

## АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ БЕЗКОНТАКТНОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ

© Брао Ірина, 2014

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

*Проведено 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. Ні в кого немає сумніву відносно того, що без розвитку методів і засобів вимірювання прогрес у науці і техніці неможливий. Температурні вимірювання, зокрема, мають дуже важливе значення у процесі подальшого прогресу наукових досліджень та розвитку пріоритетних галузей народного господарства, таких як хімічна, нафтохімічна, гірничо-металургійна промисловість, медицина, сільське господарство, машинобудування, транспорт, будівництво, медицина і т.д. 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, найбільшого розвитку та широкого впровадження заслуговують безконтактні методи вимірювання, з огляду на їх специфіку, оскільки вони мають, зокрема одну дуже важливу особливість – не спотворюють вимірювальну величину. Однак, що стосується безконтактної термометрії, то прогрес фундаментальних наукових досліджень у цій галузі за останні кілька десятиріч є незначним. По сьогоднішній день існує ряд суттєвих невіршених проблем, вирішення яких дало б можливість підвищити точність та метрологічну надійність безконтактних засобів вимірювання температури, що в свою чергу, зробило б їх застосування більш ефективним.

### Постановка задачі

При вимірюванні температури контактними та безконтактними методами постає необхідність підвищувати точність вимірювання згідно прогресу сфер їхнього використання. Проаналізувавши всі методи вимірювання температури, визначено що найбільшої уваги слід надати проблемі 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 обґрунтована важливість вибору для досліджень саме цієї проблеми та запропоновано шляхи її вирішення.

### Контактні і безконтактні методи вимірювання температури - переваги та недоліки

Існують два основних класи засобів вимірювання температури - контактні і безконтактні. Контактні - основані на безпосередньому контакті первинного вимірювального перетворювача температури з досліджуваним об'єктом, в результаті чого, в ідеальному випадку, має наступити стан термодинамічної рівноваги перетворювача і об'єкта. Цьому способу притаманні свої недоліки: температурне поле об'єкта спотворюється при введенні в нього термоприймача; температура перетворювача завжди відрізняється від істинної температури об'єкта; верхня межа вимірювання температури обмежена властивостями матеріалів, з яких виготовлені температурні перетворювачі. Крім того, ряд завдань вимірювання температури в недоступних об'єктах та таких, що рухаються, не може бути вирішений контактним способом.

Контактним засобам вимірювання температури властиві похибки, обумовлені, зокрема, зміною температури об'єкта внаслідок зміни його температурного поля внесеним термоприймачем, а також неминучим відведенням чи

притоком тепла, зобумовленим різницею температур термopриймача й об'єкта в результаті теплообміну термopриймача з навколишнім середовищем [1]. В усталеному тепловому режимі, коли температури об'єкта і термopриймача стабілізовані, ці похибки набувають статистичного характеру. При неусталеному тепловому режимі додатково виникає динамічна похибка вимірювання, пов'язана з тепловою інерцією термopриймача. При цьому підвищення точності вимірювання температури досягається, зокрема, шляхом розроблення спеціальної методики, застосування більш прецизійного вимірювального обладнання та розроблення спеціальних конструкцій термopриймачів і т.д..

Безконтактні засоби вимірювання температури, головним чином, базуються на сприйнятті їх термopриймачем спектру енергії електромагнетного випромінювання, що його випромінює будь-яке тіло з температурою вищою за абсолютний нуль.

Безконтактним засобам вимірювання температури властиві, зокрема, похибки, пов'язані з тим, що фундаментальні фізичні закони, які лежать в основі їх роботи, справджуються лише для абсолютно чорного тіла (АЧТ), від якого за властивостями випромінювання відрізняються всі реальні випромінювачі (тіла і середовища) [2]. Згідно закону Кірхгофа будь-яке фізичне тіло випромінює енергії менше ніж АЧТ, нагріте до тієї ж температури, як це показано на рис. 1. Тому безконтактні засоби для вимірювання температури, що відградувані по чорному випромінювачеві, при вимірюванні температури реального об'єкта покажуть іншу температуру, аніж його дійсна термодинамічна. Таким чином, точність вимірювання температури, при цьому, значним чином залежить від адекватності відтворення умов градування та експлуатації безконтактних засобів.

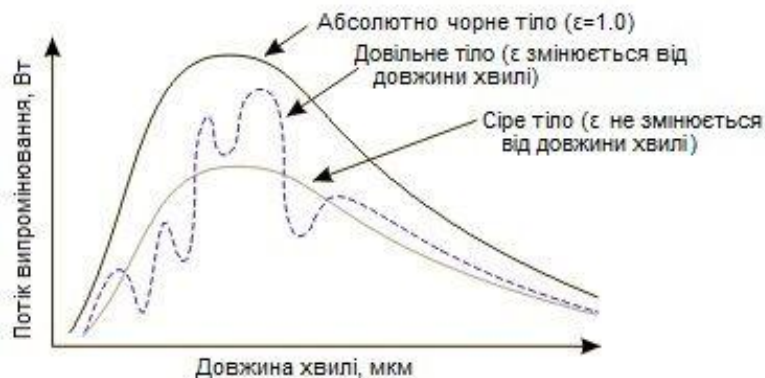


Рис.1. Розподіл енергії в спектрі випромінювання АЧТ, «сірого тіла» і довільного тіла при  $T = const$ .

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 спектру випромінювання зміщується в ділянку коротких довжин хвиль (рис. 2.).

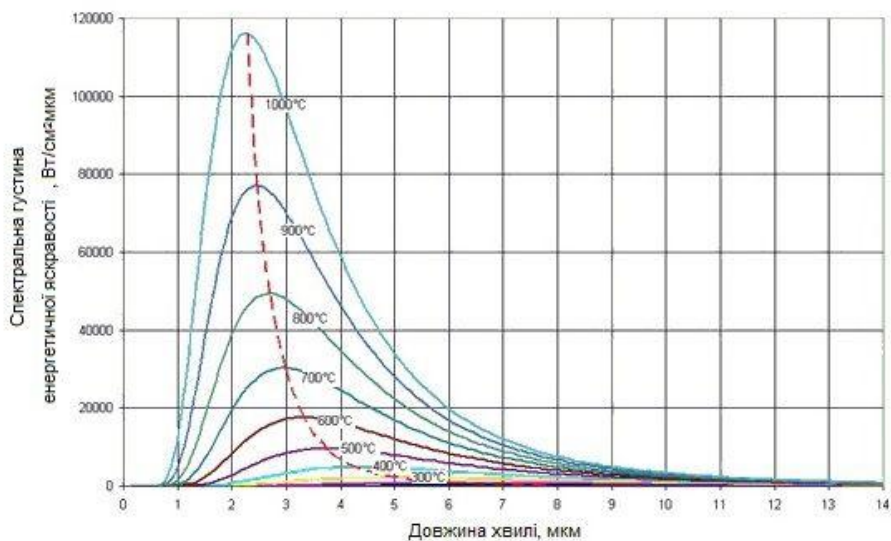


Рис. 2. Спектральна густина енергетичної яскравості АЧТ в залежності від довжини хвилі при різних значеннях температури.

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, в основі якої є співвідношення Віна [3]. Таким чином, 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 і пірометрії спектрального відношення, в радіаційних пірометрах використовується теплова дія повного спектру 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 в діапазоні від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $2500^{\circ}\text{C}$ . Особливу перевагу над методами оптичної пірометрії та пірометрії спектрального відношення вони мають при безконтактних вимірюваннях 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 віднести простоту конструкції, і, як наслідок, помірну ціну, високу надійність та компактність; наявність високої чутливості та роздільної здатності в порівнянні 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 різниця пояснюється тим, що об'єкт вимірювання за своїми радіаційними властивостями може значно відрізнятись від АЧТ. Адже показник випромінювальної здатності  $\epsilon$  ідеального випромінювача (АЧТ) рівний 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 слід вводити поправку, значення якої визначається, головним чином, шляхом врахування реального значення показника випромінювальної здатності об'єкта вимірювання, що є досить проблематично, оскільки значення показника випромінювальної здатності  $\epsilon$  є функцією багатьох неінформативних чинників та, зокрема, навіть і самої вимірюваної температури [4]. Саме прямий безпосередній вплив показника випромінювальної здатності на результат вимірювання температури - є основним недоліком радіаційних пірометрів, що суттєво обмежує їх метрологічні характеристики.

Крім цього, радіаційні пірометри мають ряд інших недоліків, які впливають на точність вимірювання: залежність результатів вимірювання від відстані до вимірювального об'єкта, форми об'єкта, запиленості і загазованості проміжного середовища, наявності захисних стекол та непрозорих об'єктів в полі зору інформаційного каналу пірометра, імовірність бокових засвічень при роботі поряд з великогабаритними високотемпературними об'єктами і т.д. Саме тому користувачі все частіше звертаються до засобів пірометрії спектрального відношення, які є більш дорогими і складнішими у використанні, але виключають вище перераховані недоліки.

*Пірометрія спектрального відношення* полягає у вимірюванні, знову ж таки певної уявної температури, так званої «колірної температури» об'єкта за відношенням інтенсивностей потоку випромінювання в двох певних ділянках спектру, кожна з яких характеризується певною ефективною довжиною хвилі. Такий принцип вимірювання температури дозволяє 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, при цьому, 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 даного типу слід вважати те, що для прецизійного вимірювання термодинамічної температури немає потреби у точному визначенні значення показника випромінювальної здатності  $\epsilon$  [6]. Іншими словами, оскільки відмінність значення  $\epsilon$  вимірюваного об'єкта від одиниці найчастіше призводить до однакового зменшення сигналів від двох приймачів, і як уже було сказано вище, при цьому залишається незмінним їх відношення, що й не має негативного впливу на результат вимірювання.

Проте, слід мати на увазі, що при застосуванні 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  $\epsilon$  при одній і тій же температурі різко змінюється з довжиною хвилі.

### Проблематика пірометрії спектрального відношення. Пошук шляхів покращення метрологічних характеристик

Існують два основних суттєвих недоліки пірометрів спектрального відношення, усунення яких зробить використання їх значно ефективнішим і виведе їх на новий рівень розвитку. Перший недолік - ціна. Пірометр спектрального відношення складніший від радіаційного, апіорі складається з більшої кількості елементів, важче калібрується. Другим недоліком є те, що випромінювальна здатність вимірюваного об'єкта  $\epsilon$ , як вже зазначалось 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 наведені спектральні залежності випромінювальної здатності  $\epsilon_\lambda$  для деяких металів: *Fe*, *Ni*, *Cu*, *Ag*, *Co* [8]. Слід відзначити, що вони характеризують більшість металів та їх сплавів.

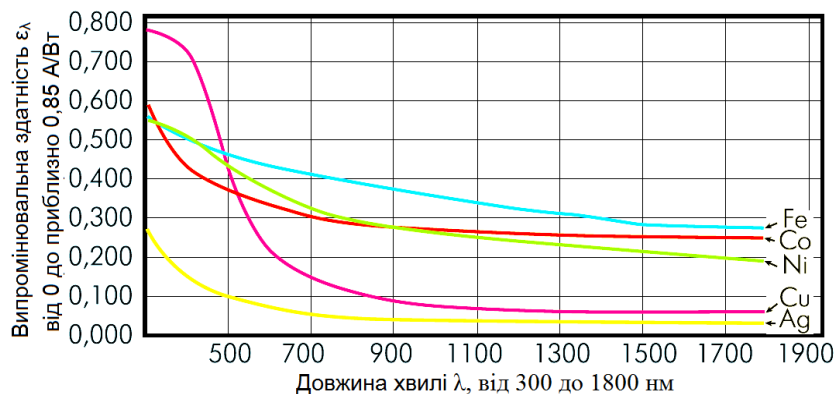


Рис. 3. Спектральні залежності випромінювальної здатності  $\epsilon_\lambda$  від довжини хвилі для деяких металів

Із рисунка видно, що всі залежності мають однотипний характер - з ростом 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 10-12 нм. Однак, останнім часом переважна більшість пірометрів спектрального відношення використовує двошарові фотодіодні структури, верхній шар яких має максимальну чутливість в короткохвильовій області спектра, нижній - в довгохвильовій. Смуги спектральної чутливості цих приймачів складають десятки і сотні нанометрів, що виключає похибку, яка обумовлена непостійністю  $\epsilon_\lambda$  [9]. Слід додати, що інформація по  $\epsilon_\lambda$  для більшості матеріалів, температуру яких потрібно вимірювати, вкрай мізерна або зовсім відсутня. Саме з цих причин питання про корекцію показів пірометрів спектрального відношення при вимірюванні 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 складною геометрією, шорсткі поверхні, оптично тонкі поверхні.

З метою покращення метрологічних характеристик пірометрів спектрального відношення, в тому числі для вище згаданих 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 ряд переваг перед контактними засобами температури, найсуттєвіша з яких - це те, що вони не спотворюють вимірювальну величину.

Проаналізувавши основні напрями розвитку пірометрії, виокремлено кілька проблем, вирішення яких принесе чималу користь у сфері використання безконтактних засобів вимірювання. Найсуттєвіша з них - усунення впливу на результат вимірювання спектральної залежності  $\epsilon = f(\lambda)$  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. Геращенко О.А. Киев: 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. Шейндлина А.Е. –М.: Энергия, 1974.