

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

КОВТУН СВІТЛАНИ ІВАНІВНИ

на тему «*Науково-технічні засади забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку*», представлену 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

Дисертаційна робота *Ковтун С.І.* присвячена розв'язанню актуальної та важливої наукової прикладної проблеми 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. Це зумовлено тим, що для вирішення проблеми ресурсозбереження та зниження глобального енергоспоживання необхідним є пряме вимірювання поверхневої густини теплового потоку оскільки отримувані значення є прямим показником теплових втрат об'єктів.

З іншого боку, такий підхід володіє низкою переваг, зокрема, можливістю вимірювання, оперативного контролю та регулювання теплових процесів практично довільних об'єктів з будь-яких матеріалів, стан яких можна оцінити за нерівномірністю розподілу теплового поля. У свою чергу, інформативними параметрами, які реєструється при дослідженнях та модернізації теплоенергетичних об'єктів, енергоємних технологій, впровадженні нових енергоефективних матеріалів, є *температура* та *тепловий потік*. Саме останній параметр характеризує процес поширення теплової енергії в об'єкті дослідження, його теплообмін з навколишнім середовищем або іншими об'єктами, а також інтенсивність процесів, що протікають. При цьому необхідно охопити якомога ширший температурний діапазон вимірювань при збереженні *достовірності* отриманих результатів.

Вирішення даної проблеми також безпосередньо впливає на *динаміку* економічного розвитку України, оскільки саме якісне метрологічне забезпечення вимірювань у теплометричній галузі – це шлях до скорочення бюджетних витрат на підготовку та проведення відповідних досліджень, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню конкурентоздатності вітчизняних товарів та послуг як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

У даному контексті дисертаційне дослідження *Ковтун С.І.* заслуговує на особливу увагу, а розвиток теоретичних засад, методологічного апарату та вдосконалення еталонної бази забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку в широкому діапазоні, що відповідатиме сучасним вимогам щодо теплових вимірювань в різних галузях наукових і прикладних досліджень, є *актуальною науково-прикладною проблемою*.

З огляду на наведене вище, дисертаційне дослідження «*Науково-технічні засади забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку*» є *актуальним і доцільним* як в суто теоретичному аспекті для розуміння природи фізичних процесів поширення теплового потоку у широкому діапазоні, так і в практичному аспекті, зокрема, для забезпечення єдності вимірювання поверхневої густини теплового потоку, що дозволило адаптувати основні положення метрологічного забезпечення теплових величин до конкретних просторових і часових аргументів реалізації процесу вимірювання поверхневої густини теплового потоку та розширити предметні сфери застосування сенсорів теплового потоку.



Дисертаційна робота **Ковтун С.І.** виконана в Інституті технічної теплофізики НАН України у рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України, зокрема, держбюджетних науково-дослідних робіт НАН України: «Розвиток теоретичних засад моніторингу технічного стану об'єктів теплоенергетики та підвищення їхньої ефективності» (шифр 1.7.1.843, 2012–2016рр., №ДР 0112U001929); «Розроблення наукових основ, вимірювальних технологій та систем шумової діагностики теплоенергетичного обладнання в житлово-комунальному господарстві» (шифр 1.7.1.865, 2015 – 2019 р. №ДР 0115U000776); «Розроблення методики моніторингу теплового стану магістральних тепломереж на базі квадрокоптерів» (договір № 55/2017 від 03.07.2017 р., № ДР 0117U003694).

Мета дисертаційного дослідження **Ковтун С.І.** полягала у забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку у широкому динамічному діапазоні.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи був процес відтворення та передавання одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку, а предметом дослідження – методи, методики та системи калібрування засобів вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

Для досягнення мети наукового дослідження здобувач виконала значний комплекс фізичних та технологічних досліджень, що потребувало освоєння низки сучасних методів дослідження, зокрема: теоретичні та експериментальні методи, які базуються на теорії вимірювання, теплообміну, математичної статистики, методах імітаційного та комп'ютерного моделювання.

У процесі виконання дисертаційного дослідження здобувач *вирішила наступні завдання*:

- створено теоретичні засади розв'язання науково-практичної проблеми забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку в широкому діапазоні на основі результатів комплексного аналізу методів і засобів вимірювання теплового потоку та сучасного стану їхнього метрологічного забезпечення;
- обґрунтувала концепцію модульної побудови еталону поверхневої густини теплового потоку з розділенням динамічного діапазону на частини та реалізацією одиниці вимірювання за різними фізичними принципами;
- провела дослідження функції невизначеності результату вимірювання та основних факторів впливу з метою формування однорідного і стаціонарного теплового потоку на поверхні сенсора для забезпечення реалізації одиниці вимірювання з заданим рівнем невизначеності;
- запропонувала варіанти конструктивного виконання вимірювальних комірок теплового блоку для відтворення поверхневої густини теплового потоку та засобів передавання одиниці вимірювання в широкому динамічному діапазоні;
- провела оцінювання сумарної невизначеності відтворення та передавання одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку;
- розробила методики дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання густини теплового потоку та експериментально дослідила метрологічні характеристики запропонованих сенсорів теплового потоку як засобів передавання одиниці вимірювання;
- розвинула інформаційно-вимірювальну технологію забезпечення єдності вимірювання поверхневої густини теплового потоку для розширення сфер застосування сенсорів теплового потоку;
- запропонувала ієрархічну схему як інтегральний результат метрологічного забезпечення засобів вимірювання поверхневої густини теплового потоку, а також на основі проведених досліджень запропонувала та обґрунтувала перспективні напрями розвитку метрологічного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження *Ковтун С.І.* полягає у розробленні концепції модульної побудови еталону поверхневої густини теплового потоку, особливостями якої є розділення динамічного діапазону на частини з застосуванням різних способів формування і передавання теплової енергії та єдиного модулю реєстрації і опрацювання вимірювальної інформації, що дозволило розширити на порядки межі діапазону при забезпеченні встановлених значень невизначеності. До основних наукових здобутків необхідно також віднести:

– вперше запропоновано математичну модель вимірювання поверхневої густини теплового потоку у вигляді випадкового векторного поля, що дозволило проаналізувати формування однорідного у просторі і стаціонарного у часі теплового потоку на теплосприймальній поверхні засобу вимірювання;

– вперше запропоновано та розроблено критерій оптимізації діапазону вимірювання поверхневої густини теплового потоку, що враховує вплив параметрів форми і теплофізичних властивостей джерела теплової енергії на точність відтворення значень поверхневої густини теплового потоку;

– розвинуто спосіб калібрування термоелектричних сенсорів теплового потоку шляхом визначення та внесення поправок їхнього коефіцієнту перетворення, що забезпечило можливість проведення процедури повірки без демонтажу сенсорів в умовах експлуатації;

– отримала подальший розвиток інформаційно-вимірювальна технологія забезпечення єдності вимірювання поверхневої густини теплового потоку в широкому діапазоні, що дозволило розширити предметні сфери застосування сенсорів теплового потоку.

Результати дисертаційного дослідження *Ковтун С.І.* мають також важливе **практичне значення**, зокрема:

1. Розроблено метрологічний комплекс нового покоління для відтворення та передавання розміру одиниці вимірювання густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні.

2. Розроблено варіанти конструктивного виконання вимірювальних комірок теплового блоку для відтворення поверхневої густини теплового потоку, а також засобів передавання розміру одиниці її вимірювання.

3. Запропоновано ієрархічну схему, яка забезпечує простежуваність результатів вимірювання при застосуванні засобів вимірювання як інтегральний результат метрологічного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку.

4. Розроблено методику дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання теплового потоку в умовах експлуатації.

5. Проведено експериментальні дослідження метрологічних характеристик сенсорів теплового потоку з теплотричною корекцією, що забезпечило можливість їхнього застосування як засобів передавання одиниці вимірювання в умовах дрейфу температури.

6. Результати дослідження впроваджено на підприємствах країни та у навчальному процесі вищих навчальних закладів, зокрема: сенсори теплового потоку з теплотричною корекцією та високотемпературні сенсори впроваджено в ПАТ «ХАРТРОН», м. Харків (акти впровадження від 12.03.2014 р., 27.03.2014 р., 15.05.2014 р., 19.05.2014 р.); методика калібрування сенсорів теплового потоку в умовах експлуатації впроваджено в ТОВ НВП «Машинобудування», м. Дніпро (акт впровадження від 16.01.2018 р.); теоретичні та прикладні результати використано у навчальному процесі кафедри інформаційно-вимірювальної техніки НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», м. Київ (акт від 14.03.2018 р.) та кафедри інформаційно-вимірювальних систем Національного авіаційного університету, м. Київ (акт від 19.06.2018 р.)

Основні наукові результати *Ковтун С.І.* достатньою мірою **обґрунтовані**. Їхня **достовірність** не викликає сумнівів, оскільки результати аналітичних досліджень отримані з

використанням фізичних і математичних моделей передавання теплової енергії, та підтверджені численними експериментами. Авторка дисертації чітко окреслила мету роботи і логічно побудувала завдання дослідження та шляхи їхнього виконання. **Достовірність** практичної частини дисертації підтверджена відповідними актами.

Апробація основних наукових положень та прикладних аспектів дисертаційної роботи проведена шляхом доповідей та обговорень на низці міжнародних науково-технічних конференцій.

За темою дисертації **опубліковано 33 наукові праці**, серед яких: **3 монографії, 20 статей**, зокрема **14 статей** в іноземних виданнях та виданнях України, **що включені до міжнародних наукометричних баз даних, 10 публікацій у збірниках матеріалів** міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та зміст дисертації.

Дисертація складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 158 найменувань, 3 додатків та включає 265 сторінок основного тексту, 67 рисунків і 10 таблиць.

У вступі розкрито актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення роботи, зазначено особистий внесок здобувача, відомості щодо апробації та структури роботи.

У першому розділі проведено комплексний аналіз вимірювань поверхневої густини теплового потоку, актуальних для різних галузей наукових та прикладних досліджень. Встановлено, що для вирішення завдань будівельної, сільськогосподарської галузей, медицини важливими є вимірювання малих значень густини теплового потоку в діапазоні $(1 \div 1\ 000)$ Вт/м², при аерокосмічних дослідженнях $(100 \div 20\ 000)$ Вт/м², контролі об'єктів енергетики та пожежних випробуваннях актуальними є вимірювання теплового потоку густиною до 200 000 Вт/м². Для реалізації вимірювань застосовують як контактні сенсори теплового потоку, так і приймачі теплового випромінювання.

Ковтун С.І. показала, що сьогодні в Україні метрологічно забезпечено вимірювання поверхневої густини теплового потоку в діапазоні, межі якого на порядок вужчі від затребуваних. До того ж, в силу відмінності способу відтворення теплової енергії в УВТ-1 та в ДЕТУ 11-01-96, їхнє звірення наразі неможливе. Все це не сприяє єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку та вимагає пошуку шляхів створення єдиного метрологічного комплексу для калібрування та перевірки як контактних так і безконтактних засобів вимірювання.

В роботі проаналізовано світові тенденції розвитку системи метрологічного забезпечення в галузі вимірювання теплового потоку та його поверхневої густини.

Авторка розглянула еталонні засоби відтворення й передавання розміру одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку при різних видах теплообміну та ієрархічні схеми, що встановлюють супідрядності національних еталонів, розрядних еталонів та робочих засобів вимірювальної техніки. Встановлено, що найбільш широко у світовій практиці застосовують моделі абсолютно чорного тіла та криогенні радіометри, за допомогою яких відтворюють одиницю густини теплового випромінювання.

Проведений ґрунтовний аналіз сучасного стану вимірювання теплового потоку та його поверхневої густини дозволив **Ковтун С.І. сформулювати науково-прикладну проблему дисертаційного дослідження, мету та завдання дослідження**, пов'язані з необхідністю забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку теплового потоку в широкому динамічному діапазоні, що сприятиме підвищенню точності та достовірності результатів вимірювання.

У другому розділі, який на думку рецензента є ключовим, сформовано узагальнену методологію забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку та розроблено концепцію модульної побудови еталону в широкому динамічному діапазоні.

Розроблена *Ковтун С.І.* методологія забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку реалізується за такими етапами:

- комплексний аналіз фізичних механізмів формування одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні;
- аналітичне дослідження впливу різних факторів на точність відтворення одиниці вимірювання, виділення найбільш вагомих з них, вплив яких піддається корегуванню;
- розроблення концепції побудови еталону фізичної величини;
- створення апаратно-програмних засобів реалізації еталону та передавання розміру одиниці вимірювання;
- розроблення методичного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку.

Важливо зазначити, що теоретичним базисом забезпечення єдності вимірювань є фізичні та математичні моделі теплового поля для формування вхідних даних при відтворенні та передаванні одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

У свою чергу, при вимірюваннях просторово-часових характеристик теплових полів за різних процесів теплообміну враховуються як фізичні закони теплопередавання, так і сучасні досягнення математичної та прикладної фізики, результати математичного та комп'ютерного моделювання.

Для вирішення сформульованої в роботі науково-прикладної проблеми запропоновано загальну модель теплового поля, як об'єкту дослідження, у виді векторного випадкового поля, а для обґрунтування можливості розширення діапазону вимірювання поверхневої густини теплового потоку запропоновано математичну модель, яка ілюструє взаємозв'язок між процесом відтворення одиниці вимірювання та окремими складовими джерел невизначеності, що впливають на точність формування одиниці вимірювання за різних процесів теплообміну.

Результатом моделювання стало обґрунтування доцільності розділення динамічного діапазону за густиною теплового потоку на частини, в кожній з яких відтворення одиниці вимірювання відбувається із застосуванням різних фізичних законів. На підставі цього розроблено концепцію побудови еталону поверхневої густини теплового потоку за модульним принципом.

Третій розділ присвячено питанням метрологічного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку за кондуктивного підведення теплової енергії в діапазоні $20 \dots 2 \cdot 10^3$ Вт/м².

Показано, що найсуттєвіші переваги відтворення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку та передавання її розміру має кондуктивний метод, а також запропоновано структурну модель формування невизначеності результатів вимірювання за кондуктивним методом у вигляді причинно-наслідкової діаграми. У свою чергу, елементами діаграми є вхідні фактори та величини, які безпосередньо вимірюють для визначення поверхневої густини теплового потоку, а також фізичні ефекти, що мають вплив на кінцевий результат – точність відтворення розміру одиниці вимірювання.

У результаті досліджень встановлено, що основними джерелами невизначеності результату вимірювання є:

1. Вимірювання напруги на виводах нагрівника вольтметром; калібрування вольтметра в діапазоні вимірюваних значень напруги на виводах нагрівника; розрядність вольтметра; вимірювання напруги на виводах міри електричного опору вольтметром; калібрування вольтметра в діапазоні вимірюваних значень напруги на виводах міри електричного опору;

калібрування міри електричного опору (при визначенні теплової потужності електричного струму, що підводиться до нагрівника).

2. Вимірювання діаметра нагрівника штангенциркулем; калібрування штангенциркуля (при визначенні площі нагрівника).

3. Теплові втрати зумовлені дрейфом температури, теплоємністю нагрівника та некомпенсованим тепловим потоком, як додаткові джерела.

На основі проведених досліджень виявлено визначальний вплив на невизначеність результату відтворення одиниці вимірювання кондуктивним методом втрати потужності через теплоємність джерела теплової енергії. Запропоновано компенсувати цей вплив зменшенням теплоємності основного нагрівника. Отримано розподіл відповідної складової невизначеності в діапазоні значень поверхневої густини теплового потоку від 10 Вт/м^2 до $2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ при варіації геометричного параметра нагрівника, для значення добутку $c_p = 2 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$ та швидкості дрейфу температури, яка за отриманими експериментальними даними не перевищує $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ К/год}$.

Встановлено, що зменшення теплоємності основного нагрівника шляхом зменшення його геометричного розміру (товщини) сприяє зменшенню складової невизначеності результату вимірювання. Діапазон відтворюваних значень поверхневої густини теплового потоку може бути розширений вниз завданням граничного значення оцінки складової невизначеності на рівні, який не призведе до збільшення сумарної невизначеності вимірювання, при зменшенні товщини нагрівника. Експериментальну перевірку зроблених висновків здійснено дослідженням сумарної невизначеності результатів вимірювання при застосуванні нагрівника товщиною $1,5 \text{ мм}$ та розрахунковою теплоємністю $8,5 \text{ Дж / К}$.

Особливості технології виготовлення основного нагрівника, що реалізована в рамках даної роботи, унеможливають зменшення його товщини понад $1,5 \text{ мм}$, що накладає обмеження на застосування кондуктивного методу калібрування в широкому динамічному діапазоні.

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

Ковтун С.І. показала правомірність гіпотези щодо локальної термодинамічної рівноваги і, отже, закону Кірхгофа, до теплообміну в замкнутому просторі порожнини вимірювальної комірки. Це твердження має місце в силу того, що відтворення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку у вказаному діапазоні реалізується за малих значень різниці температури джерела теплової енергії та теплосприймальної поверхні засобу вимірювання. У цьому випадку коефіцієнт випромінювання вважається рівним коефіцієнту поглинання. Схема, що реалізує радіаційний спосіб відтворення нормованої теплової енергії, передбачає наявність в пристрої замкнутого простору, утвореного двома дифузно випромінювальними поверхнями.

За результатами досліджень встановлено, що локальний сумарний кутовий коефіцієнт радіаційного теплообміну поверхні сенсора з торцевою і бічною поверхнями випромінювальної порожнини не залежить від радіуса і дорівнює одиниці.

П'ятий розділ присвячено розробленню модуля теплового блоку еталону поверхневої густини теплового потоку для забезпечення єдності вимірювань в діапазоні $(1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5) \text{ Вт/м}^2$.

Спираючись на результати розділи 3, де показано, що застосування кондуктивного методу формування одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку при високоінтенсивному процесі теплообміну обмежене термостійкістю матеріалів вимірювальної

комірки та досліджуваного засобу вимірювання, запропоновано формування високоінтенсивного теплового потоку здійснювати радіаційним методом.

Розроблена вимірювальна комірка у вигляді замкнутого простору, утвореного двома дифузно випромінювальними поверхнями: джерела та стоку теплової енергії, а також захисного екрану, що складається з чотирьох плоских дзеркальних поверхонь. Точність вимірювання в пристроях такого типу залежить як від ступеня напівсферичності падаючого випромінювання, так і від рівномірності розподілу значень густини теплового потоку, що надходить на тепловідвід. Однак, внаслідок замкнутості простору і певних граничних умов поля температури і теплового потоку зазнають спотворення, які не повинні поширюватися на площу чутливої зони засобу вимірювання. Тобто повинна існувати зона, в якій густина теплового потоку є однорідною величиною. Розміри цієї зони залежать в кожному конкретному випадку від багатьох чинників – як геометричних, так і теплофізичних.

Для визначення розподілу поля потоку теплового випромінювання по поверхні тепловідводу визначено інтенсивність ефективного випромінювання кожної поверхні випромінювання через рівняння переносу енергії випромінюванням у виді векторного поля.

Проведено комп'ютерне моделювання процесу теплообміну у вимірювальній комірці при застосуванні discrete ordinates моделі переносу енергії випромінюванням та запропоноване конструкція вимірювальної комірки, що забезпечує відтворення потоку високої інтенсивності.

Для передавання розміру одиниці вимірювання автором запропоновано застосування квазідефернціального приймача теплового випромінювання. Показано, що розроблений приймач теплового випромінювання дозволяє проводити вимірювання густини потоку теплового випромінювання в діапазоні $10 \div 100$ кВт/м² з розширеною невизначеністю $U_q = \pm 1,5\%$ при коефіцієнті охоплення $k=2$, що дає підстави пропонувати його як засіб передавання одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

Шостий розділ присвячено розробленню апаратно-програмного забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку та розвитку окремих складових його нормативного забезпечення. Розроблено апаратну частину, що включає три теплових блоки, в яких забезпечено реалізацію методів відтворення та передавання розміру одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні.

Розроблене програмне забезпечення, призначене для обчислення та індикації значень вимірюваних величин і запису даних для документування у файл. Програмне забезпечення дозволяє створювати індивідуальні конфігураційні файли для кожної реалізації процесу вимірювання, визначати порядок опитування каналів, встановлювати проміжок часу між опитуванням каналів і періодичність опитування, швидкість обміну і номер порту комп'ютера. Це дає можливість для кожного типу досліджуваного засобу вимірювання мати свій конфігураційний файл.

Важливим аспектом забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку є простежуваність вимірювань до Міжнародної системи одиниць.

В роботі розглядається два шляхи реалізації простежуваності результатів вимірювання, а саме поелементна простежуваність та простежуваність до національного еталону.

Запропонована **Ковтун С.І.** ієрархічна схема 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/м² до 10^5 Вт/м² із середнім квадратичним відхиленням результату вимірювання, що не перевищує $0,25 \cdot 10^{-2}$, при цьому межа невиключеної відносної систематичної похибки не перевищує $0,3 \cdot 10^{-2}$.

Для методичного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку із застосуванням контактних засобів вимірювання вдосконалено спосіб калібрування сенсорів теплового потоку, що дозволило реалізувати процедуру перевірки на місці експлуатації без демонтажу сенсорів. Запропонований спосіб реалізується у два етапи.

Здобувач розробила інформаційно-вимірювальну технологію забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку, яка поєднує у собі теоретичний базис, програмне забезпечення, запропоновані апаратні засоби реалізації еталону за модульним принципом, його метрологічний аналіз та схема забезпечення єдності вимірювань, методики дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання, що дозволяє адаптувати основні положення метрологічного забезпечення теплових величин до конкретних просторових і часових аргументів реалізації процесу вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

За результатами досліджень обґрунтовано перспективні напрями розвитку метрологічного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку в широкому діапазоні, що задовольнить потреби у теплових вимірюваннях для різних галузей наукових і прикладних досліджень.

В цілому, дисертація *Ковтун С.І.* характеризується завершеністю, вдалою структурою і логічною послідовністю викладення матеріалу. Висновки у розділах, а також загальні висновки відповідають отриманим у дисертації науковим і практичним результатам.

Дисертація й автореферат цілком відповідають паспорту спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин.

Зміст автореферату й основних положень дисертації ідентичні. Практична частина роботи представлена відповідними актами впровадження.

Зауваження до тексту дисертації

1. Вимірювальна комірка модуля еталону для відтворення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку кондуктивним методом розрахована на один типорозмір сенсорів теплового потоку. Яким чином може бути реалізоване калібрування сенсорів інших типорозмірів?

2. З тексту дисертації не зрозуміло, яким чином враховується нерівномірність розподілу потоку теплового випромінювання на поверхні сенсору теплового потоку під час калібрування, якщо площа його теплосприймальної поверхні відрізняється від площі вхідної діафрагми квазидиференціального приймача теплового випромінювання.

3. Процедура передавання одиниці вимірювання в роботі прописана лише для кондуктивного методу. Варто було б прописати процедуру у вигляді методики калібрування засобів вимірювання і за інших способів відтворення одиниці вимірювання.

4. В авторефераті не зазначено теплові режими, за яких здійснюється передавання одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

5. Вважав би за доцільне в авторефераті при описі запропонованої концепції модульної побудови еталону поверхневої густини теплового потоку детальніше описати, що слугувало критерієм поділу динамічного діапазону на три частини.

6. У тесті дисертації та авторефераті зазначено: «За темою дисертації опубліковано 33 наукові праці, серед яких: 3 монографії, 20 статей, зокрема 14 статей в іноземних виданнях та виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз даних». Така формула відповідає вимогам, які висуваються до дисертацій. Однак, для кращого розуміння рівня наукових досліджень доцільно було уточнити, скільки статей включені до наукометричної бази даних Web of Science, SCOPUS, Copernicus тощо.

7. У тексті дисертації зустрічаються стилістичні та граматичні помилки.

Висновок

Наведені зауваження та побажання жодним чином не впливаю на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи *Ковтун С.І.*, яка є завершеним науковим дослідженням, що містить отримані особисто здобувачем нові наукові результати, які вирішують важливу науково-прикладну проблему 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.

Сформульовані у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації повністю відображені у монографіях, наукових статтях, опублікованих у фахових виданнях, та доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях.

Можна з упевненістю стверджувати, що отримані *Ковтун С.І.* наукові результати завершують формування **нового наукового напрямку «Основи забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку»**.

Дисертаційна робота *Ковтун С.І.* відповідає паспортів спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка) і профілеві спеціалізованої вченої ради Д 26.224.02.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи *Ковтун Світлани Іванівни «Науково-технічні засади забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку»* можна зробити висновок про те, що за актуальністю вирішеної науково-прикладної проблеми, отриманими науковими результатами і практичною цінністю роботи, вона відповідає пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. за № 567 зі змінами від 27 липня 2016 р., а її авторка, *Ковтун С.І.*, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка).

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри захисту інформації
Національного університету
«Львівська політехніка»


В.А. Ромака

Підпис Ромаки Володимира Афанасійовича
засвідчую:

Вчений секретар Національного університету
«Львівська політехніка», к.т.н., доцент




Р.Б. Брилинський