

## АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ БЕЗКОНТАКТНОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ

Орина Брао, 2014

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Здійснено порівняльну характеристику контактних та безконтактних засобів вимірювання температури з метою оцінки доцільності подальшого розвитку галузі безконтактної термометрії. Для виявлення основних чинників, що призводять до зниження точності засобів пірометрії, здійснено аналітичний огляд основних методів та засобів безконтактного вимірювання температури.*

*Проведена сравнительная характеристика контактных и бесконтактных средств измерения температуры для оценки целесообразности дальнейшего развития отрасли бесконтактной термометрии. Для определения основных факторов, приводящих к снижению точности средств пирометрии, осуществлен аналитический обзор основных методов и средств бесконтактного измерения температуры.*

*Comparative characteristics of contact and non-contact temperature measurement devices to assess the feasibility of further development of the field of noncontact thermometry was performed. To identify the main factors leading to reduced accuracy of pyrometry, analytical overview of the main methods and tools for non-contact temperature measurement was made.*

**Вступ.** Жодне наукове дослідження чи процес виробництва не може обійтися без вимірювань, без вимірювальної інформації. Безперечно, що без розвитку методів і засобів вимірювання прогрес у науці та техніці неможливий. Температурні вимірювання, зокрема, мають дуже важливе значення для подальшого прогресу наукових досліджень та розвитку пріоритетних галузей народного господарства, таких як хімічна, нафтохімічна, гірничо-металургійна промисловість, медицина, сільське господарство, машинобудування, транспорт, будівництво, медицина тощо. Особливу роль вони відіграють у розвитку порівняно нових галузей, таких як кріоенергетика, ядерна та космічна техніка, а це потребує постійного пошуку шляхів покращення відомих та створення нових засобів вимірювання температури з високими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Як показує проведений аналіз, найдоцільніше розвивати та широко впроваджувати безконтактні методи вимірювання, з огляду на їх специфіку, оскільки вони мають, зокрема, одну дуже важливу особливість – не спотворюють вимірювальну величину. Однак прогрес фундаментальних наукових досліджень у галузі безконтактної термометрії за останні кілька десятиріч є незначним. Все ще існує низка суттєвих невирішених проблем, вирішення яких дало б можливість підвищити

точність та метрологічну надійність безконтактних засобів вимірювання температури, що, своєю чергою, зробило б їх застосування ефективнішим.

**Постановка задачі.** Під час вимірювання температури контактними та безконтактними методами постає необхідність підвищувати точність вимірювання відповідно до прогресу сфер їхнього використання. Проаналізувавши всі методи вимірювання температури, визначено, що найбільшу увагу треба звернути на проблему точності вимірювання температури пірометрами спектрального відношення. Результатом вирішення має бути усунення впливу невизначеності значення показника випромінювальної здатності  $\epsilon$  та інших неінформативних впливних чинників на результат вимірювання температури пірометрами спектрального відношення. У статті обґрунтовано важливість вибору для досліджень саме цієї проблеми та запропоновано шляхи її вирішення.

**Контактні та безконтактні методи вимірювання температури – переваги та недоліки.** Існують два основних класи засобів вимірювання температури – контактні й безконтактні. Контактні основані на безпосередньому контакті первинного вимірювального перетворювача температури з досліджуваним об'єктом,

в результаті чого, в ідеальному випадку, має настати стан термодинамічної рівноваги перетворювача і об'єкта. Цьому способу притаманні певні недоліки: температурне поле об'єкта спотворюється, коли в нього вводять термоприймач; температура перетворювача завжди відрізняється від істинної температури об'єкта; верхня межа вимірювання температури обмежена властивостями матеріалів, з яких виготовлені температурні перетворювачі. Крім того, деякі завдання вимірювання температури в недоступних об'єктах та таких, що рухаються, не можна виконати контактним способом.

Контактним засобом вимірювання температури притаманні похибки, зумовлені, зокрема, зміною температури об'єкта внаслідок зміни його температурного поля внесеним термоприймачем, а також неминучим відведенням чи припливом тепла, зумовленим різницею температур термоприймача й об'єкта в результаті теплообміну термоприймача з навколишнім середовищем [1]. В усталеному тепловому режимі, коли температури об'єкта і термоприймача стабілізовані, ці похибки набувають статистичного характеру. За неусталеного теплового режиму додатково виникає динамічна похибка вимірювання, пов'язана з тепловою інерцією термоприймача. При цьому підвищення точності вимірювання температури досягається, зокрема, розробленням спеціальної методики, застосуванням прецизійнішого вимірювального обладнання та розробленням спеціальних конструкцій термоприймачів тощо.

Безконтактні засоби вимірювання температури ґрунтуються передусім на сприйнятті їх термоприймачем спектра енергії електромагнітного випромінювання, що його випромінює будь-яке тіло з температурою, вищою за абсолютний нуль.

Безконтактним засобом вимірювання температури притаманні, зокрема, похибки, пов'язані з тим, що фундаментальні фізичні закони, які є основою їх роботи, справджуються лише для абсолютно чорного тіла (АЧТ), від якого за властивостями випромінювання відрізняються всі реальні випромінювачі (тіла і середовища) [2]. Згідно із законом Кірхгофа будь-яке фізичне тіло випромінює енергії менше, ніж АЧТ, нагріте до тієї самої температури, як це показано на рис. 1. Тому безконтактні засоби для вимірювання температури, відградувані за чорним випромінювачем, під час вимірювання температури реального об'єкта покажуть іншу температуру, аніж його дійсна термо-

динамічна. Отже, точність вимірювання температури при цьому істотно залежить від адекватності відтворення умов градування та експлуатації безконтактних засобів.

Визначення температури об'єкта-випромінювача за вимірними характеристиками випромінювання описується законом Планка [3], який встановлює узагальнений зв'язок між спектральною густиною випромінювання, довжиною хвилі випромінювання і температурою випромінювача. З підвищенням температури зростає інтегральна енергія випромінювання АЧТ, а максимум спектра випромінювання зміщується в ділянку коротких довжин хвиль (рис. 2).

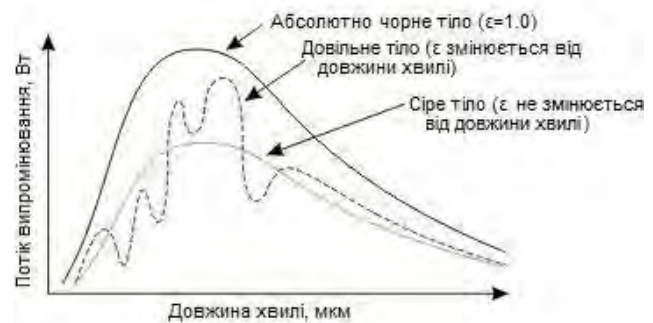


Рис. 1. Розподіл енергії в спектрі випромінювання АЧТ, «сірого тіла» і довільного тіла, якщо  $T = \text{const}$

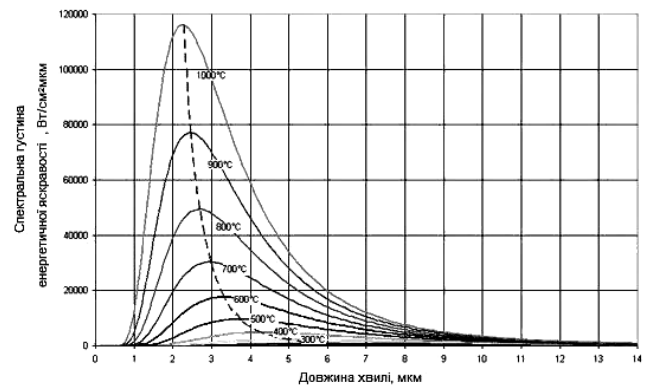


Рис. 2. Спектральна густина енергетичної яскравості АЧТ залежно від довжини хвилі за різних значень температур

На підставі аналізу цього закону можна виділити три основні напрями створення засобів визначення температури безконтактним способом. А саме: радіаційна, або ж інтегральна (повного випромінювання), пірометрія, що ґрунтується на використанні закону Стефана–Больцмана [3]; оптична пірометрія, яка базується на аналізі енергетичних характеристик монохроматичного випромінювання; пірометрія спектрального

відношення, основою якої є співвідношення Віна [3]. Отже, як показує проведений аналіз, згадані вище напрями пірометрії ґрунтуються на використанні часткових випадків закону Планка для АЧТ.

**Аналіз основних характеристик напрямів пірометрії – переваги та недоліки.** *Радіаційна пірометрія* ґрунтується, як відомо, на залежності температури від інтенсивності потоку електромагнітного випромінювання, отриманого від об'єкта вимірювання. На відміну від оптичної пірометрії та пірометрії спектрального відношення, у радіаційних пірометрах використовується теплова дія повного спектра випромінювання нагрітого тіла, включаючи як видиме, так і невидиме випромінювання. У зв'язку з цим радіаційні пірометри часто називають також пірометрами повного випромінювання.

Радіаційні пірометри застосовуються для вимірювання температур у діапазоні від  $-40$  °С до  $2500$  °С. Особливу перевагу над методами оптичної пірометрії та пірометрії спектрального відношення вони мають у разі безконтактного вимірювання невисоких температур, що стало можливим лише порівняно недавно, завдяки використанню нових ефективних методів та засобів охолодження їх теплоприймальних елементів. Наприклад, це вимірювання невисоких температур рухомих предметів. Також до переваг засобів радіаційної пірометрії можна зарахувати простоту конструкції, і, як наслідок, помірну ціну, високу надійність та компактність; наявність високої чутливості та роздільної здатності порівняно з вимірювальними засобами інших напрямів пірометрії.

Градування радіаційних пірометрів здійснюється з використанням АЧТ, в результаті чого вони дають інформацію про певну уявну, так звану "радіаційну", температуру, яка, безумовно, відрізняється від істинної термодинамічної температури. Ця відмінність пояснюється тим, що об'єкт вимірювання за радіаційними властивостями може значно відрізнятися від АЧТ. Адже показник випромінювальної здатності  $\varepsilon$  ідеального випромінювача (АЧТ) дорівнює одиниці, а для реальних тіл він може коливатись в межах від 0.01 до 0.99. Тому для визначення істинного значення термодинамічної температури за показами радіаційного пірометра треба вводити поправку, значення якої знаходять переважно урахуванням реального значення показника випромінювальної здатності об'єкта вимірювання, що доволі проблематично, оскільки значення

показника випромінювальної здатності  $\varepsilon$  є функцією багатьох неінформативних чинників та, зокрема, навіть самої вимірюваної температури [4]. Саме прямий безпосередній вплив показника випромінювальної здатності на результат вимірювання температури є основним недоліком радіаційних пірометрів, що істотно обмежує їх метрологічні характеристики.

Крім цього, радіаційні пірометри мають і інші недоліки, які впливають на точність вимірювання: залежність результатів вимірювання від відстані до вимірювального об'єкта, форми об'єкта, запиленості й загазованості проміжного середовища, наявності захисних стекол та непрозорих об'єктів у полі зору інформаційного каналу пірометра, імовірність бокових засвічень під час роботи поряд з великогабаритними високотемпературними об'єктами тощо. Саме тому користувачі все частіше звертаються до засобів пірометрії спектрального відношення, які дорожчі та складніші у використанні, але позбавлені перерахованих вище недоліків.

*Пірометрія спектрального відношення* полягає у вимірюванні, знову ж таки, певної уявної температури, так званої «колірної температури» об'єкта за відношенням інтенсивностей потоку випромінювання у двох певних ділянках спектра, кожна з яких характеризується певною ефективною довжиною хвилі. Такий принцип вимірювання температури дає змогу дещо зменшити негативний вплив на метрологічні характеристики пірометрів спектрального відношення згаданих вище недоліків, що притаманні радіаційним пірометрам.

Так, залежність сигналу від відстані до вимірюваного об'єкта однакова для обох приймачів пірометра спектрального відношення, тому на відношення сигналів вона не впливає; форма вимірюваного об'єкта, запиленість і загазованість проміжного середовища однаково впливають на сигнали з обох приймачів, залишаючи незмінним їх відношення [5]. Пірометри спектрального відношення нечутливі до бічного засвічення від великорозмірних об'єктів, наявності невеликих непрозорих об'єктів у полі зору пірометра, до наявності захисних стекол, наприклад стекол оглядових вікон у вакуумних камерах.

Основною перевагою пірометрів цього типу вважають те, що для прецизійного вимірювання термодинамічної температури немає потреби у точному визначенні значення показника випромінювальної здатності  $\varepsilon$  [6]. Інакше кажучи, оскільки відмінність

значення  $\epsilon$  вимірюваного об'єкта від одиниці найчастіше призводить до однакового зменшення сигналів від двох приймачів і, як зазначено вище, при цьому залишається незмінним їх відношення, що не впливає негативно на результат вимірювання.

Проте треба мати на увазі, що у разі застосування засобів пірометрії спектрального відношення є ризик появи високого значення похибки в тих випадках, коли об'єкт вимірювання характеризується селективним випромінюванням, тобто значення показника випромінювальної здатності  $\epsilon$  за тієї самої температури різко змінюється з довжиною хвилі.

**Проблематика пірометрії спектрального відношення. Пошук шляхів покращення метрологічних характеристик.** У пірометрів спектрального відношення є два основні суттєві недоліки, усунення яких зробить використання їх значно ефективнішим і виведе їх на новий рівень розвитку. Перший недолік – ціна. Пірометр спектрального відношення складніший від радіаційного, априорі складається з більшої кількості елементів, важче калібрується. Другим недоліком є те, що випромінювальна здатність вимірюваного об'єкта  $\epsilon$ , як зазначено вище, хоч і не безпосередньо, але впливає на результати вимірювання. Точніше, результат вимірювання пірометра спектрального відношення залежить не стільки від абсолютного значення випромінювальної здатності чи від її зміни від об'єкта до об'єкта, скільки від спектральної залежності  $\epsilon = f(\lambda)$  [7]. Для прикладу на рис. 3 наведено спектральні залежності випромінювальної здатності  $\epsilon_\lambda$  для деяких металів: *Fe*, *Ni*, *Cu*, *Ag*, *Co* [8]. Зауважимо, що вони характеризують більшість металів та їх сплавів.

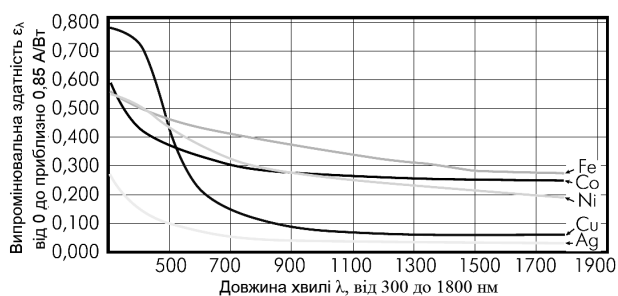


Рис. 3. Спектральні залежності випромінювальної здатності  $\epsilon_\lambda$  від довжини хвилі для деяких металів

Із рис. 3 видно, що всі залежності мають однотипний характер – зі збільшенням довжини хвилі спектральна випромінювальна здатність  $\epsilon_\lambda$  знижується.

Це призводить до того, що сигнал довгохвильового приймача пірометра спектрального відношення виявляється заниженим порівняно з короткохвильовим. З цієї причини покази пірометра спектрального відношення виявляються завищеними нерідко більш ніж на 10 %. Аналітично розрахувати значення похибки, викликані зниженням  $\epsilon_\lambda$ , можливо лише у випадку, якщо смуги пропускання приймачів дуже вузькі, не більше за 10–12 нм. Однак останнім часом переважна більшість пірометрів спектрального відношення використовує двошарові фотодіодні структури, верхній шар яких має максимальну чутливість у короткохвильовій області спектра, нижній – у довгохвильовій. Смуги спектральної чутливості цих приймачів – десятки і сотні нанометрів, що виключає похибку, зумовлену непостійністю  $\epsilon_\lambda$  [9]. Додамо, що інформація щодо  $\epsilon_\lambda$  для більшості матеріалів, температуру яких потрібно вимірювати, вкрай мізерна або зовсім відсутня. Саме з цих причин питання про корекцію показів пірометрів спектрального відношення під час вимірювання температури об'єктів з випромінювальною здатністю, що залежить від довжини хвилі, досі залишається невирішеним.

Також традиційно проблематичними для пірометрії, як радіаційної, так і спектрального відношення, досі залишаються вимірювання температури таких об'єктів, як напівпрозорі тіла з неоднорідною температурою, неплоскі тіла з нескладною геометрією, шорсткі поверхні, оптично тонкі поверхні.

Щоб покращити метрологічні характеристики пірометрів спектрального відношення, зокрема для вищезгаданих випадків, пропонується розрахувати оптимальну кількість каналів (довжин хвиль), на яких має здійснюватись вимірювання, щоб виключити або суттєво знизити вплив невизначеності значення показника випромінювальної здатності  $\epsilon$  та інших неінформативних впливних чинників на результат вимірювання температури.

**Висновки.** На основі проведеного аналітичного огляду контактних та безконтактних методів вимірювання температури, оцінки їх переваг та недоліків визначено, що пріоритет у подальшому прогресі та розвитку слід надати безконтактним методам температури. Це обґрунтовано тим, що вони мають певні переваги над контактними засобами, найсуттєвіша з яких – це те, що вони не спотворюють вимірювальну величину.

Проаналізувавши основні напрями розвитку пірометрії, виокремлено кілька проблем, вирішення яких дасть чималу користь у сфері використання безконтактних засобів вимірювання. Наїстотніша з них – усунення впливу на результат вимірювання спектральної залежності  $\varepsilon = f(\lambda)$  та інших впливних чинників, що підвищить точність вимірювання температури пірометрами спектрального відношення. Як варіант вирішення цієї проблеми запропоновано розрахувати оптимальну кількість довжин хвиль, на яких має здійснюватись вимірювання.

1. Температурные измерения: справочник / под ред. О.А. Герасенко. – К.: Наукова думка, 1989.
2. Dr. Alexander Dmitriyev. Laser pyrometry offers

*practical temperature measurement. Heat treating progress, may/june 2005. 3. Куинн Т. Температура / пер. с англ. – М.: Мир, 1985. 4. Michalski, L., Eckersdorf, K., Kucharski, J., & McGhee, J. (2001). Temperature Measurement Second Edition. West Sussex: John Wiley & Son Ltd. 5. Рибо Г. Оптическая пирометрия. – М.–Л.: ГТТИ, 1934. 6. Брамсон М.А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. Т.1. – М.: Наука, 1964. 7. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия (обзор) // Приборы и техника эксперимента, 2009. – № 4. 8. Фрунзе А. Пирометры спектрального отношения. Преимущества, недостатки, пути их устранения // Фотоника. – 4/2009. 9. Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974.*

УДК 004.652

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕТЕМПЕРАТУРНИХ ЧИННИКІВ НА ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБ'ЄКТА МЕТОДОМ КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА

© Юрій Кривенчук, Олег Сегеда, Ігор Микитин, Дмитро Ковальчук, 2014

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,  
вул. С. Бандери, 12, Львів-79013, Україна

*Досліджено залежність похибки вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла від відстані між досліджуваним об'єктом та приймачем відбитого випромінювання, а також від інтенсивності фонового випромінювання.*

*Проведено исследование зависимости погрешности измерения температуры методом комбинационного рассеяния света от расстояния между исследуемым объектом и приемником отраженного излучения, а также от интенсивности фонового излучения.*

*In the article research of temperature dependence error of measurement by Raman on the distance between the investigated object and the receiver of the reflected radiation, and the intensity of the background radiation..*

**Вступ.** Відстань між об'єктом дослідження та приймачем випромінювання спектрофотометра впливає на результати вимірювання спектра. Мінімально можливою є відстань, яка, з одного боку, дає змогу безперешкодно подати лазерне випромінювання на досліджуваний зразок, а з іншого – подати на детектор відбите від об'єкта випромінювання. У багатьох випадках під час наукових досліджень та у промисловості не завжди вдається працювати на оптимальній відстані між сенсором та об'єктом дослідження. Тому важливо провести дослідження впливу відстані між досліджуваним зразком та приймачем випромінювання

на похибку вимірювання температури методом комбінаційного розсіювання світла.

**Аналіз проблеми.** Сучасний розвиток мікропроцесорної техніки та технологій ставить високі вимоги до засобів термометрії, що приводить до потреби підвищення метрологічних характеристик наявних засобів, а також пошуку нових методів вимірювання температури. Одним з таких є метод комбінаційного розсіювання світла, що базується на температурній залежності інтенсивностей стоксової  $i_s$  та антистоксової  $i_{as}$  компонент розсіяного випромінювання,