

Методи монохроматичної одно- й двокольорової термометрії випромінення розплавів в металургії. Частина 1

Термометрія випромінення найбільш прийнятна при безперервному вимірюванні температури металевих розплавів, що необхідно для вимірювального контролю їх станів по ходу плавки, а також енергозберігаючого управління останньою. В контексті максимізації вірогідності контролю й підвищення енергоефективності плавки актуальною є задача зниження невизначеності вимірювання температури розплавів. При раціональному підході цього можна досягти, спираючись на різноманіття сучасних методів монохроматичної одно- й двокольорової термометрії випромінення. Останні було поділено на дві групи, залежно від використання в їх моделях вимірювань інформації про спектральну випромінювальну здатність об'єкта. Поточна робота присвячена аналізу 1-ї групи методів термометрії випромінення — тих, в моделях вимірювань яких відсутня корекція на спектральну випромінювальну здатність. Показано, що рівність умовних та термодинамічної температур має місце при термодинамічно рівноважному випромінненні абсолютно чорного тіла, спектральна випромінювальна здатність якого тотожно рівна одиниці. Відповідно, методи одно- й двокольорової термометрії випромінення розплавів без корекції на випромінювальну здатність ґрунтуються на припущенні, що останні випромінюють як абсолютно чорне тіло. Встановлено, що емпіричні способи оцінювання температури розжарених об'єктів, зокрема розплавів, за зоровим сприйняттям їх енергетичної яскравості й кольору історично виникли першими. На початку минулого століття на їх основі виникли 2 класичні методи монохроматичної термометрії випромінення в видимому діапазоні довжин хвиль — яскравісної та спектрального відношення умовних температур. До «некласичних» віднесено 6 умовних температур, які з'явилися пізніше внаслідок розвитку теоретичної бази термометрії випромінення. Розглянуто моделі вимірювань умовних температур. Виявлено 3 співвідношення між значеннями спектральної випромінювальної здатності «нечорного» об'єкта на двох довжинах хвиль, за яких систематичні методичні похибки деяких двокольорових методів виключаються. Наведено залежність спектральної випромінювальної здатності від довжини хвилі, яка обумовлює ці співвідношення. На практиці, у випадку «нечорних» об'єктів з суттєво нестабільною спектральною випромінювальною здатністю, до яких належать розплави, адекватні умови застосовності (за яких гарантовано виключається систематична методична похибка) розглянутих методів забезпечують за допомогою технологій нормалізації випромінення. Описано 5 технологій, а також наведено принципові недоліки кожної з них. Враховуючи складність та суттєву вартість технологій, а також низьку методичну точність вимірювання температури розплавів розглянутими методами термометрії випромінення без них, для безконтактного контролю температури розплавів в металургії необхідні більш метрологічно досконалі методи термометрії випромінення, поєднані з методами вимірювання спектральної випромінювальної здатності.

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

Вступ. Отримання виливків з металевих сплавів неможливе без їх переведення у рідку фазу — розплав. В останньому відбуваються фізико-хімічні й структурні перетворення, які формують критично важливі для споживача властивості готової продукції — виливків. Температура, а також хімічний склад є головними параметрами для оцінки відповідності перебігу процесів отримання, обробки й розливання розплавів встановленим технологічним вимогам. Ступінь цієї відповідності в підсумку визначає якість металопродукції [1].

Вимірювання температури розплаву є основою операції вимірювального контролю [2] його стану. Ця операція передбачає порівняння, на певних етапах плавки, результату вимірювання температури з границями допускового інтервалу, які встановлені технологічною інструкцією на виплавку того чи іншого сплаву. Результатом контролю є висновок про стан розплаву — придатний чи непридатний для подальшої технологічної операції (наприклад, витримки при заданому перегріві, модифікуючої/легуючої обробки чи зливання в ківш). Результат контролю характеризують вірогідністю [2], яка дорівнює ймовірності $0 \leq P \leq 1$

того, що результат коректно відображає поточний стан розплаву. Очевидно, що для отримання якісної металопродукції, вірогідність контролю станів розплаву підлягає максимізації. Вірогідність результату контролю обернено пропорційна невизначеності результату вимірювання величини [3], який порівнюють з границями допускового інтервалу. Це робить зниження невизначеності вимірювання актуальною задачею як для вимірювального контролю в цілому, так і для температурного контролю станів розплавів зокрема.

Ефективне енергозберігаюче управління плавильним агрегатом вимагає безперервного вимірювання температури [1]. Саме безперервність уможливорює точну оцінку моментів часу, коли розплав стає придатним для виконання над ним згаданих технологічних операцій. За високих (1200...1650 °C) температур, які притаманні найпоширенішим в металургії залізовуглецевим розплавом, найбільш прийнятні безконтактні вимірювання методами термометрії випромінення (ТВ) в видимій та ближній інфрачервоній ділянках спектра. Термоелектрична термометрія, яка потребує механічного й теплового контакту первинного вимірювального перетворювача (сенсора) з розплавом, не підходить для цих умов. Це пояснюється агресивним фізико-хімічним впливом, внаслідок чого швидко руйнується захисна арматура, і погіршуються метрологічні характеристики термоелектричного сенсора [1]. Так, хоча на світовому ринку пропонуються рішення для тривалого контактного вимірювання температури залізовуглецевих розплавів, наприклад, система CasTemp від Heraeus Electro Nite для промковців при безперервному розливанні сталі [4], вони не набули широкого розповсюдження.

Фізична основа ТВ — це явище власного теплового випромінення тіла, яке характерне для всіх тіл, температура яких перевищує абсолютний нуль. Сенсор термометричної системи перетворює енергетичну яскравість об'єкта в електричну фізичну величину, яка підлягає подальшому вимірюванню. Енергетична яскравість — це інтеграл від спектральної густини енергетичної яскравості (СГЕЯ) [5], взятий в границях ($\lambda_i - \Delta\lambda$; $\lambda_i + \Delta\lambda$) спектрального каналу, який характеризується шириною $\Delta\lambda$ та центральною довжиною хвилі λ_i . Одноканальні методи ТВ зазвичай поділяють на 3 групи: монохроматичні, широкосмугові («в спектральних інтервалах» або «часткового випромінення») й інтегральні [6—8]. Для першої групи $\Delta\lambda$ настільки мала (зазвичай $\Delta\lambda \leq 10$ нм), що СГЕЯ при переході від однієї до іншої границі спектрального інтервалу змінюється несуттєво, порівняно зі значенням СГЕЯ на λ_i (при цьому термін «спектральний канал» замінюють на «довжина хвилі», кількісною оцінкою якої є λ_i). Дво- та багатоканальні методи ТВ бувають монохроматичними або широкосмуговими [6].

Монохроматичні методи ТВ найбільш перспективні для реалізації на базі сучасних сенсорів теплового випромінення, фізичною основою яких є прилади із зарядовим зв'язком (charge coupled devices — CCD) або комплементарні структури метал-оксид-

напівпровідник (complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor — CMOS) [9]. Також, порівняно з широкосмуговою ТВ, монохроматична ґрунтується на простіших математичних моделях. Це дозволяє уникнути чисельного інтегрування й розв'язування трансцендентних рівнянь, що необхідно, зокрема, для обчислення інтегральних яскравісних температур та ефективних довжин хвиль, які застосовуються в широкосмуговій ТВ [6]. Відповідно, спрощується подальший аналіз невизначеностей вимірювання термодинамічної температури.

Зазвичай монохроматичні двокольорові методи ТВ розглядають як частковий випадок відповідних багатоканальних (multiwavelength, multispectral) методів [6, 7]. Внаслідок розвитку теоретичної бази двокольорової ТВ протягом останніх 50—60 років, до єдиного відомого на той час колірного або ж спектрального відношення методу ТВ додалися інші. Через це їх доцільно розглянути окремо, доповнивши однокольоровими на двох довжинах хвиль. При раціональному підході різноманіття методів монохроматичної ТВ можна спрямувати на підвищення точності вимірювання температури об'єктів металургії, в тому числі розплавів. Методи одно- й двокольорової ТВ відрізняються моделями вимірювань [3] термодинамічної температури та, відповідно, наборами вхідних величин цих моделей. Відсутність систематизації методів ТВ ускладнює вибір адекватних для них об'єктів вимірювань, та, тим більше, порівняння метрологічних характеристик методів ТВ в однакових умовах.

В ході попереднього аналізу літератури методи ТВ було поділено на 2 групи, залежно від наявності в їх моделях вимірювань інформації про спектральну випромінювальну здатність об'єкта. Поточна робота представляє собою першу частину тематичного огляду монохроматичної одно- й двокольорової ТВ розплавів в металургії, спрямованого на підвищення точності вимірювання температури шляхом раціонального вибору методу ТВ. Її метою є аналіз 1-ї групи (які не використовують інформацію про спектральну випромінювальну здатність). Це дасть змогу оцінити перспективність їх застосування для вимірювання температури металевих розплавів.

Виклад основного матеріалу. За умови ідеально прозорого проміжного середовища зі спектральним коефіцієнтом пропускання $\tau(\lambda) \equiv 1$, з формули Віна (Wien) для СГЕЯ випливає, що умовна однокольорова (яскравісна) температура $S_{\lambda i}$ об'єкта, вимірювана на довжині хвилі λ_i , пов'язана з його термодинамічною температурою T через значення спектральної спрямованої випромінювальної здатності $\varepsilon(\lambda_i) = \varepsilon_i$ (ступінь чорноти, коефіцієнт випромінювальної здатності, коефіцієнт емісії [5—8, 10—12]) наступним пірометричним рівнянням [12—14]:

$$\frac{1}{S_{\lambda i}} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_i}{C_2} \ln(\varepsilon_i), \quad (1)$$

де C_2 — друга радіаційна стала [5]; i — індекс довжини хвилі ($i = 1, 2$ для двокольорової ТВ).

Усі об'єкти ТВ в конденсованій фазі, в тому

числі й розплави, характеризуються неперервною функціональною залежністю спектральної випромінювальної здатності від довжини хвилі — $\varepsilon(\lambda)$.

З рівняння (1) можна виразити T в явному вигляді. Формула Планка (Planck) для СГЕЯ лише незначно ускладнює рівняння (1), при цьому можливість отримання аналітичного виразу $T = f(S_{\text{Яі}}, \lambda_{\text{і}}, \varepsilon_{\text{і}})$ зберігається. Умовною яскравісною температурою $S_{\text{Яі}}$ об'єкта є така температура $T_{\text{АЧТ}}$ абсолютно чорного тіла (АЧТ) [5—7, 10, 12—14], за якої СГЕЯ АЧТ $E^0(\lambda_{\text{і}}, T_{\text{АЧТ}} \equiv S_{\text{Яі}})$ дорівнює СГЕЯ об'єкта $E(\lambda_{\text{і}}, \varepsilon_{\text{і}}, T)$ з термодинамічною температурою T . Через це $S_{\text{Яі}}$ ще називають «енергетичною» умовною температурою [6, 12]. Вимірявши термометричною системою $E(\lambda_{\text{і}}, \varepsilon_{\text{і}}, T)$, можливо перейти до $S_{\text{Яі}}$ й подальші обчислення виконувати на її основі. Вирази для обчислення $S_{\text{Яі}}$ будуть наведені далі. З огляду на технологічні температури залізобетонних розплавів та типовий спектральний діапазон сенсорів випромінювання (500...1100 нм), який охоплює видиму (visible light — VIS) й ближню інфрачервону області (near infrared — NIR), формула Віна забезпечує нехтовно малу систематичну похибку апроксимації СГЕЯ ($\leq 0,02\%$), що практично не впливає на результат обчислення умовної яскравісної температури.

Переходячи до двох довжин хвиль, вводять поняття умовної двокольорової температури $S_{2\text{К}}$, для якої, при апроксимації СГЕЯ формулою Віна, справедливе аналогічне пірометричне рівняння:

$$\frac{1}{S_{2\text{К}}} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_{\text{ЕКВ}}}{C_2} \cdot \ln(\varepsilon_{\text{ЕКВ}}), \quad (2)$$

де $\lambda_{\text{ЕКВ}} = f(\lambda_1, \lambda_2)$, м та $\varepsilon_{\text{ЕКВ}} = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \lambda_1, \lambda_2)$ — еквівалентні довжина хвилі й випромінювальна здатність умовної температури [13, 14].

Це рівняння теж дозволяє явно виразити T через $S_{2\text{К}}$, $\lambda_{\text{ЕКВ}}$ та $\varepsilon_{\text{ЕКВ}}$. А ось використання формули Планка для СГЕЯ призведе до отримання, замість (2), трансцендентного рівняння. При заданих $S_{2\text{К}}$, $\lambda_{\text{ЕКВ}}$, $\varepsilon_{\text{ЕКВ}}$, воно розв'язується відносно T лише чисельно.

Умовні двокольорові температури також називають «температурами спектрального розподілу» [5], «відносними температурами» [6] або ж «умовними температурами 1-го порядку» [12]. Кожна з них являє собою деяку температуру $T_{\text{АЧТ}}$, яку знаходять шляхом прирівнювання комбінації двох виміряних значень СГЕЯ об'єкта такій же комбінації значень СГЕЯ АЧТ. Від конкретної комбінації залежать вирази для $\lambda_{\text{ЕКВ}}$, $\varepsilon_{\text{ЕКВ}}$ умовної температури. Автором монографії [6] показано, що будь-яка умовна двокольорова температура однозначно виражається через дві яскравісні. Аналогічно двокольоровій вводять поняття умовних температур більш високих порядків. Зокрема, трикольорові температури або «умовні температури 2-го порядку» теж однозначно виражаються через три яскравісні [12—14]. Трикольорові температури застосовують в багатокольоровій ТВ (методи подвійного спектрального відношення [6, 12] та спектрально-компенсаційні [13, 14]). В монографіях

[6] та [12] зроблено висновок, що збільшення порядку умовної температури обумовлює зростання інструментальної складової випадкової похибки вимірювання температури (внаслідок зростання кількості значень СГЕЯ чи яскравісних температур та відповідного підсумовування випадкових похибок). Тому не рекомендується використовувати умовні температури вище 2-го порядку.

Для методів ТВ без корекції на спектральну випромінювальну здатність об'єкта, оцінкою його термодинамічної температури T є вимірювана умовна температура $S_{\text{Яі}}$ або $S_{2\text{К}}$. З рівняння (1) очевидно, що $S_{\text{Яі}} = T$ при $\varepsilon_{\text{і}} = 1$, а з рівняння (2) — $S_{2\text{К}} = T$ при $\varepsilon_{\text{ЕКВ}} = 1$. Ці дві умови виконуються при термодинамічно рівноважному випромінненні АЧТ, для якого $\varepsilon(\lambda) \equiv 1$. В результаті цього СГЕЯ АЧТ є функцією лише термодинамічної температури останнього [6, 7, 10, 12—17]. Саме той факт, що для АЧТ $\varepsilon(\lambda) \equiv 1$, уможливорює рівність його умовних та термодинамічної температур. Це ж твердження «за замовчуванням» переноситься на об'єкт вимірювання, що цілком логічно, оскільки в моделях вимірювань цих методів ТВ відсутні параметри для врахування $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта вимірювання.

В реальності отримати строго термодинамічне випроміннення неможливо [6, 10], тому використовують фізичні моделі АЧТ [10, 12, 15], випроміннення яких з тим чи іншим ступенем наближення можна вважати термодинамічно рівноважним. З точки зору метрології такі моделі є інструментом виключення систематичної методичної похибки вимірювання температури методами ТВ, які ігнорують інформацію про $\varepsilon(\lambda)$. Моделі АЧТ широко застосовують для калібрування монохроматичних (яскравісних) термометрів випроміннення безпосередньо в одиницях термодинамічної температури [15]. Зокрема, при $T \geq 1234,93$ К (точка плавлення Cu), одиницю Міжнародної термодинамічної шкали МТШ-90 (кельвін) відтворюють за допомогою яскравісного термометра випроміннення.

Досить давно відомий емпіричний спосіб оцінки температури розжарених об'єктів, в тому числі розплавів, на основі енергетичної яскравості їх випроміннення в видимому діапазоні довжин хвиль за принципом «яскравіше—гарячіше». Спосіб ґрунтується на тому, що зорове відчуття людського ока від нагрітого тіла прямо пропорційне натуральному логарифму його спектральної енергетичної яскравості, який, в свою чергу, пов'язаний з умовною яскравісною температурою $S_{\text{Яі}}$ оберненою пропорційністю [16]. При цьому, для захисту ока, розжарений об'єкт спостерігали через захисне скло (зазвичай, синє, яке відфільтровує більш інтенсивне довгохвильове випроміннення). Як видно з рівняння (1), при стабільній, повторюваній від плавки до плавки $\varepsilon_{\text{і}}$, $S_{\text{Яі}}$ однозначно корелює з T . Це було емпірично встановлено на якісному рівні ще до отримання формули Планка. Перший пірометр зі «зникаючою ниткою» для інструментального визначення яскравісної температури було розроблено французьким хіміком Ле Шательє (Le Chatelier) 1892 р. [16, 17]. Він являє

собою візуальний фотометр, в якому спектральна енергетична яскравість об'єкта, у вузькому діапазоні довжин хвиль оптичного спектра, порівнюється з яскравістю еталонної лампи розжарювання. Нemoжливiсть розрізнення зображення стрічки лампи на фоні об'єкта слугувало критерієм того, що їх яскравісні температури співпадають. Струму, який протікає через лампу, однозначно ставилася у відповідність яскравісна температура останньої. Компаратором яскравостей лампи та об'єкта виступало людське око.

Ще більш давнім є інший емпіричний спосіб оцінки температури розжареного тіла — за його кольором. Перші згадки про це пов'язані з дамаською булатною сталлю для виготовлення зброї. При загартовуванні її необхідно було нагрівати до досягнення кольору сонця, яке заходить за горизонт. Д. Черновим у 1860-х рр. було запропоновано шкалу температур за кольорами світіння, яка використовувалася в металургії при термічній обробці сталей [16]. У подальшому було встановлено, що розрізнявальна здатність людського ока достатня для ідентифікації станів нагріву за кольором з тією ж точністю, що і за яскравістю [16, 17]. На основі цього Хайдом (Hyde) близько 1910 р. було введено поняття умовної колірної температури об'єкта $S_{\text{кол}}$ та запропоновано перші два її визначення:

1. Колірна температура об'єкта — це температура АЧТ, за якої об'єкт та АЧТ викликають однакове зорове відчуття (мають однаковий колір) в видимій області спектра.

2. Колірна температура об'єкта — це температура АЧТ, за якої, в заданому спектральному діапазоні (на заданій множині довжин хвиль), СГЕЯ АЧТ співпадає з СГЕЯ об'єкта.

Трохи пізніше Форсайт (Forsythe) запропонував третє визначення, згідно з яким $S_{\text{кол}}$ об'єкта слід вважати такою температурою АЧТ, за якої відношення СГЕЯ АЧТ при двох довжинах хвиль λ_1, λ_2 дорівнює вимірюваному відношенню СГЕЯ об'єкта при тих же довжинах хвиль [6, 7, 10, 12, 16, 17]. В результаті експериментальних досліджень було встановлено еквівалентність умовних температур, обчислених відповідно до трьох наведених визначень [17]. Суттєвою відмінністю останнього визначення від перших двох є те, що для знаходження $S_{\text{кол}}$ достатньо вимірювань СГЕЯ лише на двох довжинах хвиль. Тому в рамках двокольорової ТВ використовують саме його [6, 7, 12]. Для визначеної таким чином умовної колірної температури більш релевантною є назва «умовна температура спектрального відношення» $S_{\text{СВ}}$ [16], з чим погоджується й автор статті.

Оцінювання температури розплаву за його кольором також практикувалося в ході окомірного (безінструментального) контролю процесів виплавки чавунів та сталей [1, 11, 21]. При такому контролі також брали до уваги інші характерні особливості розплаву, які піддаються візуальній оцінці, зокрема, рідкоплинність, час появи/зникнення стабільної непрозорої оксидної плівки. Випромінення розплаву

спостерігали через синьо-червоний світлофільтр (зазвичай, кобальтове скло [11]), а точність визначення температури залежала від натренованості зорової пам'яті плавильника та відтворюваності умов плавки, за яких було проведено його навчання. В монографії [21] зазначено, що досвідчені металурги могли «на око» вимірювати температуру розплаву з граничною похибкою близько 15 °С. Очевидно, що при порушенні однозначності зв'язку між температурами спектрального відношення та термодинамічною, внаслідок змін $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта та/або $\tau(\lambda)$ супутнього газового середовища під впливом багатьох випадкових факторів, оцінювання температури розплаву за його кольором призводило до грубих похибок (промахів). В умовах нестачі засобів вимірювань температури розплавів, на деяких радянських ливарних підприємствах окомірний контроль використовували ще на початку 1980-х років [1].

Як бачимо, способи оцінювання термодинамічної температури розжарених об'єктів за зоровим сприйняттям їх енергетичної яскравості та кольору історично виникли першими. Відповідно, можна стверджувати, що методи яскравісної та спектрального відношення умовних температур, вимірюваних оптичними термометрами, без поправок на випромінювальну здатність, лежать в основі сучасної термометрії випромінювання. Через це в роботах [1, 6, 12—14] їх віднесено до класичних. Пізніше, протягом 1960—80-х рр., в результаті розвитку теоретичної бази ТВ, було запропоновано інші «некласичні» умовні двокольорові температури [6, 18].

Виходячи з номенклатури умовних температур, за-



Рис. Класифікація методів монохроматичної одно- та двокольорової ТВ, які не враховують інформацію про $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта

пропонувано класифікацію методів монохроматичної одно- та двокольорової ТВ без корекції на випромінювальну здатність об'єкта (рисунок).

Визначення класичних умовних температур наведено вище. Для визначення (дефініції) умовних температур об'єкта, покладених в основу «некласичних»

методів ТВ (за п. 2 на рисунку), використовують:

- рівність добутку значень СГЕЯ об'єкта на довжинах хвиль λ_1 й λ_2 , добутку значень СГЕЯ АЧТ на тих же довжинах хвиль — для обчислення S_{BK} (п. 2.1);
- усереднення зворотних значень $S_{Я1}$ й $S_{Я2}$ — для обчислення зворотного значення $S_{СЯ}$ (п. 2.2);
- усереднення зворотних значень S_{CB} та $S_{СЯ}$ — для обчислення зворотного значення $S_{КЯ}$ (п. 2.3);
- усереднення зворотних значень S_{CB} й S_{BK} — для

обчислення зворотного значення S_{KB} (п. 2.4);

- додавання до $1/S_{Я1}$, $1/S_{BK}$ поправок, пропорційних вимірюваному температурному інваріанту — для обчислення $S_{Я1}^{OPT}$, S_{BK}^{OPT} (п.п. 2.5, 2.6).

Моделі вимірювань перелічених методів ТВ зведено в таблиці.

В таблиці позначено:

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

Таблиця

Моделі вимірювань методів ТВ без корекції на $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта (рисунок) [6, 7, 10, 12—19]

Метод ТВ	Рівняння вимірювання умовної температури за двома значеннями СГЕЯ	Рівняння вимірювання умовної двокольорової температури за двома яскравісними
1.1	$S_{Я1} = -C_2 / [\lambda_1 \cdot \ln(\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1 / C_1)] = 1 / [1/T_0 - (\lambda_1 / C_2) \cdot \ln(E_1 / E_1^0)].$	—
1.2	$S_{Я2} = -C_2 / [\lambda_2 \cdot \ln(\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2 / C_1)] = 1 / [1/T_0 - (\lambda_2 / C_2) \cdot \ln(E_2 / E_2^0)].$	—
1.3	$S_{CB} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot [\ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) - \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{CB} = 1 / (\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}})$
2.1	$S_{BK} = -\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2 + \lambda_1)} \cdot [\ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) + \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{BK} = 1 / (\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_1} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}})$
2.2	$S_{СЯ} = -\frac{2 \cdot C_2}{\lambda_1 \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) + \lambda_2 \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})}$	$S_{СЯ} = 2 / (\frac{1}{S_{Я1}} + \frac{1}{S_{Я2}})$
2.3	$S_{КЯ} = \frac{2 \cdot C_2}{\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) - \frac{1}{2} \cdot [\lambda_1 \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) + \lambda_2 \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]}$	$S_{КЯ} = 2 / (\frac{1}{S_{CB}} + \frac{1}{S_{СЯ}}) = 1 / [\frac{3 \cdot \lambda_2 - \lambda_1}{4 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_2 - 3 \cdot \lambda_1}{4 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot \frac{1}{S_{Я2}}]$
2.4	$S_{KB} = \frac{2 \cdot C_2 \cdot (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)}{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot [(\lambda_2 + \lambda_1) \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) - (\lambda_2 - \lambda_1) \cdot \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]}$	$S_{KB} = 2 / (\frac{1}{S_{CB}} + \frac{1}{S_{BK}}) = 1 / (\frac{\lambda_2^2}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \cdot \frac{1}{S_{Я2}})$
2.6	$S_{Я1}^{OPT} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot [\ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) - \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{Я1}^{OPT} = 1 / [\frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1}{C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot J_{21}]$
2.7	$S_{CB} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot [\ln(\frac{\pi \cdot \lambda_1^5 \cdot E_1}{C_1}) - \ln(\frac{\pi \cdot \lambda_2^5 \cdot E_2}{C_1})]$	$S_{BK}^{OPT} = 1 / [\frac{1}{S_{BK}} + \frac{2 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{C_2 \cdot (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} \cdot J_{21}]$

$C_2 = (1,4387752 \pm 0,0000025) \cdot 10^{-2} \text{ К} \cdot \text{м}$ — перша та друга радіаційні сталі [5]; $\lambda_1, \lambda_2, \text{ м}$ — довжини хвиль монохроматичних спектральних каналів вимірювання СГЕЯ або умовних яскравісних температур;

$E_1 = E(T, \lambda_1, \varepsilon_1)$ та $E_2 = E(T, \lambda_2, \varepsilon_2)$, $(\text{Вт}/\text{м}^3) \cdot \text{ср}^{-1}$ — значення СГЕЯ об'єкта на відповідних довжинах хвиль;

$E_1^0 = E^0(\lambda_1, T_0)$ та $E_2^0 = E^0(\lambda_2, T_0)$, $(\text{Вт}/\text{м}^3) \cdot \text{ср}^{-1}$ — значення СГЕЯ АЧТ з температурою T_0 на відповідних довжинах хвиль; $S_{Я1}, S_{Я2}, \text{ К}$ — умовні яскравісні температури об'єкта, вимірювані на λ_1, λ_2 ;

$J_{21} = C_2 \cdot (1/S_{Я1} - 1/S_{Я2})$, м — температурний інваріант [6, 16].

В монографії [6] доведено, що методи «оптимальних» яскравісної та взаємнокореляційної температур (п.п. 2.5, 2.6) тотожні методу умовної температури спектрального відношення (п. 1.3), в чому можна перекоонатися, підставивши вираз для інваріанту в рівняння вимірювань $S_{Я1}^{OPT}$ й S_{BK}^{OPT} .

Заслуговує на увагу той факт, що існують такі

співвідношення між ε_1 , ε_2 «нечорного» об'єкта, за яких його деякі умовні двокольорові температури дорівнюють термодинамічній. Зокрема, це має місце для:

— S_{CB} при $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1$, що характеризує неселективний випромінювач або ж «сіре» тіло з $\varepsilon(\lambda) = \text{const} < 1$ [5—7];

— $S_{KЯ}$ при $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1 / \{ \exp[\lambda_1 \cdot (3 \cdot \lambda_2 - \lambda_1) - \lambda_2 \cdot (3 \cdot \lambda_1 - \lambda_2)] \}$ [6];

— S_{KB} при $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \exp(\lambda_1 - \lambda_2)$ [6].

Загалом всі 3 випадки підпадають під експоненційно-степеневу залежність спектральної випромінювальної здатності при $\varepsilon(\lambda) = \exp(a \cdot \lambda^\alpha)$: перший — при $a < 0$, $\alpha = 0$; другий — при $a = 1$, $\alpha = \log_{\lambda_2/\lambda_1} [(3 \cdot \lambda_2 / \lambda_1 - 1) / (3 - \lambda_2 / \lambda_1)] - 1$; третій — при $a = 1$, $\alpha = 1$. Тому S_{CB} , $S_{KЯ}$ й S_{KB} можна розглядати як часткові випадки більш загальної експоненційно-степеневі температури S_{ECT} , запропонованої В. Снопко [6, 18]. Для неї справедливе наступне рівняння вимірювання:

$$S_{ECT} = 1 / \left(\frac{\lambda_2^{\alpha+1}}{\lambda_2^{\alpha+1} - \lambda_1^{\alpha+1}} \cdot \frac{1}{S_{Я1}} + \frac{\lambda_1^{\alpha+1}}{\lambda_1^{\alpha+1} - \lambda_2^{\alpha+1}} \cdot \frac{1}{S_{Я2}} \right). \quad (3)$$

За своєю суттю метод S_{ECT} належить до іншої групи методів ТВ (які враховують інформацію про спектральну випромінювальну здатність об'єкта) — оскільки показник степеню задають, виходячи з аналітичного опису $\varepsilon(\lambda)$, а тому не представлений на рисунку. Щоб переконатися, що перелічені вище умовні температури є частковими випадками S_{ECT} , треба підставити наведені α в формулу (3). При цьому рівняння вимірювання S_{ECT} в кожному з випадків стає тотожним рівнянню відповідної умовної температури з 3-го стовпця таблиці. Також можливо представити ε_1 , ε_2 через вказану експоненційно-степеневу апроксимацію з заданими параметрами та, підставивши їх у вирази для відповідних $\varepsilon_{екв}$, переконатися, що останні тотожно рівні 1.

Але, вимірюючи лише умовні температури чи СГЕЯ, перевірити відповідність $\varepsilon(\lambda)$ об'єкта переліченим 3 функціям, власне як і будь-яким іншим, принципово неможливо. Це очевидно з пірометричних рівнянь (1) й (2), згідно з якими умовна температура є функцією двох змінних — (T, ε_i) або $(T, \varepsilon_{екв})$. Тому, вимірювання T будь-якими методами монохроматичної ТВ, в тому числі й багатокольоровими, принципово можливе лише на підставі апріорного припущення про аналітичний вид $\varepsilon(\lambda)$ чи кількісні оцінки ε_i об'єкта. Щодо розглянутих 3-х випадків експоненційно-степеневі $\varepsilon(\lambda)$, то для «чистої» металевої поверхні розплавів вони загалом не характерні. Виняток складають розплави, поверхня яких вкрита товстими непрозорими оксидними плівками чи шлаком, які можливо вважати «сірими» випромінювачами [1, 6, 11—13, 16, 21]. Очевидно, що для них адекватним є метод умовної температури спектрального відношення (п. 1.3).

Вимірювання температури «нечорних» об'єктів методами ТВ, без корекції на випромінювальну

здатність, супроводжується систематичними методичними похибками. Останні пропорційні відхиленню ε_i чи $\varepsilon_{екв}$ від 1. В спектральному діапазоні 500...1100 нм чиста (неокислена) поверхня залізвуглецевого розплаву за спектральною випромінювальною здатністю близька до поверхні вольфраму у вакуумі при $T = 1200...2400$ К [20]. Для останнього, при $T = 1600$ К, відносні систематичні методичні похибки методів умовних яскравісних температур $S_{Я1}$ ($\lambda_1 = 700$ нм) й $S_{Я2}$ ($\lambda_2 = 900$ нм) складають 6,1 та 8,4 %, відповідно [20]. При суттєво нестабільній $\varepsilon(\lambda)$ залізвуглецевих розплавів в широких діапазонах температур, оцінки розширеної, з рівнем довіри 1, методичної невизначеності вимірювання [3] температури будуть одного порядку зі згаданими систематичними похибками (звичайно, після корекції останніх шляхом обчислення усереднених температурних поправок для кожного з методів ТВ в конкретних умовах вимірювань). До того ж, така корекція вимагає багаторазових порівняльних вимірювань температури термометричною системою та еталонним засобом вимірювальної техніки (так звана «прив'язка» системи до об'єкта контролю [1]), що далеко не завжди можливо реалізувати на практиці. Як вже було сказано, для виключення методичної похибки будь-якого з описаних вище методів ТВ без експериментального визначення поправок на «нечорноту» випромінювання, необхідно, щоб ділянка поверхні об'єкта, на яку візують термометр випромінювання, випромінювала як модель АЧТ. Для цього застосовують технології нормалізації випромінювання [12, 22] об'єктів металургії. Зокрема, для розплавів відомі технології, які ґрунтуються на:

— розміщенні в об'ємі розплаву циліндру з закритим дном («розжарюваної» труби [21]), виготовленого з електродного графіту, графітооксидної композиції [1, 21] чи вогнетривкої кераміки на основі Al_2O_3-C [23, 24], через який продувають стиснене повітря чи інертний газ («розжарюваних» моделей АЧТ);

— подачі струменя інертного газу під тиском безпосередньо в об'єм розплаву, в результаті чого в останньому утворюються протяжні циліндричні порожнини («продувних» моделей АЧТ) [11, 25];

— встановленні в футерівці металургійного обладнання вогнетривких (бакорова кераміка на основі $Al_2O_3-ZrO_2-SiO_2$) світловодних пристроїв, головним елементом яких є оптично прозорі стержні — світловоди, які забезпечують формування термодинамічно рівноважного випромінювання з температурою розплаву та передачу його до сенсора термометричної системи (світловодних моделей АЧТ) [1, 21, 26];

— періодичному короткочасному (до 5 с) зануренні в розплав гнучкого оптоволоконного світловода, який виконує описану вище функцію (оптоволоконних моделей АЧТ) [11, 27, 28];

— розміщенні поблизу поверхні розплаву дзеркальних напівсферичних [11, 12] або конічних відбивачів, поєднаних з гнучким світловодом [29], з метою штучного, за рахунок багатократних відбивань власного випромінювання поверхні розплаву, підвищення

ефективної спектральної випромінювальної здатності системи «поверхня-відбивач» до 1.

Безумовними перевагами описаних технологій є виключення впливу на результат вимірювання температури фонового випромінювання нагрітих стінок металургійного обладнання, а також нестабільності $\tau(\lambda)$ проміжного газового середовища. Для забезпечення $\tau(\lambda) = \text{const} = 1$ використовують фурми, які продувають повітрям чи інертним газом. Зокрема, такі фурми обов'язково працюють в комплекті з «розжарюваними» трубами та «продувними» моделями АЧТ. Але технології нормалізації випромінювання також мають чимало недоліків, серед яких:

- зміна геометрії порожнини графітової «розжарюваної» труби з подальшим руйнуванням при продувці стисненим повітрям [21], в результаті чого неконтрольовано знижується ефективна випромінювальна здатність такої моделі АЧТ;

- обмеженість, внаслідок конструктивних особливостей, номенклатури металургійного обладнання, на якому можливий монтаж «розжарюваних» труб (свого часу технологію було відпрацьовано для сифону вагранки [1, 21] зі стабільним рівнем розплаву, також пропонується аналогічне рішення для промковців при безперервному розливанні сталі [23, 24]);

- значна інерційність «розжарюваних» труб (внутрішня поверхня труби з електродного графіту набуває теплової рівноваги з розплавом приблизно за 3 хв [21], а двошарова занурювана труба [23] для сталі в промковці — протягом 5...8 хв [24]), що неприйнятно при безперервному контролі температури розплавів в індукційних тигельних печах та в процесі безперервного розливання сталі;

- вплив температурного градієнту (неізотермічності) уздовж «розжарюваної» труби на її ефективну випромінювальну здатність, який посилюється зі зростанням довжини труби, зменшенням теплопровідності її матеріалу й збільшенням температури розплаву [22, 30];

- зміну геометрії «продувної» моделі АЧТ в товщі розплаву, залежно від витрати газу й утворення «грибу» застиглого металу на краях продувної фурми, а також охолодження розплаву в утвореній порожнині внаслідок відбору тепла «холодним» газовим потоком, що в комплексі обумовлює зниження ефективної випромінювальної здатності моделі АЧТ [25];

- складність монтажу світловодних пристроїв, що вимагає високої кваліфікації інженерного персоналу та погіршує безпеку експлуатації металургійного обладнання (потенційно можливий прорив розплаву при неякісній герметизації стику світловодного пристрою й футерівки або при порушенні температурного режиму експлуатації останньої);

- адаптованість матеріалів та конструкції світловодних пристроїв лише для працюючих безперервно або з «зумпфом» (залишком розплаву) металургійних печей й агрегатів [1, 26];

- температурний гістерезис СГЕЯ по довжині світловода, який спостерігається на об'єктах з високою температурною динамікою та обумовлює до-

даткову систематичну похибку вимірювання температури [31], врахування якої вимагає моделювання температурних градієнтів за товщиною футерівки в монтажній зоні світловодного пристрою;

- неможливість тривалого безперервного вимірювання температури технологією на базі оптоволоконного світловода внаслідок механічного й хімічного руйнування імерсійного торця останнього в розплаві, а також висока вартість й складність технології, обумовлена численними електромеханічними пристроями для переміщення оптоволоконна [11];

- неможливість тривалого безперервного вимірювання температури поверхні розплаву при застосуванні дзеркальних відбивачів, внаслідок локального спотворення теплового поля поверхні (перегрівання ділянки поверхні під відбивачем сягає 50 °C вже протягом 15 с [12]).

Більшість з вказаних недоліків являють собою принципи обмеження застосовності технологій нормалізації випромінювання та пов'язаних з ними методів ТВ. Це необхідно враховувати при організації вимірювання та контролю температури розплаву в тій чи іншій металургійній печі або агрегаті. Зокрема, безперервність вимірювання температури повною мірою забезпечують лише перші три технології. Однак вартість всіх їх є досить високою. Наприклад, собівартість виготовлення лише світловодного пристрою для технології світловодних моделей АЧТ, за оцінкою д-ра техн. наук Л.Ф. Жукова станом на 2023 р., становила близько 6000 USD.

Як вже було сказано, технології нормалізації випромінювання коригують систематичну методичну похибку вимірювання температури методами ТВ, які не враховують інформацію про спектральну випромінювальну здатність об'єкта. Якщо методична складова невизначеності внаслідок такої корекції нехтовно мала, то сумарна невизначеність вимірювання температури кожним з розглянутих методів ТВ буде визначатися лише відповідною інструментальною складовою [32] (обумовленої невизначеностями вимірювань СГЕЯ/умовних яскравісних температур та довжин хвиль). Щоб оцінити, за типом В, інструментальну складову, слід скористатися бюджетом невизначеності, запропонованим в роботі [32]. Це дозволить обирати серед розглянутих методів ТВ ті, інструментальні складові невизначеності вимірювання температури для яких будуть мінімальними.

Однак оцінити комбіновану стандартну, а також розширену невизначеності вимірювання температури розглянутими методами ТВ можливо лише за типом А [3], шляхом порівняльних вимірювань на конкретному металургійному об'єкті. Це пояснюється відсутністю в рівняннях вимірювань температури вхідних величин для корекції методичної похибки вимірювання температури, обумовленої відмінністю від 1 $\varepsilon(\lambda)$ «чорного» об'єкта. Відповідно, неможливо отримати часткові похідні від рівнянь вимірювань температури за відповідними вхідними величинами для обчислен-

ня методичної складової невизначеності за типом В.

Висновки

Таким чином, в результаті аналізу методів монохроматичної одно- й двокольорової термометрії випромінювання металевих розплавів без корекції на спектральну випромінювальну здатність, встановлено, що в основі цих методів лежить припущення про наявність у розплаву термодинамічно рівноважного випромінювання абсолютно чорного тіла. На основі цього вимірювані умовні температури вважають рівними шуканій термодинамічній температурі розплаву. З урахуванням довжин хвиль, умовні температури пропорційні значенням спектральної густини енергетичної яскравості останнього. Виходячи з номенклатури умовних температур, запропоновано класифікацію методів термометрії випромінювання.

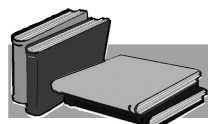
Встановлено, що емпіричні способи оцінювання температури розжарених об'єктів, за зоровим сприйняттям їх енергетичної яскравості й кольору, історично виникли першими. Ці емпіричні способи на початку минулого століття дали поштовх розробці перших інструментальних методів термометрії випромінювання. Ними є методи яскравісної та спектрального відношення умовних температур, які відносять до класичних. 6 «некласичних» двокольорових методів ґрунтуються на відповідних умовних температурах, які визначають шляхом прирівнювання комбінацій значень спектральної густини енергетичної яскравості об'єкта на двох довжинах хвиль відповідним комбінаціям для абсолютно чорного тіла. Встановлено, що існують 3 співвідношення між значеннями спектральної випромінювальної здатності «не-чорного» об'єкта на двох довжинах хвиль, за яких систематичні методичні похибки методів спектраль-

ного відношення, колірно-яскравісної та колірно-взаємнокореляційної умовних температур виключаються. Згадані співвідношення мають місце при експоненційно-степеневій залежності спектральної випромінювальної здатності від довжини хвилі, за деяких значень показника степеню. Наявність у об'єкта вимірювання таких розподілів має перевірятися експериментально.

Встановлено, що моделі вимірювань розглянутих методів термометрії випромінювання дозволяють оцінити, за типом В, лише інструментальну складову комбінованої стандартної невизначеності вимірювання температури. Обчислення комбінованої стандартної, а також розширеної невизначеностей можливе лише за типом А в умовах конкретного об'єкта вимірювання.

Головним недоліком методів термометрії випромінювання без корекції на випромінювальну здатність слід вважати те, що адекватні умови їх застосовності, за винятком вказаних трьох методів при трьох апіорі відомих співвідношеннях між значеннями спектральної випромінювальної здатності, забезпечуються лише за допомогою технологій нормалізації випромінювання, які фізично моделюють термодинамічно рівноважне випромінювання з температурою об'єкта. У випадку розплавів технічно реалізувати це досить складно й дорого.

Враховуючи низьку методичну точність вимірювання температури розглянутими методами термометрії випромінювання без технологій нормалізації випромінювання, можна констатувати, що для безконтактного контролю температури розплавів в металургії необхідні більш метрологічно досконалі методи ТВ, поєднані з методами вимірювання спектральної випромінювальної здатності.

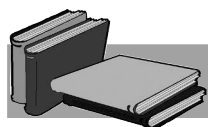


ЛІТЕРАТУРА

1. Жуков Л.Ф. Исследование и разработка методов и средств температурного контроля и ресурсосберегающих технологических процессов получения жидкого чугуна в литейном производстве. Дисс. докт. техн. наук: 05.11.04, 05.16.04. Киев: ИПЛ АН Украины, 1992. 505 с.
2. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Вінниця: ВДТУ, 2001. 219 с.
3. International vocabulary of metrology — basic and general concepts and associated terms (VIM): 3-rd edition (JCGM 200:2012 (E/F)). Joint Committee for Guides in Metrology, 2012. <https://doi.org/10.59161/JCGM200-2012>
4. Зражевський А.Д., Ноговицын А.В., Дербенев Д.В. VII Конференция сталеплавильщиков Украины (обзор докладов). *Металл и литье Украины*. 2017. № 11–12 (294–295). С. 53–59.
5. Prokhorov A.V. et al. Spaceborne Optoelectronic Sensors and their Radiometric Calibration. Terms and Definitions. Part 1. Calibration techniques (NISTIR — 7203). Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2021. 228 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir7203.pdf> (дата звернення: 28.08.2025).
6. Снопко В.Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения. Минск: Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, 1999. 224 с.
7. Araújo A. Multi-spectral pyrometry — a review. *Measurement Science and Technology*. 2017. Vol. 28. No. 8. 082002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa7b4b>

8. Гоц Н.Є. Основні напрями вдосконалення термінологічної бази термометрії випромінювання. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2012. № 73. С. 127—133.
9. CCD vs CMOS: A Review of Sensor Technology. URL: <https://www.csensor.com/ccd-vs-cmos> (дата звернення: 28.08.2025).
10. Zhang Z.M., Tsai B.K., Machin G. Radiometric Temperature Measurements I. Fundamentals. New York: Academic Press (Elsevier), 2009. 376 p.
11. Zhang Z.M., Tsai B.K., Machin G. Radiometric Temperature Measurements: II. Applications. New York: Academic Press (Elsevier), 2010. 458 p.
12. Поскачей А.А., Чарихов Л.А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. Москва: Металлургия, 1978. 200 с.
13. Zhukov L.F., Bogdan A.V. Investigation and Elaboration of Methods of Multicolor Optical Thermometry. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2002. Vol. 75. Iss. 5. P. 1207—1212. <https://doi.org/10.1023/A:1021140313623>
14. 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.
15. Жуков Л.Ф., Корниенко А.Л., Петренко Д.А., Богдан А.В. Установка для прецизионных исследований и градуировки систем многоцветовой пирометрии излучения металлургических объектов. *Процессы литья*. 2015. № 6(114). С. 55—59.
16. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. Москва: Наука, 1982. 296 с.
17. Рибо Г. Оптическая пирометрия (пер. с франц. Г. Ландсберг и Ф. Ландсберг). Москва, Ленинград: Государственное технико-теоретическое издательство, 1934. 455 с.
18. Гада Я. М., Снопко В. Н. Некоторые методы бихроматической пирометрии. *Теплофизика высоких температур*. 1981. Т. 19. Вып. 6. С. 1260—1265.
19. Гоц Н.Є. Огляд одноканальної пірометрії. *Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки»*. 2007. № 1(40). С. 95—100. URL: <https://vtn.ztu.edu.ua/article/view/93996> (дата звернення: 28.08.2025).
20. Жуков Л.Ф., Петренко Д.О. Методи опосередкованих вимірювань випромінювальної здатності вольфраму і залізуглецевих сплавів. *Український метрологічний журнал*. 2022. № 1. С. 20—27. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258801>
21. Чугунный Е.Г., Жуков Л.Ф. Автоматический контроль температуры жидкого чугуна в литейном производстве. Киев: Наукова думка, 1978. 170 с.
22. Ono A. Methods for reducing emissivity effects. In «Theory and Practice of Radiation Thermometry», ed. by D.P. DeWitt and G.D. Nutter. New York: Wiley, 1988. P. 565—623.
23. Zhang J., Mei G., Zhao S., Xie Z. Effect of Firing Temperature on Mechanical Properties of Al_2O_3 -C Sensor for Continuous Measurement of Molten Steel Temperature. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54. Iss. 3. P. 553—558. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.553>
24. Ma J., Meng L., Liu Z., Zhao X. Rapid Identification of Liquid Steel Temperature in Tundish Based on Blackbody Cavity Sensor. *ISIJ International*. 2024. Vol. 64. Iss. 11. P. 1691—1698. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-499>
25. Sugiura M., Yamazaki T., Nakao R., Tanaka T., Nagata S., Kumazawa H., Tsubota E., Nagai W. Development of new technique for continuous molten steel temperature measurement. *Nippon Steel Corporation technical report No. 89*. Kimitsu: NSC Process Research Laboratories, 2004. P. 23—27.
26. Zhukov L., Petrenko D. Continuous Light-Guide Control of Melts Temperature in Induction Furnaces. *System Research in Energy*. 2024. Vol. 76. No. 1. P. 54—64. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.054>
27. Yamada Y., Ohsumi A., Yamanaka Z., Yamada T. Temperature measurement of molten metal by immersion-type optical fiber radiation thermometer. In «Proc. TEMPMEKO '96», ed. by P. Marcarino. Torino: Levrotto & Bella, 1997. P. 347—352.
28. Patent No. 11959813B2. USA, IPC G01K 13/00, G01K 13/02. Device and method for measuring a temperature of a molten metal / G. Neyens, C. Radelet, M. Indeherberge, F. Stevens. Appl. No. US17/303,174; appl. 21.05.2021; publ. 16.04.2024. URL: <https://patents.google.com/patent/US11959813B2/en> (дата звернення: 28.08.2025).
29. Cielo P.G., Krapez J-C., Lamontagne M., Thomson J.G., Lamb M.G. Conical-cavity fiber optic sensor for temperature measurement in a steel furnace. *Optical Engineering*. 1993. Vol. 32. Iss. 3. P. 486—493. <https://doi.org/10.1117/12.60857>
30. Grujić K. A Review of Thermal Spectral Imaging Methods for Monitoring High-Temperature Molten Material Streams. *Sensors*. 2023. Vol. 23. Iss. 3. 1130. <https://doi.org/10.3390/s23031130>
31. Патент на корисну модель № 63755. Україна, МПК G01J5/00. Спосіб вимірювання температури. / Жуков Л.Ф., Богдан О.В. Заявка № u201101044 від 31.01.2011; опубл. 25.10.2011, бюл. № 20. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/674541/> (дата звернення: 28.08.2025).
32. 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>

Надійшла 28.09.2025



REFERENCES

1. Zhukov, L. F. (1992). *Issledovanie i razrabotka metodov i sredstv temperaturnogo kontrolya i resursosberegayushchikh tekhnologicheskikh protsessov polucheniya zhidkogo chuguna v liteinomu proizvodstve* [Investigation and development of methods and means of temperature control and resource-saving technological processes of liquid cast-iron production in foundry engineering]. Dr. Tech. Sci. Thesis: spec. 05.11.04, 05.16.04. Institute of Foundry Problems of Academy of Sciences of Ukraine [in Russian].
2. Volodarskyi, Ye. T., Kukharchuk, V. V., Podzharenko, V. O., & Serdiuk, H. B. (2001). *Metrolohichne zabezpechennia vymiriuvan i kontroliu* [Metrological support of measurements and control]. Vinnytsia State Technical University [in Ukrainian].
3. 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>
4. Zrazhevskii, A. D., Nogovitsin, A. V., & Derbenev, D. V. (2017). VII Konferentsiya staleplavilshchikov Ukraini (obzor dokladov) [The 7-th Conference of Ukrainian Steelmakers (review of reports)]. *Metal and Casting of Ukraine*, 11-12(294-295), 53-59 [in Russian].
5. Prokhorov, A. V., Datla, R. V., Zakharenkov, V. P., Mikhaylov, O. M., Privalsky, V., Humpherys, T. W., Sapritsky, V., Parr, A. C., & Issaev, L. K. (2021). *Spaceborne Optoelectronic Sensors and their Radiometric Calibration. Terms and Definitions. Part 1. Calibration Techniques (NISTIR – 7203)*. NIST. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir7203.pdf>
6. Snopko, V. N. (1999). *Osnovi 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].
7. Araújo, A. (2017). Multi-spectral pyrometry – a review. *Measurement Science and Technology*, 28(8). 082002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa7b4b>
8. Hots, N. Ye. (2012). *Osnovni napriamy vdoskonalennia terminologichnoi bazy termometrii vyprominennia* [The main directions of improving the terminological base of radiation thermometry]. *Measuring Equipment and Metrology*, 73, 127-133 [in Ukrainian].
9. CCD vs CMOS: A Review of Sensor Technology. <https://www.csensor.com/ccd-vs-cmos>
10. Zhang, Z. M., Tsai, B. K., & Machin, G. (Eds.). (2009). *Radiometric Temperature Measurements I. Fundamentals*. Academic Press (Elsevier).
11. Zhang, Z. M., Tsai, B. K., & Machin, G. (Eds.). (2010). *Radiometric Temperature Measurements II. Applications*. Academic Press (Elsevier).
12. Poskachei, A. A., & Charikhov, L. A. (1978). *Pirometriya obektov s izmenyayushcheisya izluchatelnoi sposobnostyu* [Pyrometry of objects with changing emissivity]. Metallurgiya [in Russian].
13. Zhukov, L. F., & Bogdan, A. V. (2002). Investigation and elaboration of methods of multicolor optical thermometry. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 75(5), 1207-1212. <https://doi.org/10.1023/A:1021140313623>
14. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L., Bogdan, A. V., Krupnik, V. M., Krupnik, L. V., Pisarenko, V. H., & Kostanovskiy, V. V. (2012). *Innovatsionnyie tehnologii mnogotsvetovoy termometrii* [Innovative technologies of multicolour thermometry]. *Measuring Equipment and Metrology*, 73, 45-51 [in Russian].
15. Zhukov L. F., Kornienko A. L., Petrenko D. A., & Bogdan A. V. (2015). *Ustanovka dlya pretsizionnikh issledovaniy i graduirovki sistem mnogotsvetovoi pirometrii izlucheniya metallurgicheskikh obektov* [Set for precision investigations and calibration of the multiwavelength pyrometry systems of metallurgical objects]. *Casting processes*, 6(114), 55-59 [in Russian].
16. Svet, D. Ya. (1982). *Opticheskie metody izmereniya istinnikh temperatur* [Optical methods of true temperatures measurement]. Nauka [in Russian].
17. Ribaud, G. (1934). *Opticheskaya pirometriya*. [Optical pyrometry (translated from French by G. Landsberg and F. Landsberg)]. Gosudarstvennoe tekhniko-teoreticheskoe izdatelstvo [in Russian].
18. Heda, Ya. M., & Snopko, V. N. (1981). *Nekotore metody bikhromaticheskoi pirometrii* [Some methods of bichromatic pyrometry]. *High temperature*, 19(6), 1260-1265 [in Russian].
19. Gotz, N. E. (2007). The review of single-channel pyrometry. *Bulletin of ZhSTU. Series Technical Sciences*, 1(40), 95-100 <https://vtn.ztu.edu.ua/article/view/93996> [in Ukrainian].
20. Zhukov, L. F., & Petrenko, D. O. (2022). *Metody oposeredkovanykh vymiriuvan vyprominiuvanoi zdatnosti volframu i zalizovuhletsevykh splaviv* [Methods for indirect measurements of the emissivity of tungsten and iron-carbon alloys]. *Ukrainian Metrological Journal*, 1, 20-27. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258801> [in Ukrainian].
21. Chugunnii, Ye. G., & Zhukov, L. F. (1978). *Avtomaticheskii kontrol temperaturi zhidkogo chuguna v liteinomu proizvodstve* [Automatic control of liquid cast iron temperature in foundry production]. Naukova dumka [in Russian].
22. Ono, A. (1988). Methods for reducing emissivity effects. In «*Theory and Practice of Radiation Thermometry*», ed. by D. P. DeWitt and G. D. Nutter, 565-623. Wiley.

23. Zhang, J., Mei, G., Zhao, S., & Xie, Z. (2014). Effect of Firing Temperature on Mechanical Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ Sensor for Continuous Measurement of Molten Steel Temperature. *ISIJ International*, 54(3), 553-558. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.553>
24. Ma, J., Meng, L., Liu, Z., & Zhao, X. (2024). Rapid Identification of Liquid Steel Temperature in Tundish Based on Blackbody Cavity Sensor. *ISIJ International*, 64(11), 1691-1698. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-499>
25. Sugiura, M., Yamazaki, T., Nakao, R., Tanaka, T., Nagata, S., Kumazawa, H., Tsubota, E., & Nagai, W. (2004). Development of new technique for continuous molten steel temperature measurement. *Nippon Steel Corporation technical report No. 89*, 23-27.
26. Zhukov, L., & Petrenko, D. (2024). Continuous Light-Guide Control of Melts Temperature in Induction Furnaces. *System Research in Energy*, 76(1), 54-64. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.054>
27. Yamada, Y., Ohsumi, A., Yamanaka, Z., & Yamada, T. (1997). Temperature measurement of molten metal by immersion-type optical fiber radiation thermometer. In P. Marcarino (Ed.), «*Proc. TEMPMEKO '96*», 347-352. Levrotto & Bella.
28. Neyens, G., Radelet, C., Indeherberge, M., & Stevens, F. (2024). *Device and method for measuring a temperature of a molten metal*. Patent No. 11959813B2, USA, IPC G01K 13/00, G01K 13/02. United States Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US11959813B2/en>
29. Cielo, P. G., Krapez, J.-C., Lamontagne, M., Thomson, J. G., & Lamb, M. G. (1993). Conical-cavity fiber optic sensor for temperature measurement in a steel furnace. *Optical Engineering*, 32(3), 486-493. <https://doi.org/10.1117/12.60857>
30. Grujić, K. (2023). A Review of Thermal Spectral Imaging Methods for Monitoring High-Temperature Molten Material Streams. *Sensors*, 23(3), 1130. <https://doi.org/10.3390/s23031130>
31. Zhukov, L. F., & Bogdan, O. V. (2011). *Sposib vymiriuvannia temperatury* [Method for measurement of temperature]. Patent of Ukraine on utility model No. 63755, IPC G01J5/00. State Service for Intellectual Property of Ukraine. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/674541/> [in Ukrainian].
32. 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/istcmtm2025.02.018>

Received 28.09.2025

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 1

Radiation thermometry is the most suitable for continuous measurement of melts temperature. It is necessary for measuring control of their states during melting, as well as for energy-saving management of melting. For maximizing the probability of measuring control and increasing energy efficiency of melting, the task of melts temperature measurement uncertainty decreasing is relevant. If we use rational approach, the diversity of known monochromatic one- and two-color methods of radiation thermometry can be used to solve this task. These methods have been divided on two groups, depending on utilization of information about spectral emissivity of the object in their measurement models. The current work is devoted to the 1 group of radiation thermometry methods – those in which the correction for spectral emissivity of the object is not utilized. It is shown that the equality of the conditional and thermodynamic temperatures takes place for the thermodynamically equilibrium radiation of the absolutely black body, the spectral emissivity of which is identically equal to unity. Accordingly, the methods of one- and two-color radiation thermometry of the melts without correction for their emissivity are based on the assumption that the melts emit as the absolutely black body. It has been established that the empirical ways of temperature estimation of incandescent objects, including melts, by visual observation of their energy brightness and color historically appeared firstly. At the beginning of the last century, the 2 classical methods of monochromatic radiation thermometry in the visible wavelength range were originated from mentioned empirical ways. The other 6 conditional temperatures, which appeared later as a result of the development of the theoretical base of radiation thermometry have been joined in “non-classical” subgroup. Measurements models of conditional temperatures are considered. The 3 relationships between the values of the spectral emissivity of a “non-black” object at two wavelengths are presented, which provide the exclusion of systematic methodological errors of some two-color thermometry methods. The dependence of the spectral emissivity on the wavelength, which causes these relationships, is given. In practice, for “non-black” objects with essentially unstable emissivity, including melts, adequate conditions for the applicability of the considered methods (under which methodological error of them is excluded by definition) are implemented with the help of radiation normalization technologies. Operation principle of the 5 technologies is described and the list of their disadvantages is given. Considering the complexity and significant cost of these technologies, as well as the low methodological accuracy of temperature measurement by the considered methods of radiation thermometry without them, more metrologically advanced thermometry methods combined with the methods of measuring spectral emissivity are necessary for contactless temperature control of melts in metallurgy.

Keywords

Monochromatic one- and two-color radiation thermometry, thermodynamic and conditional temperature, melt, spectral emissivity, measurement model (equation), measurement uncertainty.