

В спеціалізовану вчену раду Д 35.052.08
Національного університету «Львівська політехніка»

ВІДГУК

офіційного опонента д.т.н. Жукова Л.Ф.

на дисертаційну роботу Декуши Леоніда Васильовича на тему «Засоби теплометрії на базі термоелектричних перетворювачів теплового потоку», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин.

1. Актуальність теми дисертації та її зв'язок з державними та галузевими науковими програмами. Інтенсивний розвиток теплометрії в останні десятиліття обумовлено двома факторами: з одного боку, експериментальні наукові дослідження процесів теплообміну в природі і в технічних об'єктах вимагають створення теоретичних основ прямого вимірювання теплового потоку і апаратурних засобів, а з іншого боку, для вирішення проблем енергозбереження актуальними є дослідження і модернізація теплоенергетичних об'єктів та енергоємних технологій, які базуються на засобах вимірювання теплових параметрів та теплофізичних властивостей матеріалів та виробів. У середині 20 століття практично одночасно в Україні та у Західній Європі з'явилися наукові роботи та практичні розробки засобів для прямого вимірювання теплового потоку. В Україні засновником цього наукового напрямку є видатний український вчений член-кореспондент АН УРСР О.А. Геращенко, який створив теоретичні основи теплотокових вимірювань, ввів саме поняття «теплометрія» та заснував в Інституті технічної теплофізики наукову школу.

На теперішній час актуальними є вирішення нових завдань у галузі теплометрії, зокрема дослідження методичних похибок вимірювання густини теплового потоку на об'єктах контролю різних типів, створення еталонних засобів вимірювання для метрологічного забезпечення теплометрії, розроблення та впровадження засобів теплометрії для вирішення різних прикладних задач, створення системи метрологічного забезпечення та нормативних документів для забезпечення єдності вимірювань теплових величин та теплофізичних характеристик. Таким чином, тема представленої дисертаційної роботи присвячена вирішенню важливої наукової проблеми і є надзвичайно актуальною.

Представлена робота виконана впродовж 1990...2015 р.р. у відділі теплотерії Інституту технічної теплофізики НАН України в рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України, в тому числі при виконанні низки держбюджетних науково-дослідних робіт НАН України за напрямом «Методи, засоби і метрологічне забезпечення теплофізичних вимірювань», цільових комплексних програм НАН України, планів державної стандартизації України, господарчих договорів на створення та дослідження засобів вимірювання. Автор роботи брав участь у виконанні наведених робіт в якості наукового керівника або відповідального виконавця.

2. Загальна характеристика структури та змісту дисертаційної роботи. Дисертаційна робота містить вступ, 6 розділів, висновки, список використаних джерел з 444 найменувань, 6 додатків та включає 320 сторінок основного тексту, 155 рисунків і 42 таблиці на 117 сторінках, 58 сторінок додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і задачі досліджень; наведено дані про зв'язок дисертації з науковими програмами, темами; визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів досліджень; наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів, публікації та впровадження, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі розглянуто сучасні методи визначення теплового потоку та його густини, подано інформацію про існуючі засоби вимірювальної техніки для визначення теплового потоку, наведена їх класифікація. Проведено аналіз переваг і недоліків різних експериментальних методів вимірювання теплового потоку в усталеному тепловому режимі. Особливу увагу приділено термоелектричним перетворювачам, що мають вигляд допоміжної стінки, та показано, що на сьогоднішній день вони є найбільш розповсюдженими та придатними для використання у різних умовах та режимах. Наведений огляд робіт, присвячений врахуванню спотворень, які вносять перетворювачі вигляду допоміжної стінки в поля температури та теплового потоку у досліджуваному об'єкті, та показано, що у відомих роботах наведені здебільшого якісні рекомендації щодо зменшення спотворень, а підвищення точності вимірювань вимагає введення кількісних поправок у результати вимірювань в залежності від умов теплообміну.

Проведений аналіз сучасних світових тенденцій у створенні системи метрологічного забезпечення в галузі тепловоточних вимірювань. Зроблено

висновок, що найбільш перспективним є розвиток кондуктивного методу відтворення та передавання одиниці густини теплового потоку.

Сформульовані задачі досліджень з метою розвитку наукових, технічних та нормативних засад створення засобів теплометрії на базі термоелектричних перетворювачів теплового потоку виду допоміжної стінки.

Другий розділ присвячено аналітичному дослідженню методичних похибок, що виникають при застосуванні перетворювачів теплового потоку вигляду допоміжної стінки, які мають теплофізичні характеристики, які відрізняються від характеристик досліджуваного об'єкту. Розглянуто декілька задач з різними стаціонарними умовами теплообміну і різними варіантами розташування перетворювача на об'єкті. На підставі проведених досліджень зроблені висновки, що у кожному варіанті застосування необхідно враховувати співвідношення радіусу та товщини перетворювача разом з умовами теплообміну та теплофізичні властивості як об'єкта контролю так і самого засобу вимірювання. Результати розрахунків представлені у вигляді графіків, за якими можна оцінити методичні похибки вимірювань, а у разі відомих характеристик об'єкту та умов теплообміну визначити поправки до результатів вимірювань.

У третьому розділі розглянуто методи покращення експлуатаційних та метрологічних характеристик перетворювачів теплового потоку, обґрунтовано теорію їх роботи та запропоновані методи розрахунку характеристик.

Оскільки на методичну похибку вимірювання теплового потоку впливає тепловий опір перетворювача, запропоновано зменшувати опір введенням у тіло перетворювача теплових шунтів. Це дозволяє підвищити верхню границю діапазону вимірювання густини теплового потоку.

Для підвищення часової стабільності перетворювачів запропоновано використовувати замість гальванічного покриття з дорогоцінних металів нікелеве покриття, причому для компенсації нелінійної залежності чутливості від температури поблизу точки Кюрі нікелю запропоновано використання додаткової коректувальної термобатарей. Причому, обидві термобатарей виконуються з нікелевим покриттям, а основою додаткової термобатарей є парний до основного термоелектродний матеріал. Показано, що за певних умов чутливість перетворювача залежить від параметрів основного та парного до нього термоелектродів і не залежить від властивостей матеріалу покриття.

Показано, що підвищити чутливість термоелектричних перетворювачів можна шляхом нанесення на обидві проволочки основної та корегувальної батарей ПТП гальванічного покриття з парних термоелектродних матеріалів, що мають високі значення коефіцієнта Зеєбека, але не випускаються у вигляді проволочки (наприклад, сурма, вісмут).

Наведено теоретичне обґрунтування роботи малоінерційних перетворювачів та запропоновані їх конструкції. Малоінерційні перетворювачі з додатковим визначенням різниці температури в декількох шарах пластини перетворювача мають постійну часу приблизно на порядок меншу ніж традиційні перетворювачі такої ж товщини.

В четвертому розділі розглянуто питання метрологічного забезпечення теплометрії, а саме підвищення точності відтворення та передавання розміру одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку при атестації перетворювачів. Досліджено вплив різноманітних факторів на стабільність та одномірність теплового потоку при його підведенні до перетворювача кондуктивним способом. На підставі вивчення умов теплообміну при відтворенні та передаванні розміру одиниці вимірювання густини теплового потоку обґрунтовано правила вибору розмірів еталонних ПТП і матеріалів, з яких вони виготовляються, а також створено комплекс устав для метрологічного забезпечення теплотоківних вимірювань, в тому числі, уставу еталонного рівня і проект державної повірочної схеми для засобів вимірювання густини теплового потоку.

У п'ятому розділі розглянуто використання виконаних фундаментальних розробок перетворювачів при вирішенні прикладних задач для будівництва, енергетики, аерокосмічної галузі, пожежної безпеки, тощо.

Запропоновано конструкцію спеціалізованого перетворювача з розширеним до 170 кВт/м^2 діапазоном вимірювання, актуальним для забезпечення стандартів на вогневі випробування. Створена серія абсолютних порожнинних приймачів теплового випромінювання РАП-12, до якої входять прилади як з однією приймальною коміркою, так і диференціальні двокоміркові. Особливістю приймачів є наявність градуовального нагрівача, розташованого між термобатареею і тепловим колектором, який утворює порожнину приймача.

Створена низка приладів, призначених для визначення теплопровідності будівельних матеріалів, теплового опору будівельних конструкцій, коефіцієнта емісії енергозберігаючого скла і теплоти гідратації бетонів.

Для вимірювання теплоти згоряння палив розроблено вітчизняний калориметр, альтернативний традиційним водяним калориметрам.

Створена вимірювальна установка для синхронного теплового аналізу, яка дозволяє вимірювати значення теплоємності матеріалів і питомої теплоти випаровування, яка зумовлена енергією зв'язку вологи з матеріалом.

Для дослідження надійності теплового захисту ракет-носіїв типу «Дніпро» в умовах реального польоту розроблено дві моделі перетворювачів. Перша модель виконана на базі константан-нікелевої гальванічної пари й призначена для вимірювання теплового потоку на зовнішній поверхні головної частини ракети-носія і забезпечує межу визначення густини теплового потоку до 20 кВт/м^2 при термостійкості до 523 К . Друга модель перетворювача виконана з корегувальною термобатареею й призначена для встановлення на внутрішній поверхні обтічника для вимірювання теплового потоку, спрямованого в зону розміщення корисного вантажу.

В рамках робіт по ліквідації наслідків катастрофи на 4-му блоці Чорнобильської АЕС розроблено мікрокалориметр для вимірювання тепловиділення паливовмісних мас.

Шостий розділ присвячено створенню в Україні нормативної бази гармонізованої з міжнародними стандартами, нормами та вимогами для задоволення наукових та виробничих потреб. Для вирішення цих завдань в галузі вимірювання теплових величин здобувачем розроблено 35 нормативно-методичних документів, включаючи національні, міждержавні, а також гармонізовані з міжнародними стандарти України

У висновках по дисертаційній роботі наведено основні результати проведених досліджень.

Додатки містять огляд засобів вимірювання теплового потоку, опис метрологічного обладнання для атестації перетворювачів, розв'язання рівняння теплопровідності для аналізу спотворень полів температури і теплового потоку у перетворювачі і об'єкті контролю, інформацію про державну метрологічну атестацію приладів та впровадження виконаних робіт.

3. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, достовірність і новизна отриманих результатів.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків дисертації підтверджується використанням апробованих коректних методів математичного моделювання, аналізу та експериментальних досліджень, використанням сучасних засобів вимірювальної та обчислювальної техніки,

достатньо доброю відповідністю експериментальних та розрахункових залежностей, державною метрологічною атестацією створених приладів.

4. Основні нові наукові результати, отримані дисертантом

- Визначено основні джерела виникнення методичних похибок вимірювання густини теплового потоку на об'єктах контролю різних типів.

- Обґрунтовано шляхи зменшення основних складових методичних похибок вимірювання густини теплового потоку та розроблено рекомендації з вибору теплофізичних характеристик елементів конструкції та конструктивно-технологічних особливостей побудови перетворювачів.

- Отримала подальший розвиток теорія проектування перетворювачів теплового потоку, що стало базою для створення нових типів приладів з покращеними метрологічними характеристиками для визначення теплофізичних властивостей виробів та матеріалів.

- Обґрунтовано основні засади створення системи метрологічного забезпечення теплових вимірювань.

- Розроблено систему нормативних документів та методик для теплових вимірювань.

- Теоретично обґрунтовано та запропоновано структуру поліметалічних перетворювачів з термоелектронних матеріалів, які не підлягають технологічній операції волочіння; запропоновано способи покращення метрологічних характеристик перетворювачів із застосуванням нікелевого покриття основного термоелектроду, що дало можливість розширити температурний діапазон роботи на область вище точки Кюрі для нікелю; розроблено теоретичні засади проектування перетворювачів зі зменшеним тепловим опором для вимірювання густини теплового потоку в умовах високоінтенсивного теплообміну та перетворювачів спеціального призначення для теплотерії неусталених процесів теплообміну.

5. Значущість результатів дисертаційної роботи для науки і практики.

Основне значення для науки дисертаційної роботи Л.В. Декуши полягає у визначенні факторів, які впливають на методичні похибки вимірювання теплового потоку, та обґрунтуванні шляхів їх зменшення, розвитку теорії проектування перетворювачів теплового потоку з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками, обґрунтуванні наукових засад створення системи метрологічного забезпечення теплових вимірювань.

Значення роботи Л.В. Декуши для практики полягає у розробленні рекомендацій щодо проектування та експлуатації перетворювачів теплового потоку, створення нових типів перетворювачів з покращеними характеристиками, створення еталонної та нормативної бази метрологічного забезпечення, створення низки приладів для визначення теплофізичних властивостей виробів та матеріалів. Практична значущість роботи підтверджена численними актами впровадження та свідоцтвами про державну метрологічну атестацію створених перетворювачів та приладів.

6. Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях. Результати роботи опубліковані в 45 друкованих працях, серед яких: 35 статей у наукових фахових виданнях України, 6 публікацій у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних, 4 патенти України. В дисертації та авторефераті відображений персональний внесок здобувача в публікаціях, що написані у співавторстві, який є визначальним.

7. Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень, на основі яких захищено кандидатську дисертацію. В оглядовому розділі докторської дисертації наведені розрахункові залежності характеристик перетворювачів теплового потоку та подано стислий опис метрологічних устав, які розглянуто у кандидатській дисертації здобувача. У інших розділах докторської дисертації відсутні результати з кандидатської роботи.

8. Оформлення дисертації та автореферату, відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

Текст дисертаційної роботи викладено на достатньо високому професійному рівні. Оформлення та стиль викладення матеріалів дисертації та автореферату, в цілому, відповідає загальноприйнятому для наукових робіт та відповідає вимогам МОН України.

У авторефераті викладена основна суть проведених досліджень і отриманих результатів, по структурі він відповідає вимогам МОН України і достатньо повно відображає дисертаційну роботу.

9. Зауваження щодо змісту й оформлення дисертації.

1. Запропонована в дисертації повірочна схема базується на первинному еталоні, який відтворює одиницю густини теплового потоку з розмірністю у Вт/м², але в Україні вже існує державний первинний еталон одиниці освітленості некогерентного випромінення, що має ту ж саму розмірність відтворюваної одиниці. Для забезпечення єдності вимірювань необхідно роз'яснити взаємозв'язок між двома еталонами.

2. Для створеної еталонної установки доцільно провести міжнародні звірення, але в дисертаційній роботі її метрологічні характеристики представлені лише у поняттях «похибки». Для порівняння метрологічних характеристик з закордонними аналогами та проведення міжнародних звірень необхідно зазначити невизначеності вимірювань.

3. В тексті дисертації не для всіх створених приладів наведені метрологічні характеристики, наприклад, відсутня оцінка похибки вимірювання коефіцієнту емісії енергоефективного скла з використанням приладу ИТ-7С.

4. В роботі запропоновані малоінерційні перетворювачі теплового потоку, але в приймачах теплового випромінення РАП-12 застосовано традиційні перетворювачі і тому стала часу цих приладів сягає кількох хвилин. Зазвичай в потоці теплового випромінення від полум'я присутня швидкозмінна складова і тому було би корисно створити малоінерційні приймачі із застосуванням запропонованих перетворювачів.

5. В тексті роботи зустрічається термін «термопара» замість «термоелектричного перетворювача температури».

6. Пункт 10 наукової новизни за своїм змістом практично співпадає із пунктом 8 практичного значення результатів.

7. В тексті роботи іноді зустрічаються неоднозначні вислови та незначні помилки:

- «плохой тепловой контакт»;
- не розшифровані позначки на рис.4.23 на стор. 269;
- рис. 3.6 ... 3.8 доцільно було би розмістити у додатках, оскільки вони побудовані за довідковими даними.

Слід зазначити, що вказані недоліки не зменшують наукової цінності дисертаційної роботи Л.В. Декуши.

10. Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертація Л.В. Декуши в цілому представляє собою закінчене наукове дослідження, яке містить теоретичні та експериментальні результати, що вирішують актуальну наукову проблему підвищення точності засобів теплотримі, удосконалення та розроблення нових перетворювачів з покращеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками, створення на їх основі теплофізичних приладів нового покоління та вдосконалення системи метрологічного забезпечення теплотримі в Україні.

Представлена дисертаційна робота Л.В. Декуши та отримані наукові результати відповідають паспорту спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин.

Все вищенаведене дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота «Засоби теплометрії на базі термоелектричних перетворювачів теплового потоку» відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 «Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів» у частині, зазначеній п.п. 9, 10, 12, 13, а її автор, Леонід Васильович Декуша, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач відділом термометрії та
фізико-хімічних досліджень
Фізико-технологічного інституту
металів та сплавів НАН України



Л.Ф. Жуков

Підпис доктора техн. наук Жукова Леоніда Федоровича засвідчую:

Вчений секретар Фізико-технологічного інституту
металів та сплавів НАН України, к.т.н.



В.Л. Лахненко