Ukrainian].

Надійшла/Received 23.02.2026

Прийнята/Accepted 29.04.2026

Опублікована/Published 29.05.2026

Summary

D.O. Petrenko, Junior Researcher, e-mail: dima-petrenko@meta.ua,
<https://orcid.org/0000-0002-7546-9503>

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine
(Kyiv, Ukraine)*

Methods of Monochromatic One- and Two-Color Radiation Thermometry of Melts in Metallurgy. Part 2

The article is devoted to the second group of the methods of monochromatic one- and two-color thermometry – those, measurement models of which include correction parameters for spectral emissivity of “non-black” objects to be accounted for. The metallic melts belong to such objects. In contrast to multicolor methods, the last have smaller instrumental component of temperature measurement uncertainty, so their application makes sense from the point of view of increasing measurement accuracy and reliability of melt temperature control. Based on generalizing models of thermodynamic temperature measurements, a classification of methods of the second group of radiation thermometry is proposed. There are 25 methods have been found. In accordance to the classification, they belong to 4 generalizing measurement models. It has been established, that for the vast majority (subgroup 1) of methods, a generalising model derived from the Wien’s formula, is valid. In this context, the 15 methods in subgroup 1 are characterised by the same set of input quantities, including the values of spectral emissivity at the corresponding wavelengths. The generalizing models for the remaining 3 subgroups of methods are empirical or based on some a priori dependencies between the values of spectral emissivity at two wavelengths. The field of their adequate applicability is restricted by those metallurgical objects, where mentioned conditions are held. The most universal can be supposed those methods, measurement models of which include values of spectral emissivity in an explicit form. It has been justified, that under conditions of significantly changing emissivity characteristics of melts, the most metrologically effective is correction of mentioned thermometry methods “in situ”, in real time. To realize this, it is necessary to use the independent from temperature measurement contactless methods of spectral emissivity evaluation. Taking into consideration complexity of technical realization and cost, the passive methods of emissivity evaluation are the most appropriate in the case of melts. The passive methods are based on the measurement of quantities, which are invariant to the temperature and a priori established models of spectral emissivity. Two-stage conception of temperature measurement accuracy increasing has been proposed. The list of thermometry methods and methods of spectral emissivity evaluation to be following metrologically analyzed, has been determined.

Keywords

Monochromatic one- and two-color radiation thermometry, melt, thermodynamic and conditional temperature, spectral emissivity, correction, measurement model, uncertainty of measurement.