

## ВІДГУК

офіційного опонента, завідувача відділу теоретичної електротехніки Інституту електродинаміки Національної академії наук України, доктора технічних наук, професора *Мисловича Михайла Володимировича*, на дисертаційну роботу **Ковтун Світлани Іванівни** на тему *“Науково-технічні засади забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку”*, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка)

**Актуальність теми.** Світові проблеми, пов’язані із глобальними змінами клімату, зниженням енергоспоживання та ресурсозбереження спонукають науковців та дослідників у всьому світі на пошук нових методів та засобів вимірювання теплових величин. Ці ж проблеми притаманні і для промислових, теплоенергетичних та комунальних підприємств України, більшість з яких є застарілими і потребують суттєвої модернізації.

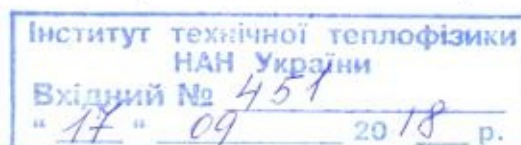
Основні параметри, які використовуються при проведенні наукових досліджень, побудові та модернізації теплоенергетичних об’єктів, розробці нових енергоємних технологій є температура та тепловий потік. Саме вимірювання і аналіз останнього надає можливість оцінити теплові втрати у досліджуваних об’єктах.

У зв’язку зі створенням і впровадженням сучасних інформаційних технологій підвищуються вимоги до точності і достовірності вимірювань теплового потоку. Результати цих вимірювань надають можливість на якісно новому рівні отримувати розв’язок цілої низки завдань, пов’язаних зі створенням нових матеріалів та конструкцій, які використовуються при спорудженні та експлуатації різноманітних промислових підприємств.

При вирішенні цих завдань виникає питання створення сучасної еталонної бази, яка б забезпечила розробку нових методів і засобів вимірювання параметрів і характеристик теплового потоку.

Виходячи з цього, актуальність теми дисертаційної роботи *С.І.Ковтун*, яка присвячена розв’язку проблеми розвитку теоретичних засад, методологічного апарату та вдосконаленню еталонної бази забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку, не викликає сумніву.

**Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність.** Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 158 найменувань та 3



додатків. Зміст роботи викладено на 265 сторінках основного тексту, 67 рисунків та 10 таблиць.

*У вступі* проведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання дослідження і наукову новизну. Показаний зв'язок з науковими програмами і планами НДР, а також особистий внесок дисертанта.

*Перший розділ* присвячено розгляду світових тенденцій розвитку системи метрологічного забезпечення в галузі вимірювання теплового потоку та його поверхневої густини. На базі результатів комплексного аналізу вимірювань поверхневої густини теплового потоку, встановлені актуальні діапазони вимірювань цієї величини для різних напрямків наукових і прикладних досліджень.

Розглянуто еталонні засоби відтворення і передавання розміру одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку при різних видах теплообміну.

За результатами проведених досліджень підкреслено, що для відтворення одиниці густини теплового потоку зазвичай використовують моделі абсолютно чорного тіла та криогенні радіометри.

Сформульовано науково-прикладну проблему, у якій обґрунтовано необхідність забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні, що надає можливість отримувати результати вимірювання з підвищеними точністю і достовірністю.

*У другому розділі* запропоновано методологію забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку та створено концепцію модульної побудови еталону в широкому динамічному діапазоні.

Дисертанткою переконливо обґрунтовано, що теоретичне забезпечення єдності вимірювань базується на дослідженні математичних та фізичних моделей теплого поля. За важливими результатами можна відмітити запропоновану авторкою загальну модель теплого поля у виді векторного випадкового поля, а також конструктивну модель формування теплого поля, яку можна вважати частинним випадком згаданої загальної моделі. На базі дослідження цих моделей, запропоновано метод зменшення невизначеності результатів вимірювань, що підвищує їх достовірність.

На основі результатів обґрунтування доцільності розділення динамічного діапазону за густиною теплого потоку, запропоновано концепцію побудови еталону поверхневої густини теплого потоку за модульним принципом.

*У третьому розділі* подано результати застосування метрологічного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплого потоку за кондуктивного підведення теплової енергії.

Дисертанткою запропоновано структурну модель формування невизначеності результатів вимірювання поверхневої густини теплового потоку у вигляді причинно-наслідкової діаграми. Встановлені і досліджені основні джерела невизначеності результатів вимірювання. За результатами проведених досліджень рекомендовані методи компенсації впливу різних факторів на невизначеність результатів вимірювання.

Важливим результатом, отриманим дисертанткою є проведення порівняльного аналізу експериментальних та розрахункових даних. На основі проведеного аналізу визначено кількісні оцінки абсолютної стандартної невизначеності для результату відтворення значення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку, яка не перевищує 0,28%, що відповідає отриманим на сьогодні результатам у світовій практиці. Крім того, досягнуто розширення нижньої межі діапазону відтворення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку за кондуктивного підведення енергії до  $20 \text{ Вт/м}^2$ .

*Четвертий розділ* присвячено описанню розробленого модуля еталону поверхневої густини теплового потоку з реалізацією радіаційного підведення теплової енергії для забезпечення єдності вимірювань в діапазоні  $(1 - 50) \text{ Вт/м}^2$ .

Розглянуто конструкції вимірювальних комірок для відтворення та передавання теплового потоку. Встановлені та проаналізовані основні чинники, що впливають на рівномірність розподілу теплового поля. Дисертанткою проведено дослідження розподілу терморадіаційних коефіцієнтів при варіації параметрів вимірювальної комірки, що дозволило на етапі проектування вибрати оптимальне співвідношення геометричних розмірів випромінюючої порожнини для забезпечення максимальної рівномірності розподілу поля теплового потоку на опромінюваній поверхні тепловідводу. Крім того, запропонована методика, яка дозволяє врахувати вплив невизначеності вимірювань, викликаної цим фактором, внесенням відповідних поправок в результат вимірювання.

У *п'ятому розділі* розглянуто результати розроблення модуля теплового блоку еталону поверхневої густини теплового потоку для забезпечення єдності вимірювань в діапазоні  $(1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5) \text{ Вт/м}^2$ .

Одним з основних елементів цього блоку є вимірювальна комірка у вигляді замкнутого простору, утвореного двома дифузно випромінювальними поверхнями. Авторкою проведено докладне дослідження параметрів і характеристик цієї комірки та її модифікацій.

Проведено комп'ютерне моделювання процесу теплообміну у вимірювальній комірці при застосуванні DO (discrete ordinate) моделі переносу енергії випромінюванням. Виконане моделювання показало, що

нерівномірність розподілу теплового поля поверхні тепловоду не перевищує 10%.

Для забезпечення простежуваності результатів відтворення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку до Державного еталону, дисертанткою запропоновано застосування квазидиференційного приймача теплового випромінювання. Результати експериментальних досліджень показали, що розроблений приймач дозволяє проводити вимірювання в діапазоні значень  $(10 - 100)$  кВт/м<sup>2</sup> з розширеною невизначеністю  $\pm 1,5\%$  при коефіцієнті охоплення  $k = 2$ , що дозволило пропонувати його як засіб передавання одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

*У шостому розділі* викладено результати розроблення апаратно-програмного забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку.

Дисертанткою детально описано апаратну та алгоритмічно-програмну частини інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передавання розміру одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні. Структура системи побудована за модульним принципом і складається з функціонально пов'язаних між собою блоків.

В роботі запропоновано ієрархічну схему, що може бути застосована при калібруванні та повірці засобів вимірювання поверхневої густини теплового потоку, які використовуються в Україні. *Верхній рівень* цієї схеми відведено Державному еталону енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням в діапазоні від  $10$  Вт/м<sup>2</sup> до  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> із середнім квадратичним відхиленням результату вимірювання, що не перевищує  $0,25 \cdot 10^{-2}$ , при цьому границя невиключеної систематичної похибки не перевищує  $0,3 \cdot 10^{-2}$ .

Первинний еталон, який побудовано за модульним принципом з діапазоном відтворюваних значень поверхневої густини теплового потоку від  $1$  Вт/м<sup>2</sup> до  $200000$  Вт/м<sup>2</sup>, поставлено на *другий рівень*. *Третій рівень* ієрархічної схеми відведено робочим еталонам, до яких відносять еталони сенсорів теплового потоку, приймачі теплового випромінювання і еталони теплотричної установки. До *четвертого рівня* відносять робочі засоби вимірювання: приймачі теплового випромінювання, сенсори теплового потоку та системи на їх основі.

Важливим результатом, отриманим дисертанткою, слід вважати створене методичне забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку, що дозволило реалізувати процедуру повірки на місці експлуатації сенсорів без їх демонтажу.

У сукупності отримані наукові та практичні результати надали можливість розробити інформаційно-вимірювальну технологію забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку, яка поєднує у собі теоретичний базис, програмне забезпечення, апаратні засоби реалізації еталону за модульним принципом. До складу створеної інформаційно-вимірювальної технології можна також віднести запропоновану методику виконання вимірювання, що дозволяє адаптувати основні положення метрологічного забезпечення теплових величин до конкретних просторових і часових аргументів реалізації процесу вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

У *висновках* сформульовано основні наукові результати.

У *додатках до дисертаційної роботи* наведено список публікацій дисертантки за темою представленої роботи, копії протоколу дослідження метрологічних характеристик еталону та свідцтва про калібрування застосованих в роботі засобів вимірювання, копії семи актів впровадження результатів роботи.

#### **Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації.**

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, яка полягає в тому, що в ній:

1) розроблено теоретичні засади розв'язання науково-прикладної проблеми забезпечення єдності вимірювання поверхневої густини теплового потоку в широкому діапазоні;

2) побудовано та досліджено модель реалізації еталону поверхневої густини теплового потоку, в основу якої покладено модульний принцип, тобто застосовано різні способи формування і передавання теплової енергії та єдиного модулю реєстрації та оброблення вимірювальної інформації. Такий підхід надав можливість розширити робочій діапазон вимірювань і отримати його значення, що відповідають світовому рівню метрологічного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку;

3) з метою врахування параметрів форми і теплофізичних властивостей джерела теплової енергії на точність відтворення значень поверхневої густини теплового потоку в роботі вперше запропоновано критерій оптимізації діапазону вимірювання поверхневої густини теплового потоку;

4) суттєвим результатом, отриманим у роботі є удосконалення способу калібрування термоелектричних сенсорів теплового потоку шляхом внесення відповідних поправок їхнього коефіцієнту перетворення. Запропонований спосіб надав можливість здійснювати процедуру повірки сенсорів без їх демонтажу, в умовах експлуатації;

5) в роботі розвинута інформаційно-вимірювальна технологія забезпечення єдності вимірювання поверхневої густини теплового потоку в широкому діапазоні, що дозволило розширити можливості застосування цих сенсорів.

**Практичне значення результатів дисертаційної роботи** полягає в наступному:

1) розроблено і практично реалізовано різні варіанти конструкції вимірювальних комірок теплового блоку системи для відтворення поверхневої густини теплового потоку, а також засобів передавання розміру одиниці її вимірювання;

2) для відтворення та передавання розміру одиниці вимірювання густини теплового потоку розроблено метрологічний комплекс нового покоління;

3) в роботі запропоновано ієрархічну схему, яка забезпечує простежуваність результатів вимірювання при застосуванні засобів вимірювання як інтегральний результат метрологічного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку;

4) для практичної реалізації принципів модульної побудови еталону поверхневої густини теплового потоку розроблено програмно-технічні засоби, що дозволяють суттєво розширити діапазон вимірюваних значень цієї величини;

5) практичну цінність розроблених методів, пов'язаних зі створення еталону поверхневої густини теплового потоку з розширеним динамічним діапазоном, підтверджують результати їх практичного використання в учбово-методичному процесі кафедр відповідних спеціальностей Національного технічного університету України «КПІ ім. І.Сікорського» та Національного авіаційного університету.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** забезпечено використанням фундаментальних законів класичної теорії та сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, узгодженістю отриманих результатів із даними інших авторів (де це порівняння можливе), обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на багатьох міжнародних та національних науково-технічних конференціях, численними експериментами. Отримані експериментальні результати знаходяться в задовільній якійсь та кількісній відповідності до висунутих теоретичних положень.

**Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.** Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 33 наукових публікаціях, серед яких 3 монографії, 14 статей у наукових періодичних виданнях інших держав та України, які включено до міжнародних

наукометричних баз даних, а також 10 публікації у збірниках матеріалів і праць міжнародних науково-технічних конференцій.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідались й обговорювалися на 18 міжнародних та національних науково-технічних конференціях, симпозіумах та семінарах.

**Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.** Оформлення автореферату за своїм обсягом, структурою та змістом відповідає чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт. Основний зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

#### **Зауваження по дисертаційній роботі і автореферату**

1. У другому розділі введений термін «функція невизначеності», який, на мою думку, потребує більш детального пояснення, адже не є загальноприйнятим у вимірвальній практиці.

2. При обґрунтуванні критерію встановлення верхньої границі діапазону вимірювання (розділ 3.3), зазначено, що за кондуктивного формування теплової енергії вона обмежена термостійкістю елементів вимірвальної комірки, але не наводяться дані щодо застосованих дисертанткою матеріалів. Можливо, обравши більш термостійкі матеріали, вдалося б розширити границю діапазону вгору як за температурою так і за тепловим потоком.

3. У дисертації (розділ 4.1) зазначено, що «...у запропонованій схемі вимірвальної комірки екран термостатований при температурі тепловідводу, що сприяє мінімізації конвективної складової теплообміну в зоні розташування досліджуваного сенсора...», але при цьому не наводяться числові оцінки, які б підтвердили зроблені висновки.

4. У авторефераті недостатньо надано інформації щодо методів та засобів передавання розміру одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

5. На мою думку низку розроблених в роботі положень і технічних рішень варто було би захистити патентами, чим підтвердити свій пріоритет.

#### **Загальні висновки**

Вищевказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота *С.І. Ковтун "Науково-технічні засади забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку"*, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин, є завершеною науковою працею, в якій вирішено нову науково-прикладну

проблему, яка полягає у розвитку теоретичних засад, методологічного апарату та вдосконаленні еталонної бази забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку в широкому діапазоні, що задовольнить потреби теплових вимірювань у різних галузях наукових і прикладних досліджень. Дисертаційна робота відповідає вимогам паспорту наукової спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка), а також вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р., а її авторка, *Світлана Іванівна Ковтун*, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за обраною спеціальністю.

**Офіційний опонент,  
завідувач відділу теоретичної електротехніки  
Інституту електродинаміки НАН України,  
доктор технічних наук, професор**

*13 вересня 2018р.*



**Мислович М. В.**

Мислович М. В.  
засвідчую:  
Інституту електродинаміки  
Нац. Акад. Наук України

