

ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ МЕТРОЛОГІЇ

ДНВО "МЕТРОЛОГІЯ"

На правах рукопису

ПОЛЕВОЙ ВІКТОР ІВАНОВИЧ

УДК 535.214.04

РОЗРОБКА І СТВОРЕННЯ ВИСОКОТОЧНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ
СИСТЕМ НА БАЗІ АБСОЛЮТНОГО СФЕРИЧНОГО ПОРОЖНИННОГО
ПРИЙМАЧА ІНТЕНСИВНИХ ПОТОКІВ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Спеціальність: 05.11.15 - Метрологія і метрологічне
забезпечення

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків -1993

АВ 29.203

Працю виконано в Харківському державному науково- виробничому об'єднанні "Метрологія"

Науковий керівник: к.ф.-м.н., старший науковий співробітник
Назаренко Л.А.

Офіційні опоненти: д.т.н., професор Соловйов В.С.
д.ф.-м.н., старший науковий співробітник
Кокодій М.Г.

Провідна установа: ІПЕ АН України

Захист відбудеться " 18 " березня 1994 р. о 15 годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 041.08.01 при Харківському державному науково- виробничому об'єднанні "Метрологія" за адресою: 310078, Харків, вул. Миросицька, 40.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці об'єднання.
Автореферат розіслано " 7 " лютого 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, к.т.н. *Купко* Купко В.С.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка

00756704 (Т)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРАЦІ

Актуальність теми досліджень. Високоточні вимірювання енергетичних характеристик інтенсивного теплового випромінювання здобувають все більше практичне значення у зв'язку з широким використанням даної області вимірювань в найперспективніших напрямках науково-технічної діяльності, таких як: енергетика, металургія, ракетно-космічна техніка, авіа- і судобудування, а також при розробці енергозберігаючих і екологічно чистих технологій і систем.

Аналіз сучасних структурно-функціональних систем радіометрії і фотометрії дозволяє зробити висновок, що найточнішим засобом вимірювання густини теплового випромінювання є порожнинні радіометри, які реалізують метод електричного заміщення.

Розробка і впровадження нових методів реалізації процедури заміщення на базі сферичного порожнинного приймача випромінювання, які дозволяють мінімізувати методичну похибку вимірювань і підвищити точність радіометричних систем, є головним об'єктом дослідження даної дисертаційної праці.

Актуальність вказаної теми пов'язана з тим, що як в Україні, так і в межах СНД не існує державного еталону для вимірювання інтенсивного теплового випромінювання (понад 10^3 Вт/м²), в той час як відповідний парк вимірювальних засобів постійно збільшується з одночасним зростанням вимог до їх точності.

У зв'язку з цим, а також з тим, що існуючі відомчі локальні перевірочні схеми не здатні забезпечити єдності вимірювань потоків великої інтенсивності, виникла потреба у створенні установки вищої точності для відтворення одиниці густини теплового радіаційного потоку в діапазоні 10^3 - 10^6 Вт/м².

Розробка цієї установки базувалася на попередніх теоретичних та експериментальних дослідженнях різних типів сферичних порожнинних

радіометрів (типу ШРК і СРР), що використовувались в радіометричних системах відомчого призначення. Набутий досвід, а також наявна технічна база дозволили розробити нову модель сферичного порожнинного радіометра (СРР-8) і відповідний спосіб вимірювань, які стали основою створення вказаної вище установки (УВТ 72А91) і забезпечили її високі точнісні характеристики.

Мета дисертаційної праці. Метою праці є розробка і впровадження в практику метрологічного забезпечення нових засобів прецизійних вимірювань енергетичної освітленості (густини) теплового випромінювання великої інтенсивності на базі сферичного порожнинного радіометра і створення на цій основі високоточних радіометричних систем.

Задачі і методи дослідження. Реалізація мети дослідження викликала потребу розглянути такі взаємопов'язані науково-технічні задачі як теоретичного, так і експериментального характеру :

1. Розв'язання крайових задач теплопровідності з визначенням температурного поля абсолютного сферичного порожнинного радіометра оригінальної конструкції, який має кусково-однорідний характер поглинання випромінювання внутрішньої стінки порожнини і працює в умовах конвективно-радіаційного або радіаційного теплообміну.

2. Визначення коефіцієнту поглинання вказаної моделі радіометра і відносного розподілу густини випромінювання, що поглинається.

3. Розробка методів визначення основних складових систематичної похибки сферичних порожнинних радіометрів за однотермопарного і гетотермопарного способу реєстрації ступеня їх нагрівання.

4. Дослідження впливу радіаційної і конвективної складових ефективного коефіцієнту тепловіддачі СРР-8 на ступінь лінійності його градувальної характеристики і методичну похибку вимірювань.

5. Розробка оригінальних експериментальних засобів визначення функції відносної опроміненості внутрішньої стінки порожнини радіо-

метра, а також відносного розкиду значень термічного опору окремих термопар, що рееструють його нагрів.

6. Дослідження оптико-фізичних характеристик матеріалів, використаних в конструкції СПР-8, з метою реалізації такої конструкції радіометра, яка б забезпечувала кусково-однорідний характер поглинання з заданим співвідношенням значень зональних коефіцієнтів.

7. Введення поняття "критерій еквівалентності" радіаційної і електричної потужності і розробка способів оптимізації вказаного критерію за допомогою спеціального математичного алгоритму і програми автоматичного керування процесом вимірювань на основі використання комп'ютерно-вимірвальної системи.

Наукова новизна праці полягає у тому, що в ній вперше:

1. На основі аналітичного розв'язання лінійної і чисельно-аналітичного розв'язання нелінійної крайових задач теплопровідності розроблено і впроваджено у практику метрологічної атестації оригінальні методи теоретичного аналізу основних складових методичної похибки вимірювань різних моделей сферичних порожнинних радіометрів, які реалізують метод електричного заміщення.

2. Розроблено і впроваджено у взірцевих установках відомчого призначення, а також в УВТ 72А91 новий спосіб вимірювання густини однорідних стаціонарних потоків теплового і лазерного випромінювання, який дозволяє мінімізувати основну методичну похибку радіометрів типу ШРК і СПР, пов'язану з неоднорідністю їхньої зонної характеристики, шляхом оптимізації координат розташування чутливого елемента в залежності від величини попередньо виміряного кута розбігу потоку випромінювання всередині приймальної порожнини радіометра.

3. Розроблено, створено і впроваджено в УВТ 72А91 нову конструкцію абсолютного порожнинного приймача високоінтенсивних потоків випромінювання (СПР-8), яка дозволяє істотно (більше ніж у 3 рази)

зменшити систематичну похибку вимірювань теплових потоків випромінювання в діапазоні 10^3 - 10^5 Вт/м² порівняно з раніше використовуваними моделями.

Головною особливістю СПР-8 є конструкція приймального елемента, яка має кусково-однорідний характер поглинання випромінювання внутрішньою стінкою порожнини і оптимальне співвідношення значень зональних коефіцієнтів поглинання, що мінімізує методичну похибку, пов'язану з нееквівалентністю температурних полів радіометра в режимах опромінювання і заміщення.

Важливою особливістю СПР-8 є також конструкція блоку термоіндикації, яка дозволяє шляхом підімкнення термопар до вхідних каналів КВС здійснювати реалізацію процедури заміщення за допомогою квадратури Гауса, яка має найвищий алгебраїчний порядок точності.

4. Розроблено і впроваджено в УВТ 72А91 новий спосіб вимірювань теплового і лазерного випромінювання, який дозволяє шляхом одночасної обробки показів термопар за заданим алгоритмом здійснювати процес вимірювань на основі такого критерію еквівалентності радіаційної і електричної потужності, який є адекватним реальному характеру тепловіддачі радіометра в навколишнє середовище.

Підвищення точності вимірювань при використанні даного способу досягається як за рахунок вибору оптимального для відповідного теплообміну критерію еквівалентності, так і за рахунок застосування високоточних формул чисельного інтегрування.

5. Запропоновано новий спосіб вимірювання потужності теплового і лазерного випромінювання і пристрій для його реалізації, які дозволяють здійснювати безконтактний контроль за потужністю тепловіддачі приймального елемента радіометра і тим самим виключати похибки, пов'язані з використанням контактних способів термоіндикації.

6. Розроблено і практично реалізовано оригінальний математичний

алгоритм, який дозволяє автоматизувати процес вимірювань на основі нових високоточних способів реалізації процедури заміщення.

7. Шляхом дослідження оптико-фізичних характеристик матеріалів, використовуваних в конструкції СПР-8, визначено функцію відносного розподілу густини поглинутої потужності по внутрішній стінці приймального елемента СПР-8 і коефіцієнт поглинання радіометра.

8. Проведено аналіз залежності ступеня лінійності градуувальної характеристики радіометра від виду тепловіддачі і для випадку радіаційного теплообміну здійснено лінеаризацію вказаної характеристики.

9. З використанням регіонально-структурного методу розв'язання нелінійних крайових задач теплопровідності одержано залежність локальних коефіцієнтів радіаційного теплообміну і основної методичної похибки сферичного порожнинного радіометра від потужності і апертурного кута випромінювання. Проведено порівняння з лінійним наближенням і визначено межі його застосування.

10. На основі здійснених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено, створено, атестовано і впроваджено в експлуатацію установку вищої точності для відтворення одиниці густини теплових радіаційних потоків в діапазоні 10^3 - 10^6 Вт/м², яка дозволяє відтворювати одиницю густини потоку теплового випромінювання з невилученою систематичною похибкою не більшою ніж 0.4% за надійної ймовірності 0.95.

Основні положення, які виносяться на захист:

1. Найбільшу точність відтворення одиниці густини інтенсивного теплового випромінювання забезпечують радіометричні системи, що ґрунтуються на використанні абсолютних порожнинних приймачів випромінювання, в яких реалізується метод електричного заміщення (зокрема, оптимізовані моделі сферичних порожнинних радіометрів).

2. Високі точносні характеристики нових моделей сферичних поро-

жнінних радіометрів забезпечуються шляхом такої оптимізації конструкції приймального елемента та способу вимірювань, яка, з одного боку, максимально враховує конкретні особливості системи "компаратор-приймач випромінювання", а з іншого - здійснює автоматичне керування процесом вимірювань за допомогою КВС на основі найточніших критеріїв еквівалентності радіаційної та електричної потужності (стосовно реальних умов опромінення і теплообміну).

3. Застосування указаних засобів та способів вимірювань при роботі УВТ 72 А 91 дало можливість зменшити головну складову методичної похибки вимірювань, пов'язану з нееквівалентністю температурних полів, до 0,1% і на цій основі забезпечити загальну невилучену систематичну похибку на рівні 0,4% в усьому енергетичному діапазоні використання УВТ.

4. Використання на базі КВС нового способу вимірювань, який забезпечує алгоритмічну обробку показів термоіндикаторів нагріву приймального елемента за найточнішими формулами чисельного інтегрування (зокрема, квадратурної формули Гаусса) відкриває додаткові, досі не використані можливості значного підвищення точності реалізації процедури електричного заміщення для будь-яких типів радіометричних систем, які засновані на методі електричного заміщення.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що на їх основі стало можливим створення високоточних радіометричних систем, які мають метрологічні характеристики, близькі до існуючого світового рівня і здатні забезпечувати єдність і високу точність відтворення і передачі одиниці густини інтенсивних потоків теплового випромінювання підлеглим засобам метрологічного забезпечення.

На базі результатів, які одержано в праці, зараз в ІНПЮ "Метрологія" створюється державний спеціальний еталон одиниці енергетичної освітленості некогерентного випромінювання.

Апробація праці.

Основні результати праці доповідалися на :

- II Міжнародному форумі по тепломасообміну (Мінськ, 1992).
- трьох Всесоюзних науково-технічних семінарах " Теплові приймачі випромінювання " (Москва, 1986, 1988, 1990).
- трьох Всесоюзних науково-технічних конференціях " Фотометрія і її метрологічне забезпечення " (Москва, 1984, 1986, 1988).
- двох Всесоюзних науково-технічних конференціях " Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань в області високих температур " (Харків, 1986, 1990).
- Всесоюзній науково-технічній конференції " Метрологія і стандартизація в НТР " (Новосибірськ, 1989).
- Всесоюзній науково-технічній конференції " Метрологічне забезпечення вимірювань високих температур і параметрів плазми " (Харків, 1979).
- Всесоюзній науковій конференції " Методи і засоби машинної діагностики газотурбінних двигунів і їхніх елементів " (Харків, 1980).
- Республіканській науково-технічній конференції " Сучасний стан теплофізичного приладобудування " (Севастополь, 1989).

Повнота опублікування. Основні наукові результати, висновки та рекомендації дисертаційної праці наведено в 32 наукових публікаціях, в тому числі в 11 статтях у всесоюзних та республіканських науково-технічних журналах і збірках і в 6 авторських свідоцтвах на винаходи (список головних праць подається в кінці реферату).

Структура і обсяг дисертації. Праця складається зі вступу, чотирьох глав, висновку, списку літератури з 120 найменувань. Дисертація містить 183 сторінок основного тексту, 47 малюнків, 9 таблиць.

Впровадження результатів.

Результати дисертації впроваджено в ДНВО "Метрологія" (м.Хар-

ків), Інституті технічної теплофізики АН України (м.Київ), Науково-дослідному інституті вимірjuвальної техніки (м.Калінінград, Московської області). Впровадження підтверджено відповідними Актами.

ЗМІСТ ПРАЦІ.

У вступі обгрунтовано актуальність теми досліджень, визначено мету і задачі дисертаційної праці, сформульовано основні наукові твердження, подані до захисту.

Першу главу присвячено аналізу методів і засобів прецизійних вимірювань енергетичної освітленості і вибору напрямку досліджень. Розглянуто різні типи порожнинних приймачів теплового і сонячного випромінювання, здійснено порівняння їх точнісних характеристик.

Зроблено оцінку переваг і недоліків застосування методу еталонного приймача порівняно з методом еталонного джерела. Показано, що при вимірюванні інтенсивних потоків теплового випромінювання використання еталонних приймачів має більшу перевагу, бо вони забезпечують вищі точнісні характеристики і, крім того, є значно простішими в технічному виконанні і експлуатації.

Другу главу дисертації присвячено дослідженню температурних полів і основних складових методичної похибки сферичного порожнинного радіометра.

Розглядається постановка і розв'язання тривимірної крайової задачі теплопровідності, яка враховує кусково-однорідний характер поглинання випромінювання різними ділянками внутрішньої стінки приймального елемента радіометра, а також те, що реальний розподіл опроміненості порожнини радіометра в загальному випадку являє собою функцію двох змінних $E(x, \varphi)$, де $x = \rho \cos \theta$, а значення θ обмежені максимальним полярним кутом θ_0 .

Задача розв'язується у припущенні дифузного характеру розсіювання, причому нелінійний характер теплообміну, викликаний зміною ефе-

ктивного коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}$ в міру зміни густини випромінювання, враховується за допомогою ітераційного методу Ньютона.

Розрахунки температурного поля та функції розподілу густини випромінювання, що поглинається порожниною, дали можливість визначити не лише тепловий режим радіометра і коефіцієнт поглинання порожнини, але й систематичну похибку, викликану втратами випромінювання через вхідний отвір приймального елемента (для моделі СПР-8 вона дорівнює 0.08% при поправковому коефіцієнті 1.0062).

Крім того, було визначено основну складову методичної похибки, пов'язану з нееквівалентністю температурних полів радіометра в режимах опромінювання і заміщення. Величина цієї похибки визначалася за формулою

$$\delta_0 = \frac{P_1 - P_2}{P_1} = -\bar{\alpha} \frac{\Delta T_{12}}{P_1} 4\pi R^2, \quad (1)$$

де P_1 і P_2 - значення потужності опромінення і заміщення, які забезпечують реалізацію вибраного критерію еквівалентності радіаційної і електричної потужності, ΔT_{12} - зміна температури в місці знаходження чутливого елемента при переході від опромінення до заміщення, R - зовнішній радіус оболонки порожнини.

У випадку, коли реєстрація нагріву приймального елемента радіометра здійснюється за допомогою однієї термопари, залежність похибки δ_0 від параметрів порожнини і потоку має вигляд

$$\delta_0 = -\epsilon_{11} B_i \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n C_{m,n}(x_1, \varphi_1), \quad (2)$$

де ϵ_{11} - зональний коефіцієнт поглинання в зоні прямого опромінення, $B_i = \bar{\alpha} R / \lambda_N$ - число Біо, λ_N - теплопровідність зовнішнього шару приймального елемента, $C_{m,n}(x_1, \varphi_1)$ - функція, яка залежить від теплофізичних параметрів порожнини, значень зональних коефіцієнтів поглинання ϵ_{11} , відносного розподілу опроміненості $E(x, \varphi)$ в межах апертурного кута опромінення θ_0 , координат θ_1, φ_1 розташун-

ня чутливого елементу.

Функція $C_{mn}(x_i, \varphi_i)$ є знаковмінною відносно координат θ_i, φ_i , що відкриває можливості для мінімізації δ_0 стосовно до конкретної системи " компаратор-приймач випромінювання " на основі попередніх експериментальних досліджень по визначенню $\theta_0, E(x, \varphi)$ і характеру розсіювання випромінювання всередині приймального елементу.

В разі, коли така інформація відома з малою точністю, найдоцільнішим є використання набору термоіндикаторів, що здійснюють наближене інтегрування температурного поля. При цьому δ_0 приймає вигляд

$$\delta_0 = -\varepsilon_{11} B_1 \sum_{p=1}^L \sum_{q=1}^S B_{p,q} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n C_{m,n}(x_p, \varphi_q), \quad (3)$$

де $B_{p,q}$ - коефіцієнти, що залежать від розташування термпар і вибраного способу інтегрування (кубатурних або квадратурних формул чисельного аналізу); L, S - кількість термпар відповідно по координаті φ і θ ; x_p, φ_q - координати, що визначають місцезнаходження термпар на поверхні приймального елементу.

З (3) виходить, що зменшення похибки δ_0 без збільшення загальної кількості термпар $M=LS$ можливо здійснити на основі використання оптимальних формул чисельного інтегрування і відповідного розташування чутливих елементів. Однак, це вимагає істотних змін в самому способі реалізації процедури електричного заміщення і використання комп'ютерно-вимірвальної системи для його практичного втілення.

Третю главу дисертації присвячено питанням оптимізації конструкції радіометра і способу вимірювань, що ґрунтується на методі електричного заміщення.

Для однотермпарної моделі радіометра розглядається спосіб вимірювання потужності однорідних потоків теплового і лазерного випромінювання, що використовує експериментальне вимірювання (за допомогою каліброваної діафрагми, яка імітує вхідний отвір радіометра, і

метричного екрану) величини апертурного кута випромінювання θ_0 для визначення оптимальної координати розташування термопари θ_1 з умови

$$\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)^2 R_0^n P_n(x_1) \int_{x_0}^1 P_n(x) dx / [R_0^{2n+1} n(n+1-B_1) - (n+1)(n+B_1)] = 0, \quad (4)$$

де $x_1 = \cos\theta_1$; $x_0 = \cos\theta_0$; $R_0 = R_1/R$; R_1 - внутрішній радіус сферичної оболонки; $P_n(x)$ - поліноми Лежандра першого роду n - порядку.

Даний спосіб оптимізації θ_1 було ефективно реалізовано в радіо-метричних системах відомчого призначення для вимірювання надінтенсивних потоків випромінювання, що дозволило забезпечити похибку вимірювань не більше 1.5 % для потоків густиною до $2 \cdot 10^6$ Вт/м².

Оскільки (4) було одержано у припущенні сталості ефективного коефіцієнта тепловіддачі α , а в реальних умовах радіаційного теплообміну тепловіддача має нелінійний та локальний характер, виникла необхідність чисельно-аналітичного розв'язування нелінійної крайової задачі теплопровідності.

Розв'язання відповідної крайової задачі на основі регіонально-структурного методу дозволило визначити температурне поле радіометра, значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі і величину методичної похибки μ_0 , пов'язану з неоднорідністю зонної характеристики радіометра. Залежність похибки μ_0 від координати розташування термоіндикатора θ_1 визначалася за формулою

$$\mu_0 = 1 - 4\pi R^2 \epsilon_2 \sigma_0 T_0^4 [U^4(1, \theta_1) - 1] / P_1, \quad (5)$$

де ϵ_2 - ступінь чорноти зовнішньої поверхні сферичної оболонки, $U(1, \theta_1) = T(R, \theta_1) / T_0$ - відносна температура у місці розташування термоіндикатора, T_0 - температура вакуумної камери; P_1 - потужність випромінювання, σ_0 - стала Стефана-Больцмана.

Розрахунки показали, що за малих апертурних кутів опромінення ($\theta_0 = 10-30^\circ$) лінійне наближення може бути використане тільки для

оптимізації координати θ_1 , але не для оцінювання похибки μ_0 , що виникає при неточності вказаної оптимізації. Це пов'язано з тим, що похибка μ_0 значно "критичніша" до вибору місцезнаходження термоіндикатора, ніж це виходить з лінійного наближення. Однак, за великих апертурних кутів опромінення ($\theta_0 \geq 100^\circ$) врахування локального характеру тепловіддачі практично не дає додаткового виграшу в точності визначення μ_0 , хоча і у цьому випадку відбувається значне зростання μ_0 у міру збільшення потужності випромінювання.

Таким чином, потрібна така модифікація конструкції приймального елемента, яка дозволяє різко зменшити тангенційні градієнти температурного поля і тим самим мінімізувати похибку μ_0 , практично за будь-якими координатами місцезнаходження термоіндикатора.

Вказана мінімізація здійснювалась шляхом використання такої конструкції радіометра, яка має різні коефіцієнти поглинання стінки порожнини в зоні прямого опромінення і в зоні, що опромінюється лише за рахунок розсіювання теплового потоку.

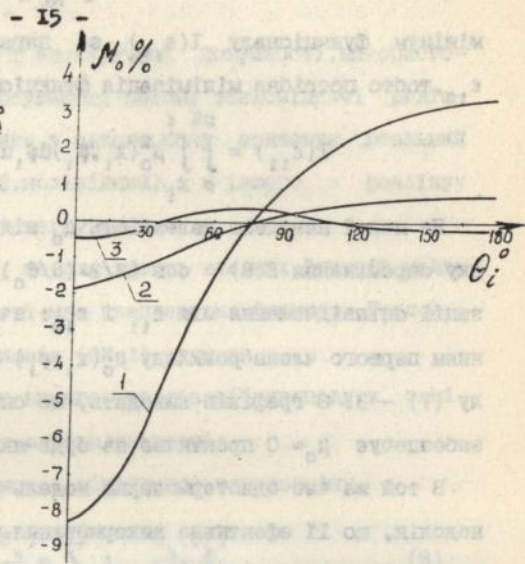
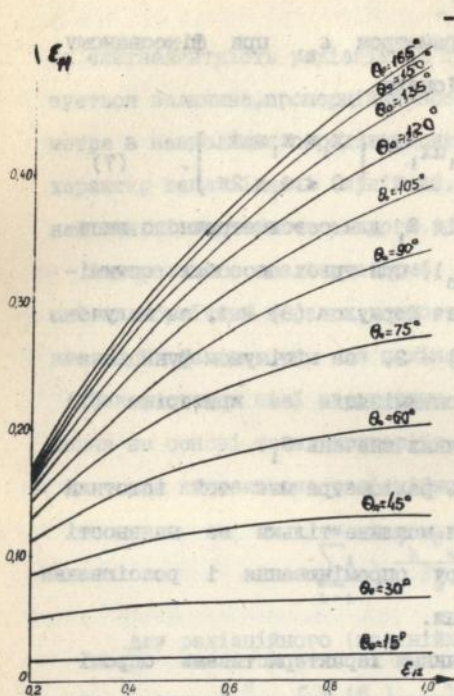
Співвідношення оптимальних значень зональних коефіцієнтів поглинання залежить від апертурного кута θ_0 і відносного розподілу опроміненості. Зокрема, коли $E(x, \varphi) = \cos \varphi$, зв'язок значень коефіцієнтів поглинання в зоні прямого опромінення ϵ_{11} і "тіньовій" зоні стінки порожнини ϵ_{12} визначається за формулою

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{12} (1 - x_0) / [1 - x_0 + 2\epsilon_{12} + (1 + x_1)(1 - \epsilon_{12})], \quad (6)$$

де $x_1 = \cos \theta_1 = -\sqrt{1 - (d/2R_1)^2}$, d - діаметр вхідного отвору радіометра,

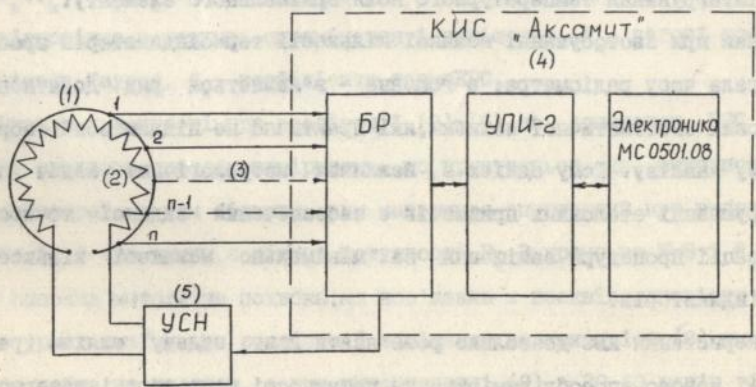
Графіки залежності ϵ_{11} від ϵ_{12} для різних кутів розходження випромінювання (мал.1) свідчать про зростання перепаду значень ϵ_{11} в міру зменшення апертурного кута θ_0 .

При істотно неоднорідному розподілі опроміненості $E(x, \varphi)$ найкращою умовою оптимізації співвідношення між ϵ_{11} і ϵ_{12} може служити



Мал. 2 Залежність похибки $M\%$ від координати розташування термоіндикатора θ_i для трьох способів оптимізації зональних коефіцієнтів поглинання ϵ_{1i} .

Мал. 1 Залежність оптимальних значень E_{11} від E_{12} при $E(x, \rho) = \text{const}$ для різних апертурних кутів опромінення θ_0 .



Мал. 3 Блок-схема автоматичного способу вимірювань на базі КВС.
 (1) - приймальна порожнина, (2) - електронагрівач,
 (3) - набір термоіндикаторів, (4) - КВС "Аксамит",
 (5) - стабілізатор напруги.

мінімум функціоналу $I(\epsilon_{11})$ за параметром ϵ_{11} при фіксованому ϵ_{12} , тобто потрібна мінімізація функціоналу

$$I(\epsilon_{11}) = \int_0^{2\pi} \int_{x_1} \mu_0^2(x_1, \theta_1) d\theta_1 dx_1 \quad \left\{ \begin{array}{l} x_1 \leq x_1 \leq 1 \\ 0 \leq \theta_1 \leq 2\pi \end{array} \right\}. \quad (7)$$

На мал.2 наведено залежність μ_0 від θ_1 для осесиметричного випадку опромінення $E(\theta) = \cos [\pi/2 \cdot (\theta/\theta_0)]$ при трьох способах оптимізації співвідношення між ϵ_{11} і ϵ_{12} : з формулою (6) - 1, за вилученням першого члена розкладу $\mu_0(x_1, \theta_1)$ - 2, за мінімумом функціоналу (7) - 3. З графіків виходить, що оптимізація за критерієм (7) забезпечує $\mu_0 \approx 0$ практично за будь-яких значень θ_1 .

В той же час однотермопарна модель радіометра має той істотний недолік, що її ефективне використання можливе тільки за наявності попередньої інформації щодо характеру опромінювання і розсіювання потоку всередині приймальної порожнини.

Менш пов'язаною з оптико-геометричними характеристиками опромінювання і розсіювання є багатотермопарна модель радіометра, яка дозволяє за допомогою скінченної кількості термоіндикаторів здійснювати інтегрування температурного поля приймального елемента.

Однак при застосуванні великої кількості термоіндикаторів зростає стала часу радіометра, а головне - з'являється ряд додаткових складових систематичної похибки, які практично не піддаються теоретичному аналізу. Тому однією з важливих метрологічних задач при конструюванні еталонних приймачів є забезпечення заданої точності реалізації процедури заміщення за мінімально можливою кількістю термоіндикаторів.

Використання КВС дозволило розв'язати дану задачу шляхом реалізації нового способу вимірювання потужності теплового і лазерного випромінювання, який полягає в тому, що в якості критерійного параметру, за рівністю якого в режимах опромінення і заміщення визначається

ся еквівалентність радіаційної і електричної потужності, використовується величина, пропорційна потужності потоку тепловіддачі радіометра в навколишнє середовище, яка з одного боку враховує реальний характер тепловіддачі (лінійний, нелінійний), а з іншого - реалізує найточніші способи чисельного інтегрування.

З чисельного аналізу відомо, що для досить гладких функцій найвищий алгебраїчний порядок точності має квадратурна формула Гаусса, яка за N вузлів точна для поліномів $(2N-1)$ ступеня.

Використання цієї квадратури вимагає реалізації процедури заміщення на основі таких критеріїв еквівалентності:

для конвективно-радіаційного (лінійного) теплообміну

$$\sum_{k=1}^N A_k \cdot \frac{V_k(\theta_k)}{\beta_k} = \sum_{k=1}^N A_k \cdot \frac{U_k(\theta_k)}{\beta_k} \quad (8)$$

для радіаційного (нелінійного) теплообміну

$$\sum_{k=1}^N A_k \cdot \left[\frac{V_k(\theta_k)}{\beta_k} + T_0 \right]^4 = \sum_{k=1}^N A_k \cdot \left[\frac{U_k(\theta_k)}{\beta_k} + T_0 \right]^4, \quad (9)$$

де $V_k(\theta_k)$, $U_k(\theta_k)$ - покази термпар в точках з координатами θ_k відповідно в режимах опромінення і заміщення, A_k - вагові коефіцієнти Гаусса, β_k - коефіцієнти термоЕРС.

Виграш у точності при реалізації (8), (9) за допомогою КВС замість звичного способу вимірювань, що ґрунтується на використанні термобатарей, є тим більшим, чим меншим є апертурний кут випромінювання θ_0 і чим вищим є рівень потужності P_1 . Зокрема за $N=8$ і $\theta_0=10^\circ+30^\circ$ основна методична похибка, що пов'язана з нееквівалентністю температурних полів, при реалізації заміщення за критерієм (8) зменшується майже на порядок, а при використанні (9) в 30-40 разів і не перевищує 0,1 % навіть для потоків густиною до $2 \cdot 10^6$ Вт/м². Схему реалізації описаного способу наведено на мал.3.

Четверту главу присвячено опису установки вищої точності УВТ 72А91 та її метрологічної атестації на основі експериментально - теоретичного дослідження основних факторів, які впливають на систематичну і випадкову похибку вимірювань.

Описуються основні вузли установки, принципи їх дії і функціональний зв'язок між ними. Наводиться блок-схема програми, яка вводить до КВС "Аksamит" для автоматичного керування процесом вимірювань і дозволяє реалізувати будь-який із способів вимірювання, описаних у главі 3, а також розрахувати середнє квадратичне відхилення і перевірити нормальність розподілу результатів спостережень.

Метрологічна атестація установки, яка проводилась з урахуванням всіх основних складових систематичної похибки вимірювань (неідентичності температурних полів (0.1%), нееквівалентності втрат випромінювання через вхідний отвір (0.08%), неточності вимірювання площі калібровочної діафрагми (0.24%), похибок визначення потужності заміщення (0.16%) і втрат у підвідних проводах (0.01%), похибки при реалізації на КВС критерію еквівалентності (0.15%) та ін.), показала, що УВТ 72А91 може відтворювати одиницю густини теплового радіаційного потоку в діапазоні $10^3 + 10^5$ Вт/м² з невилученою систематичною похибкою, меншою ніж 0.4 % при надійній ймовірності 0.95.

Значення СКВ результатів вимірювання за $n=10$ становлять $0.1+0.3\%$ залежно від рівня потужності і характеру тепловіддачі.

Стала часу СПР-8 на рівні 0,9 становить $\tau_k=70-90$ с при вимірюваннях у термостатованому повітряному середовищі і $\tau_p=200-260$ с при вимірюваннях у вакуумній камері. Одержані експериментальні залежності τ_k і τ_p від P_1 добре узгоджуються з теоретичними.

Експерименти підтвердили також, що використання в режимі радіаційного теплообміну критерійного параметра, пропорційного потужності потоку тепловіддачі, приводить до лінеаризації градувальної

кривої. Це забезпечує сталість чутливості приймача за енергетичним діапазоном і одночасно підтверджує, що навіть за $N=8$ квадратура Гаусса має досить високу точність інтегрування густини потоку тепловіддачі (експериментальне значення чутливості практично збігається з теоретичним).

Експериментально досліджувалися також спектральні характеристики і індикатриси розсіювання матеріалів, що застосовувалися в конструкції СПР-8, а потім одержані результати використовувалися для уточнення значення ефективного коефіцієнта поглинання на основі методу Монте-Карло. Для моделі СПР-8 цей коефіцієнт дорівнює 0.9938.

Крім того, для моделі з однорідним характером поглинання проводилося на установці ВНДІОФВ визначення спектрального коефіцієнта поглинання, яке дало майже повний збіг теоретичних і експериментальних результатів у видимій області спектру ($\lambda=0.63\text{мкм}$) і дещо завищені (по поглинанню на 0.9%) теоретичні значення в ІЧ області спектру ($\lambda=10.6\text{мкм}$).

Вказана різниця для ІЧ-діапазону пояснюється зростанням дзеркальної компоненти відбивання зі збільшенням λ , що не може бути враховано в рамках дифузної моделі розсіювання і вимагає застосування розрахункових методів, які здатні врахувати даний ефект (наприклад, методу Монте-Карло, як це було зроблено при розробці СПР-8).

Високі точності якості сферичного порожнинного радіометра підтвердили також ті звірення, які проводилися для однотермопарної моделі радіометра з іншими приймачами теплового випромінювання, що самокалібруються (ІКАР, РАП, ФОА). Вони показали добрий збіг результатів ($1.8 + 3\%$) в межах тих похибок вимірювань, які властиві приймачам вказаних класів.

В свою чергу вимірювання, які проводилися на УВТ 72А91 в режимі "квадратури Гаусса" і в режимі "однотермопарної моделі", підтверди-

ли, що найбільша близькість результатів у вказаних режимах забезпечується при використанні тих термопар, координати яких найближчі до оптимальних значень, що визначаються на основі теоретичних розрахунків. Розбіжність результатів при цьому становила $0.3+0.6$ %, що, приблизно, втричі менше основної похибки останньої моделі радіометра типу ШРК і майже на порядок менше похибок робочих засобів вимірювання інтенсивних потоків теплового випромінювання.

В закінченні сформульовано основні результати дисертаційної праці, проаналізовано їх вірогідність, наведено відомості про апробацію праці, опублікування і впровадження її результатів, а також розглянуто перспективи подальших досліджень.

Висновки.

В дисертаційній праці на основі аналітичного розв'язання лінійної і чисельного-аналітичного розв'язання нелінійної крайових задач теплопровідності розроблено теорію аналізу основних складових систематичної похибки вимірювань сферичного порожнинного радіометра і здійснено оптимізацію його конструкції для конкретних систем "компаратор-приймач випромінювання".

Запропоновано, розроблено і впроваджено нові високоточні способи вимірювання теплового і лазерного випромінювання, засновані на використанні комп'ютерно-вимірювальних систем, які дозволяють здійснювати автоматичне керування процесом вимірювань на основі оптимальних критеріїв еквівалентності радіаційної і електричної потужності.

Розроблено, створено, атестовано і впроваджено в практику метрологічного забезпечення установку вищої точності, на базі якої стає можливим створення державного еталону і державної перевірконої схеми вимірювання густини теплового випромінювання.

Важливе практичне значення праці полягає також в універсальності більшості з розроблених і теоретично обґрунтованих способів і засо-

бів вимірювання, що відкриває широкі можливості для їх подальшого використання при створенні нових типів високоточних радіометричних систем.

Список головних праць, опублікованих за темою дисертації

1. Полевой В.И. Расчет температурного поля многоэлементной модели полостного радиометра // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. "Метрологическое обеспечение измерения высоких температур и параметров плазмы"-Харьков: ХГНИИМ, 1979.-С.103-105.
2. Полевой В.И. Анализ погрешности образцового преобразователя излучения типа ШРК // Промышленная теплотехника.- 1982.- Т.4, N 1, С. 24-31.
3. Полевой В.И. К вопросу оптимизации теплофизических параметров образцового приемника высокоинтенсивных потоков излучения // Исследования в области высокотемпературных измерений.-Л.:ВНИИМ, 1986.- С. 47-53.
4. А.С. N 1376720. Способ измерения мощности однородных потоков теплового излучения высокой интенсивности. / Назаренко Л.А., Орлов В.А., Полевой В.И./ -заявлено 16.01.85, выдано 22.10.87.
5. Белых В.В., Назаренко Л.А., Орлов В.А., Полевой В.И. Метрологическое обеспечение измерений потоков теплового излучения // Промышленная теплотехника.- 1987.-Т.9, N 4.-С.80-83.
6. Полевой В.И., Назаренко Л.А., Орлов В.А., Ваксман В.М. Исследование погрешности абсолютного приемника интенсивных потоков теплового излучения // Метрология.- 1987, N10.-С.51-59.
7. Полевой В.И. Основные составляющие систематической погрешности трехслойного полосного радиометра и влияние на них "краевого эффекта" // Вопросы метрологического обеспечения высокотемпературных измерений.-Л.:ВНИИМ, 1987.-С.35-44.
8. А.С. N 1462964. Абсолютный приемник высокоинтенсивных

потоков излучения / Назаренко Л.А., Полевой В.И., Орлов В.А./ - заявлено 29.01.87, выдано - 01.11.88.

9. А.С. N 1533462. Абсолютный приемник высокоинтенсивных потоков излучения / Назаренко Л.А., Полевой В.И., Орлов В.А., Телегин А.А./ - заявлено 13.01.88, выдано - 01.09.89.

10. А.С. N 1507009. Способ измерения мощности потоков теплового излучения и устройство для его осуществления / Телегин А.А., Назаренко Л.А., Астопиева А.М., Полевой В.И., Белых В.В., Калашник А.А./ - заявлено 12.01.87, выдано - 08.05.89.

11. Назаренко Л.А., Полевой В.И. Расчет температурного поля и погрешности абсолютного полостного приемника излучения с учетом локального характера теплоотдачи // Теплофизика высоких температур.-1988. -Т.26, N 5.-С.978-984.

12. Назаренко Л.А., Полевой В.И. Теория трехслойного полостного приемника излучения с неоднородной степенью черноты внутренней стенки полости // Инж.-физ. журнал.- 1988.-Т.54, N 4.-С.671-672.

13. А.С. N 1630463. Полостной радиометр / Полевой В.И., Назаренко Л.А., Ваксман В.М., Телегин А.А./ -заявлено 08.12.88, выдано 22.10.90.

14. А.С. N 1674617. Способ измерения мощности теплового излучения / Полевой В.И., Назаренко Л.А., Гарбузов А.В., Бубель Г.Я./ - заявлено 24.07.89, выдано 01.05.91.

15. Полевой В.И., Назаренко Л.А., Вершинина Л.П. Тепловой режим и методическая погрешность полостного радиометра для кусочно-однородной аппроксимации поглощения излучения внутренней стенкой полости // Теплофизика высоких температур, - 1991- Т. 29, N 4.- С.788-797.

16. Полевой В.И., Назаренко Л.А., Гузей В.М. Оптимизация процедуры электрического замещения для полостных радиометров с радиационной и конвективно-радиационной теплоотдачей.//Инж.-

физ.журнал.- 1991.-Т. 60, N 2.-С.310-317.

17. Полевой В.И., Назаренко Л.А., Герасюта Н.И. Сферический полостной приемник интенсивных потоков излучения// Измерительная техника.-1991, N 7.- С.16-19.

18. Назаренко Л.А., Полевой В.И. Теория сферического полостного радиометра и создание на ее основе установки высшей точности для измерения интенсивных потоков теплового излучения.//Тез.докл.ІІ Международ. форума по тепломассобмену.-Т2.- Минск:ИТМО, 1992.-С:143-146.

ПОЛЕВОЙ ВІКТОР ІВАНОВИЧ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 17.12.1983р. Формат 60 x 90 1/16. 1 друк. л.
Тираж 100 екз. Заказ № 469

Надруковано на ротапінті ДНВО "Метрологія"
м. Харків-78, вул. Миросицька, 40.

460836

AB 29.203

AB 29.203