

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

УДК 532.536

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПРОБЛЕМ СТВОРЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОВИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

© Скоронад Пилип¹, Богдан Стадник^{1,2}, 2006

¹Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна

²Ряшівська політехніка, кафедра метрології та вимірювальних систем, Польща

Проаналізовано проблеми створення низькотемпературних теплових випромінювачів для пірометрії.

Анализируются проблемы создания низкотемпературных тепловых излучателей для пирометрии.

The problems of creation of low temperature thermal emitters for a pyrometry are analyzed.

Постановка проблеми. Необхідність та важливість температурних вимірювань у справі подальшого прогресу наукових досліджень і розвитку народного господарства України цілком очевидні і сумніву не підлягають. Однак, незважаючи на широку номенклатуру засобів вимірювання температури, що серійно випускаються сьогодні, за їхньою допомогою не вдається задовольнити комплекс вимог науки та народного господарства. Це підтверджується великою кількістю як суто наукових, так і прикладних робіт, скерованих на пошук можливостей удосконалення наявних та створення нових засобів термометрії з покращаними метрологічними і експлуатаційними характеристиками.

Отже, створення нових типів термометрів є актуальним завданням, вирішення якого необхідне для пришвидшення темпів розвитку науково-технічного прогресу, зокрема: в науці, техніці, медицині, екології тощо. Своєю чергою, вирішення цього питання неможливе без вирішення проблеми створення нових засобів відтворення температурних точок, в яких здійснюють їхнє градування чи верифікацію.

З погляду коректності метрологічного експерименту дуже важливо верифікувати термоперетворювачі чи й самі термометри в одному температурному джерелі у всьому діапазоні вимірюваних температур без перенесення їх з одних термодинамічних умов в інші. У цьому аспекті особливо актуальною є проблема створення єдиного економного

портативного засобу, призначеного як для відтворення температурних точок, так і для підвищення метрологічної достовірності градування та верифікації у широкому діапазоні температур, чого і стосується виконаний у роботі комплекс досліджень.

Аналіз стану дослідженості проблеми. З огляду на відсутність під час вимірювання температури таких складових методичної похибки, як конвективна та за рахунок теплопровідності, що є характерними для засобів контактної термометрії, – пірометрія є поза конкуренцією і має великі перспективи. Проте донедавна для вимірювання низьких температур пірометри широко не застосовували. Це обмеження пояснювалось певним значенням нижнього порогу температури (а саме температурою довкілля) самого теплочутливого елемента пірометра. Сьогодні внаслідок застосування в пірометрії результатів сучасних досліджень та новітніх технологій уможливилось безконтактно вимірювання низьких температур навіть портативними пірометрами, про що яскраво свідчить хоча б серія пірометрів фірми “Raytek” (табл. 1 [1]), а вітчизняний пірометр “Смотрич – М6П” має ще нижчу низькотемпературну межу вимірювання, яка становить мінус 35⁰С, що аж ніяк не є абсолютною межею низькотемпературного діапазону в пірометрії.










Відомо, що під час градування чи верифікації засобів вимірювання температури технічно найскладніше реалізувати низькотемпературні точки діапазону.

Як правило, цю процедуру здійснюють з використанням кількох, і до того ж різних (залежно від діапазону вимірювання), засобів реалізації температурних точок. Низькі температури реалізують в кріостатах із застосуванням реперних точок кипіння зріджених газів (зокрема, гелію, водню, кисню, азоту...), що потребує значних затрат часу й матеріальних ресурсів, або в холодильних агрегатах компресорного чи адсорбційного типу, що передбачає застосування прецизійного, громіздкого та дорогого обладнання, а здебільшого неприязних довкіллю холодоагентів (зокрема, фреону тощо).

Градуювання ж чи верифікація засобів пірометрії відбувається з використанням теплового випромінювання від моделі абсолютно чорного тіла (АЧТ). Реалізація ж низькотемпературного АЧТ пов'язана із ще значнішими метрологічними, технічними, а, отже, й економічними проблемами, повнота вирішення яких нині є недостатньою, про що свідчить доволі обмежений асортимент цих метрологічних засобів. До згаданих вище засобів належать, зокрема, модель АЧТ100/-40/40, реалізована на базі кріостата (табл. 2 [2]), випромінювач У-299 “Абсолютно чорне тіло” (табл. 3 [3]), а також серія випромінювачів (табл. 4 [4]).

Таблиця 1

**Серія пірометрів з низькотемпературною нижньою межею вимірювання
фірми “Raytek”**

	Mini Temp	ST Pro та ST Pro Plus			MX			Food Pro	3i
	Компактна серія	Професійна технічна діагностика			Технічна діагностика і аналітика		Фото-реєстратор	Харчова безпека	Високотемпературна спеціальна серія
									
	MT4	ST20	ST60	ST80	MX2	MX4+	MX6 Photo Temp	FP1	3i
Застосування	електродіагностика, автосервіс	електродіагностика, вентиляція, опалювання, кондиціонування, технологічне устаткування			профілактичне технічне обслуговування, реєстрація даних			харчова промисловість	виробництво скла, пластмас, металургія
Діапазон вимірювання, °С	-18...275	-32...535	-32...600	-32...760	-30...900	-30...900	-30...932	-30...200	-30...3000
Показник візування	8:1	12:1	30:1	50:1	60:1	60:1	60:1	2,5:1	до 180:1
Точність	2%	1%	1%	1%	0.75%	0.75%	0.75%	1°С	0.1%
Візор	одноточковий	одноточковий	одноточковий	одноточковий	круговий	круговий	круговий	підсвітка	лазерний, оптичний
Коефіцієнт випромінювальної здатності	0.95	0.95	регульований	регульований	регульований	регульований	регульований	0.95	регульований

Вибір напрямку досліджень. Як видно з наведених вище основних характеристик наявного обладнання, пірометрія потребує створення еталонних засобів відтворення теплового випромінювання, особливо у низькотемпературному діапазоні. Треба врахувати, що з аспекту коректності метрологічного експерименту засоби пірометрії також бажано було б верифікувати за одним джерелом випромінювання у всьому діапазоні вимірюваних температур.

Виконаний в роботі аналіз показав, що найдоцільніше, для оптимізації традиційної процедури верифікації чи градування засобів пірометрії, для реалізації низькотемпературних портативних моделей АЧТ використовувати модулі Пельтьє [5, 6], які дають змогу відтворювати як від'ємні, так і додатні температури у діапазоні від мінус 100 до 150 °С, не використовуючи прецизійного, складного і дорогого обладнання та матеріалів.

Таблиця 2

Низькотемпературна модель АЧТ 100/-40/40 на базі кріостата

Параметр	Значення
Діапазон відтворюваних температур, °С	-40...+40
Коефіцієнт випромінювальної здатності	0,99
Апертура, мм, не менше ніж	100
Довірча похибка при довірчій вірогідності 0,97	абсолютна $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Нестабільність температури, °С	0,1

Таблиця 3

Випромінювач У-299 “Абсолютно чорне тіло”

Параметр	Значення
Діапазон відтворюваних температур, °С	-20°С...+150°С
Довірча похибка відтворюваної температури з довірчою вірогідністю 0,95, К, не гірше за	0,6
Ефективний коефіцієнт випромінювальної здатності для довжин хвиль від 3 до 5 мкм і від 8 до 14 мкм, не менше ніж	0,95
Вихідна апертура, мм	90
Дискретність встановлення температури	1°С
Середній час встановлення робочого режиму випромінювача, год., не більше ніж	1,5
Споживана від мережі потужність, кВА, не більше ніж	5
Максимальна тривалість безперервної роботи випромінювача за нормальних кліматичних умов експлуатації, год, не менше за	12
Продування випромінювальної порожнини випромінювача сухим газом	автоматично
Габаритні розміри випромінювача, мм, не більше за	1200x800x1 350
Маса, кг, не більше ніж	120

Таблиця 4

Низькотемпературні моделі АЧТ

Номер моделі	Тип	Діапазон відтворюваних температур, °С	Діаметр апертури	Примітки
1	2	3	4	5
M340	Портативний	-20° ... 150°С	51 мм	Для температур нижче від температури довкілля
M310 M310MT	Портативний	від t° довкілля +10 °С ... 350°С	76 мм	Економна

Продовження табл. 4

1	2	3	4	5
M315 M315MT	Портативний	від t ° докiлля +10 °C ... 300°C	76 мм	З двох частин: одна з контрольними функціями, друга – для калібрування
M316	Портативний	від t ° докiлля +10 °C ... 300°C	57 мм	Для калібрування; застосовується на стаціонарному обладнанні
M320	З двома випромінювачами	від t ° докiлля +10 °C ... 300°C	76 мм	Калібрування здійснюється за двох різних температур

Аналіз теплової ефективності модуля. Ключовим елементом в таких джерелах теплового випромінювання є один або кілька модулів Пельтьє (залежно від необхідної мінімальної температури застосування). Безумовно, що здатність транспортування тепла залежить від розмірів та кількості елементів у модулі, але також залежить і від значення сили струму: чим більший струм, тим більше теплоперенесення. Однак, на жаль, струм не можна довільно збільшувати, оскільки виникають проблеми, пов'язані із все більшим негативним впливом ефекту Джоуля–Ленца. Оскільки елемент модуля має якийсь певний опір R , то на ньому під час протікання електричного струму I розсіюється певна потужність P :

$$P=I^2R. \quad (1)$$

У такому разі тепло Q_{J-L} виділяється незалежно від напрямку протікання струму (1), а перенесення тепла Q_{II} внаслідок ефекту Пельтьє, залежить від напрямку протікання струму (2):

$$Q_{II}=\pm\Pi I, \quad (2)$$

де Π – коефіцієнт Пельтьє, що, своєю чергою, визначається із залежності (3):

$$\Pi=\Delta\alpha T, \quad (3)$$

де $\Delta\alpha$ – різниця термоелектричних коефіцієнтів матеріалів, що контактують в самому модулі, T – температура.

Проблема полягає в тому, що модуль повинен транспортувати тепло не лише з холодної сторони на гарячу, але також повинен транспортувати на гарячу сторону ще й тепло Q_{J-L} , яке виділяється на сумарному опорі модуля внаслідок дії ефекту Джоуля–Ленца. Чим більше значення сили струму, тим інтенсивніше виділяється тепло на сумарному опорі модуля і тим менше корисного “зовнішнього тепла” транспортує модуль. За певного значення сили струму вся “теплова потужність” модуля використовується для відведення тепла, що виділяється внаслідок дії ефекту Джоуля–Ленца в самому модулі, а тоді модуль взагалі не виконує своєї ролі – не поглинає тепла на холодній

стороні. Це означає, що модуль Пельтьє, коли б не відзначалися в ньому втрати тепла від ефекту Джоуля–Ленца, був би ефективною тепловою помпою: на гарячій стороні виділялося б стільки тепла, скільки відбиралося б на холодній. Характеристика реального модуля показує, що не можна безмежно збільшувати робочого значення сили струму, який протікає через нього. Залежно від габаритів, матеріалу і геометричних параметрів елементів, існує певне оптимальне значення сили струму I_{opt} , за якого модуль транспортує найбільше тепла з холодної сторони на гарячу. Цього значення сили струму в жодному випадку не можна перевищувати, а варто працювати навіть за дещо меншого його значення.

Характеристика ж гарячої сторони буде іншою. Тут виділиться, поряд із транспортованим теплом, ще й тепло внаслідок дії ефекту Джоуля–Ленца. Так, кількість тепла, що виділяється на гарячій стороні, буде значно більшою, ніж на холодній, зокрема, при значенні сили струму I_{opt} , – приблизно втричі. Наочно це ілюструє рис. 1. На практиці це означає, що для реалізації охолоджувача необхідно ефективно відвести велику кількість тепла з гарячої сторони. Отже, модулі Пельтьє також можуть використовуватися ще і як ефективні нагрівачі. У такому разі, як це не парадоксально, їхній коефіцієнт корисної дії більший за 100%. Це не суперечить закону збереження енергії, оскільки на гарячій стороні виділяється не лише підведене тепло, але й також тепло, перепомповане з холодної сторони модуля.

Аналіз наявних конструкцій, на жаль, не показує всіх обмежень, пов'язаних з використанням модулів Пельтьє для конструювання термостатів. Якщо розглянути ситуацію, до певної міри уявну, коли температура з обох боків модуля однакова, а насправді така ситуація виникає лише на короткий час після увімкнення струму, то модуль ефективно транспортує тепло з однієї сторони на іншу. Проте під час роботи

модуля, зокрема, як холодильника – на холодній стороні температура зменшується, а температура його гарячої сторони – зростає. Отже, під час роботи модуля між гарячою і холодною сторонами виникає певна різниця температур. І тут проявляється вплив ще одного шкідливого явища. Оскільки елементи модуля виконані з матеріалів, які проводять тепло (йдеться про теплоперенесення в матеріалах, що завжди виникає там, де є градієнт температури), то це явище констатують після виникнення різниці температур між холодною і гарячою сторонами. Чим більша різниця температур між обома сторонами, тим, на жаль, більший шкідливий переплив тепла в “небажану”

сторону. Отже, мінімальна температура, якої можна досягти у випромінювальній порожнині низькотемпературного АЧТ на базі модулів Пельтьє, залежить від багатьох чинників, зокрема, від конструкції, якості теплоізоляції, а також ефективності відведення тепла з гарячої сторони. Попередні дослідження показали, що найефективнішим способом охолодження гарячої сторони, котрий дає можливість одержати в охолоджуваній камері температури, значно нижчі від нуля, – є водяне охолодження. Будь-які класичні радіатори, навіть з примусовим охолодженням за допомогою вентиляторів, дають значно гірші результати [7].

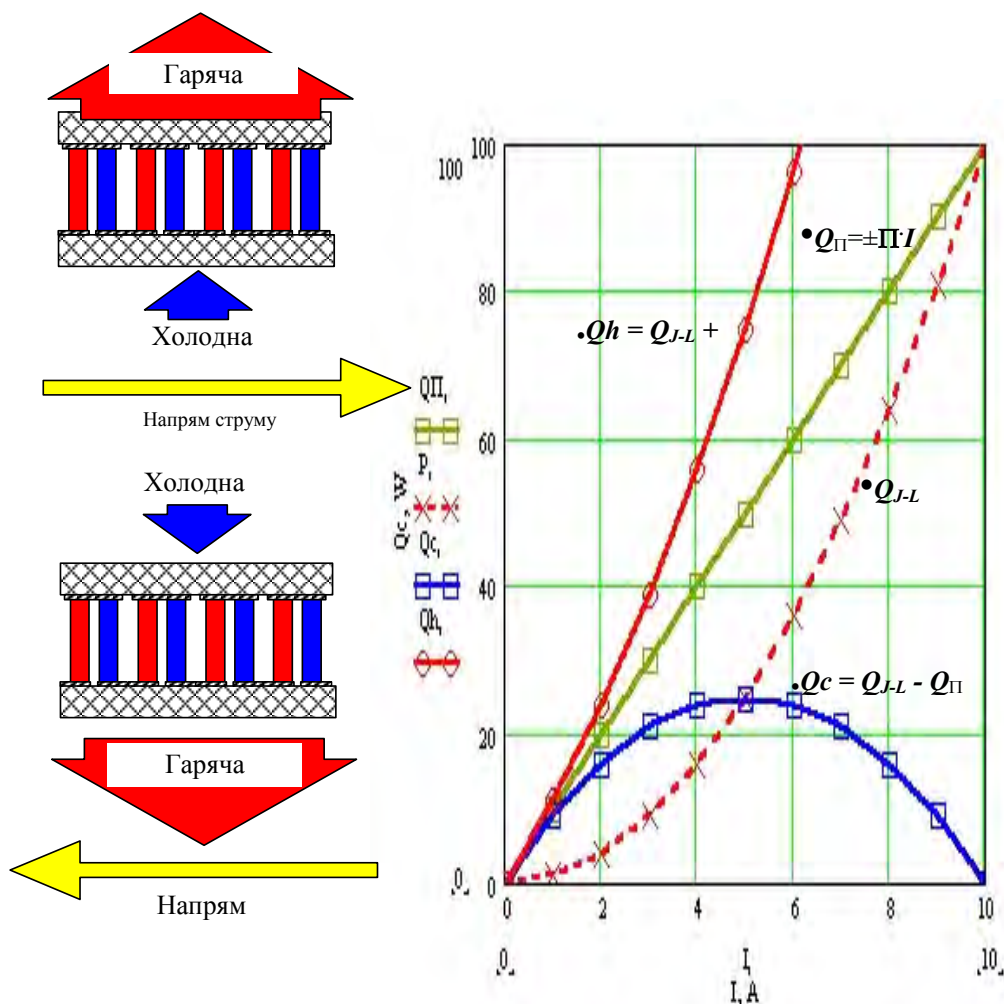


Рис. 1. Ефективність функціонування елемента Пельтьє в залежності від напрямку протікання та значення сили електричного струму; а – функціонування елемента Пельтьє в залежності від напрямку протікання та значення сили електричного струму; б – теплотворна здатність модуля Пельтьє залежно від напрямку протікання та значення сили робочого струму

Особливості реалізації низькотемпературних моделей АЧТ. На рис. 2 наведено схематичний розріз аналізованого теплообмінного пристрою з водяним охолодженням гарячої сторони, призначеного, зокрема, для градування чи верифікації первинних засобів безконтактного вимірювання температури на базі багатокаскадних елементів Пельтьє типу МІ6030*(ВС) фірми “Marlow Industries”.

Додатково варто зауважити, що для аналізованого теплообмінного пристрою досягнення оптимальних теплофізичних параметрів значною мірою залежить від якості теплоізоляції його робочої камери. Йдеться не лише про теплоізоляцію від довкілля, але й, що дуже важливо, також і про теплоізоляцію в околі самих модулів.

Проблеми застосування портативних моделей АЧТ. Широко використовувані засоби пірометрії часто мають показник візування (відношення діаметра поля вимірювання до відстані до об'єкта) в межах 1/20 ... 1/50 [8]. Для їхнього метрологічного забезпечення застосовують великогабаритні та енергомісткі моделі АЧТ. Так, модель АЧТ типу БІЧТ має діаметр

випромінювального отвору 45 мм та споживає приблизно 1000 А [9]. Хоча для переважної більшості найпоширеніших моделей АЧТ споживання струму в 10 ... 20 разів менше, але, тим не менше, для його стабілізації та регулювання необхідні складні та дорогі пристрої.

Застосування ж портативних моделей АЧТ на базі модулів Пельтьє допомагає подолати ці недоліки. Однак одним з недоліків таких моделей АЧТ є те, що вони не забезпечують градування пірометрів з показниками візування близько 1/50 і вище. Дійсно, первинні перетворювачі поширених пірометрів сумарного і часткового випромінювання встановлюють звичайно на відстані 1 м від об'єкта вимірювання. Для градування або верифікації первинного пірометричного перетворювача з показником візування 1/50 діаметр випромінювального отвору повинен бути не меншим, ніж 20 мм, що при малих габаритах АЧТ важко здійснити. Крім цього, в таких малогабаритних моделях АЧТ спостерігається інтенсивніша тепловіддача з торчаків (“крайові ефекти”).

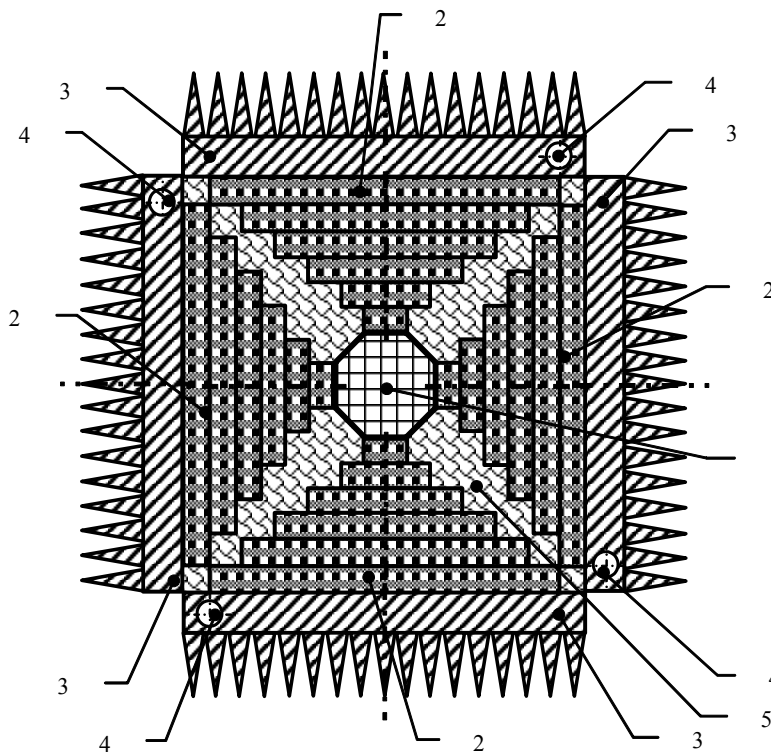


Рис. 2. Схематичний розріз низькотемпературної моделі АЧТ з водним охолодженням на базі багатокаскадних елементів Пельтьє: 1 – випромінювальна порожнина; 2 – багатокаскадний елемент Пельтьє; 3 – водоохолоджуваний радіатор; 4 – штуцер водяного охолодження; 5 – теплоізоляція

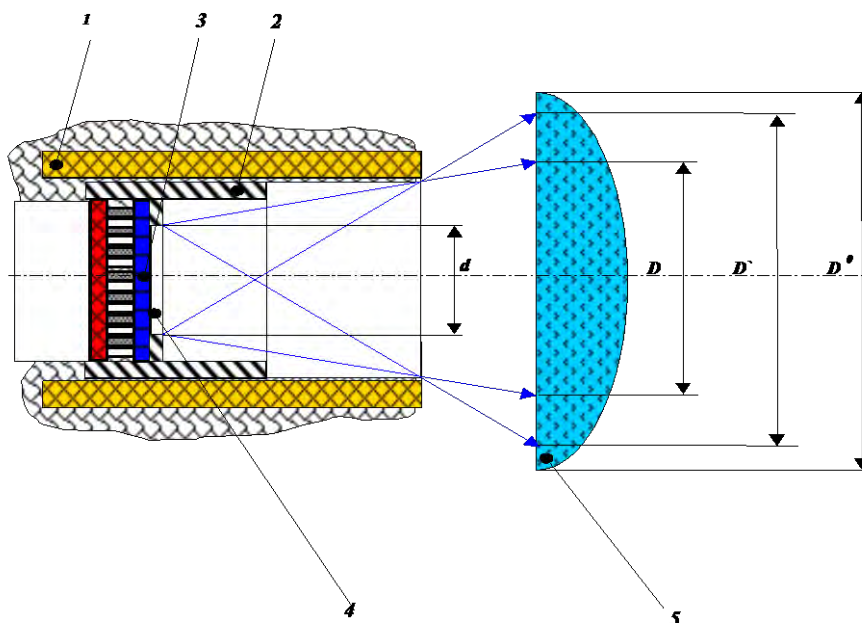


Рис. 3. Встановлення збиральної лінзи перед малогабаритною моделлю АЧТ

Щоб вирішити першу і основну проблему, пропонуємо встановити збиральну лінзу перед моделями АЧТ. Нехай в каналі 1 (рис. 3.) малогабаритної низькотемпературної моделі АЧТ розташований циліндр 2 з діаметром випромінювального отвору d . Температуру циліндра вимірюють термопарою типу ПП(S) (на рисунку не зображено), закріпленою в теплогенерувальному елементі 3. Перед тепловипромінювальним отвором 4 поміщена лінза 5 діаметром D^0 . Як видно з рис. 3, випромінюванням заповнена не вся лінза, а тільки її центральна частина діаметром $D > d$. Кільцева частина лінзи із зовнішнім діаметром D' і внутрішнім D заповнена випромінюванням частково.

Якщо відстань між лінзою та випромінювальним отвором менша від фокусної відстані лінзи, то спостерігач побачить уявне збільшене зображення отвору 3, енергетична яскравість якого дещо менша від енергетичної яскравості самого отвору в результаті поглинання в матеріалі лінзи та, що істотніше, відбивання на поверхнях розділу повітря – скло. Але якщо врахувати послаблення випромінювання, то за уявним зображенням можна градувати пірометри з показником візування більшим, ніж це можливо зробити без лінзи.

Розглянемо детальніше деякі особливості застосування лінз. Якщо малогабаритна модель АЧТ є тільки джерелом випромінювання (тобто для градування або верифікації вибираємо зразковий

пірометр, який візується на модель по чергово із досліджуваним пірометром), то поглинання лінзою можна не враховувати. Важливо тільки визначити межі діючого спектрального інтервалу матеріалу лінзи та пірометра (тобто його пірометричного перетворювача – сенсора пірометра). Але якщо модель АЧТ використовуємо як взірцевий випромінювач і температуру встановлюємо за вмонтованою в модель АЧТ термопарою, то для розрахунку поправок на послаблення випромінювання лінзою необхідно знати ефективну довжину хвилі пірометра λ та коефіцієнт пропускання лінзи τ . Температуру T' , що приписуємо випромінюванню, яке пройшло через лінзу, визначаємо із залежності:

$$1/T' = 1/T + [\lambda/c_2] \ln 1/\tau, \quad (4)$$

де T – температура, виміряна термопарою, $c_2 = 14388$ мкм·К – друга стала закону Планка.

Ефективна довжина хвилі пірометра зазвичай відома. Коефіцієнт пропускання можна визначити експериментально за допомогою спектрофотометра або заздалегідь відградуйованого пірометра з такою самою ефективною довжиною хвилі.

Матеріалом для виготовлення лінз зазвичай може слугувати оптичне скло або плавлений кварц. Самі ж лінзи, як правило, достатньо тонкі, так що поглинанням в матеріалі можна знехтувати. У такому разі розраховуємо коефіцієнт пропускання лінзи із урахуванням із залежності:

$$\tau = [1 - ((n-1)/(n+1))^2]^2, \quad (5)$$

де n – показник заломлення матеріалу лінзи при цій довжині хвилі.

Що ж стосується уникнення впливу “крайових ефектів”, то цю проблему доцільно вирішувати, видовжуючи торчакові частини моделі АЧТ металевими циліндрами, що перешкоджають утворенню повітряних потоків.

Висновки. Дослідження підтверджують можливість створення малогабаритних низькотемпературних та економних моделей АЧТ на базі елементів Пельтье для градування і верифікації засобів пірометрії та окреслюють напрями її реалізування. Перспективним видається широке впровадження таких моделей АЧТ в регіональних центрах стандартизації та метрології чи

підприємствах, що випускають пірометри, пірометричні системи та інші безконтактні засоби вимірювання параметрів теплового випромінювання.

1. <http://www.raytek.com>.
2. <http://www.omsketalon.ru>.
3. <http://www.mikroakustika>.
4. <http://www.diagnost.ru>.
5. Malek Z., Strajblova J. Konstrukce referencniho spoje termoclanku pro velmi presna mereni teploty. // Cs. Cas. fys., №18, 1968, s. 95.
6. Roth H., Walz H. Nullpunkt-Thermostat fur Thermoelemente // Siemens-Zeitschrift, v. 41, №6, s. 539.
7. Ананичук Л.І., Луцке О.Я., Вихор Л.М., Місава К., Сузукі Н. Комп'ютерні методи оптимізації холодильників // Термоелектрика, №3, 2002, с. 17 – 25.
8. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М., 1971.
9. Шпигельман Е.С., Ивенский С.Н., Шишкина И.И. Методы обеспечения единства измерений в области пирометрии излучения // Труды метрологических институтов СССР, 1975. – Вып. 183(243).

УДК 536.2:536.3:536.6:629.7:697.34

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОГО КОМПАРИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

© Декуша Леонид, Грищенко Татьяна, Менделеева Татьяна, 2006

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, 03057, г.Киев, Украина

Розроблено теоретичні засади, надано практичні рекомендації щодо проектування радіаційних компараторів для передавання одиниці густини теплового потоку робочим засобам. Сформульовано вимоги до еталонних перетворювачів теплового потоку. Наведено описання установки ІТТФ НАН України для метрологічної атестації та періодичних перевірок перетворювачів теплового потоку.

Разработаны теоретические основы и даны практические рекомендации по проектированию радиационных компараторов для передачи единицы плотности теплового потока рабочим средствам. Сформулированы требования, предъявляемые к эталонному преобразователю теплового потока. Приведено описание установки ИТТФ НАН Украины для метрологической аттестации и периодических поверок рабочих преобразователей теплового потока.

Theoretical bases are developed, and practical recommendations on designing radiating comparators for transfer of heat flux density unit to working means are given. The requirements to the certified reference heat flux sensors are formulated. The description of IET NAS of Ukraine device for metrological certification and periodic verifications of working heat flux sensors is resulted.

Градуировка любого преобразователя теплового потока сводится к измерению нормированного теплового потока или его плотности. Из трех основных видов теплообмена – конвекции, кондукции и теплового излучения – последние два лучше всего поддаются эталонированию. В связи с этим теплоточная градуировка по способу подведения тепловой энергии к градуируемому преобразователю теплового потока (ППП) является радиационной или кондуктивной независимо от способа отведения теплоты [1].

При всех достоинствах кондуктивного способа подведения тепловой энергии (в метрологических установках) у него есть ограничения: площади соприкасающихся поверхностей источника теплоты, градуируемого ППП и стока теплоты должны быть одинаковыми, поверхности ППП должны быть плоскопараллельными и очень тщательно обработанными, а термическое сопротивление однородно по всему ППП. Если невозможно выполнение этих требований, используется метрологическая установка с