

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Ковтун Світлани Іванівни** на тему **“Науково-технічні засади забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку”**, яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин

### Актуальність теми.

Впродовж останніх десятиліть пряме вимірювання поверхневої густини теплового потоку набуло поширення в різних областях досліджень теплових процесів в Україні та країнах світу.

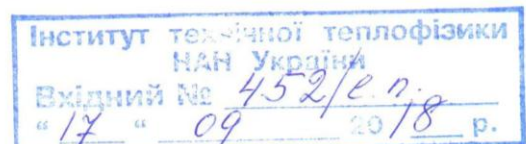
Для вирішення проблем енерго- та ресурсозбереження актуальними стають дослідження та модернізація теплоенергетичних об'єктів, енергоємних технологій, впровадження нових енергоефективних матеріалів. В цих умовах суттєвого значення набувають вимірювання, оперативний контроль і регулювання теплових процесів, інформативною характеристикою яких є тепловий потік.

Визначальною характеристикою будь-яких товарів та послуг для споживачів усіх країн світу є їх якість. А це означає, що якістю продукції та послуг необхідно керувати, мати змогу кількісно оцінювати та аналізувати показники роботи різноманітних галузей промисловості. Саме для цієї мети проводяться метрологічні дослідження, подальше розповсюдження та систематизація яких мають першочергове значення для просування українських виробів на світовий ринок. Якісне метрологічне забезпечення вимірювань у теплотричній галузі – це шлях до скорочення бюджетних витрат на підготовку та проведення відповідних досліджень, а також до підвищення конкурентоздатності вітчизняних товарів та послуг як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринку України, без чого неможливий динамічний розвиток економіки.

У зв'язку з цим для України дуже важливим і вкрай необхідним є оновлення еталонної бази та вдосконалення принципів метрологічного забезпечення теплотрії, які б відповідали сучасним потребам щодо діапазону вимірювань, границь температури експлуатації засобів вимірювання та забезпечували б достовірність результатів вимірювання, що надає дисертаційній роботі Ковтун С.І. зі створення науково-практичних засад забезпечення єдності вимірювань в широкому діапазоні особливої актуальності.

### Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Представлена дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст роботи викладено на 265 сторінках тексту, проілюстровано 67 рисунками та 10 таблицями. Список використаних бібліографічних джерел містить 158 найменувань.



Дисертаційна робота виконана відповідно до тематики науково-дослідних робіт Інституту технічної теплофізики НАН України за напрямом діяльності «Теорія вимірювання теплових величин та створення нових теплофізичних приладів і систем» за темами:

– 1.7.1.843 «Розвиток теоретичних засад моніторингу технічного стану об'єктів теплоенергетики та підвищення їхньої ефективності» (2012 – 2016 р. №ДР 0112U001929);

– 1.7.1.865 «Розроблення наукових основ, вимірювальних технологій та систем шумової діагностики теплоенергетичного обладнання в житлово-комунальному господарстві» (2015 – 2019 р. №ДР 0115U000776);

– НДР в рамках програмно-цільової та конкурсної тематики НАН України за договором № 55/2017 від 03.07.2017 р. (№ ДР 0117U003694)..

Зміст дисертаційної роботи, стиль та мова викладення, якість ілюстрацій відповідають вимогам МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

В анотації наведено узагальнений короткий виклад основного змісту дисертації, основні результати дослідження із зазначенням наукової новизни та практичного значення. Наводиться список публікацій здобувача темою за представленої роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, відмічено наукову новизну та практичну цінність отриманих у роботі результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, апробацію результатів роботи, обсяг і структуру дисертації.

У першому розділі наведено аналітичний огляд сучасного стану вимірювань поверхневої густини теплового потоку в різних галузях наукових та прикладних досліджень, проаналізовано світові тенденції розвитку системи метрологічного забезпечення в галузі вимірювання теплового потоку та його поверхневої густини, а також наведено дані реалізованого вперше міжлабораторного звірення вимірювань поверхневої густини теплового потоку в рамках проекту EUROMET.

На основі аналізу стану метрологічного забезпечення та національної еталонної бази показано, що сьогодні в Україні метрологічно забезпечено вимірювання поверхневої густини теплового потоку в діапазоні, межі якого на порядок вужчі від затребуваних. Це дозволило авторові сформулювати науково-технічну проблему, пов'язану з необхідністю забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні, та визначити завдання дослідження.

У другому розділі представлено узагальнену методологію забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку, в основу якої покладено три напрями розвитку науково-прикладних засад забезпечення єдності вимірювань, а саме: теоретичне, апаратно-програмне та методичне забезпечення.

Для вирішення науково-прикладної проблеми дослідження представлено математичну модель формування поля теплового потоку на поверхні засобу вимірювання у вигляді випадкового векторного поля. Наведено статистичні характеристики компонентів запропонованої моделі.

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, застосування якої дозволяє обґрунтувати можливості розширення меж діапазону вимірювання поверхневої густини теплового потоку.

У третьому розділі висвітлено особливості відтворення та передавання одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку в частині діапазону ( $20 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ ) за кондуктивного методу формування теплової енергії із застосуванням електричного нагрівника.

Автором розроблено структурну модель формування невизначеності результатів вимірювання за кондуктивним методом у вигляді причинно-наслідкової діаграми, елементами якої 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. При цьому, виявлено домінуючий вплив теплоємності основного нагрівника на точність відтворення поверхневої густини теплового потоку в нижній частині динамічного діапазону. На підставі аналізу цього впливу запропоновано критерій оптимізації для встановлення діапазонів застосовності кондуктивного методу підведення теплової енергії, який може застосовуватися при проектуванні як еталонних засобів вимірювання поверхневої густини теплового потоку, так і відповідних елементів робочих приладів й систем.

Виконано оцінювання сумарної невизначеності результатів вимірювання в результаті якого встановлено, що відтворення одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку в діапазоні ( $20 \dots 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ ) реалізовано із розширеною невизначеністю результатів вимірювання  $U(q) = 0,6\%$  за коефіцієнта охоплення  $k = 2$

У четвертому розділі розглянуті питання розроблення модуля еталону поверхневої густини теплового потоку в діапазоні (1-50) Вт/м<sup>2</sup>.

Запропоновано схему реалізації радіаційного способу відтворення нормованого значення теплової енергії та визначено основні чинники, що впливають на рівномірність розподілу поля теплового потоку при абсолютному методі вимірювання. Аналіз ступеня рівномірності розподілу теплового потоку по поверхні тепловідводу виконано на прикладі задачі теплообміну випромінюванням між поверхнями джерела і тепловідводу, який визначається кутовим коефіцієнтом випромінювання. Для цього розглянуто задачу поширення потоку випромінювання від обмеженої поверхні у формі диска до елементарної площадки, розташованої на поверхні тепловідводу, при чому ці поверхні знаходяться в паралельних площинах. Отримані

результати дозволили визначити зону однорідності теплового випромінення на теплоприймальній поверхні.

Автором адаптовано теплотричну методику визначення коефіцієнту емісії матеріалів та покриттів для проведення експериментальних досліджень коефіцієнту емісії поверхні сенсора теплового потоку, який застосовується для передавання розміру одиниці вимірювання.

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

Як джерело теплової енергії обґрунтовано застосування галогенних ламп розжарювання, що генерують потік теплового випромінення в ближній інфрачервоній області спектру. Визначення розподілу поля потоку теплового випромінення по поверхні тепловідводу проведено шляхом дослідження інтенсивності ефективного випромінювання кожної поверхні вимірювальної комірки за допомогою рівняння переносу енергії випромінювання у виді векторного поля.

Наведені результати зіставлення експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання розподілу поля теплового потоку на поверхні тепловідводу в зоні розташування досліджуваних засобів вимірювання, що ілюструють їх задовільне узгодження.

Для контролю потоку теплового випромінення у верхній частині діапазону запропоновано застосування порожнинного квазидиференціального приймача теплового випромінювання. Запропоновано та апробовано методику дослідження його метрологічних характеристик. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що квазидиференціальний приймач теплового випромінювання дозволяє проводити вимірювання густини потоку теплового випромінення в діапазоні значень  $(10 \div 100)$  кВт/м<sup>2</sup> з розширеною невизначеністю  $U_q = \pm 1,5\%$  при коефіцієнті охоплення  $k = 2$ .

В шостому розділі наведено результати розроблення апаратно-програмних засобів для забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку та розвитку окремих складових його методичного забезпечення.

Апаратна частина еталону включає три теплових блоки, в яких забезпечено реалізацію методів відтворення та передавання розміру одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку відповідно до запропонованої у другому розділі концептуальної моделі.

В рамках методичного забезпечення вимірювань поверхневої густини теплового потоку із застосуванням контактних засобів вимірювання вдосконалено спосіб калібрування сенсорів теплового потоку, що дозволило реалізувати процедуру повірки на місці експлуатації без демонтажу сенсорів.

Наведено обґрунтування способів реалізації простежуваності результатів вимірювання, зокрема, розглядаються поелементна простежуваність до основних одиниць фізичних величин SI та простежуваність до національного еталону енергетичної освітленості некогерентним випроміненням за допомогою методу звірення.

Наприкінці автором розглядаються перспективні напрями розвитку системи забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні в інтересах теплометрії різноманітних галузей наукових та прикладних досліджень.

До додатків включено список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації із зазначенням назв конференцій, місць і дат проведення та форми участі, інформацію про дослідження метрологічних характеристик еталону поверхневої густини теплового потоку за кондуктивного підведення теплової енергії та акти впровадження результатів дисертації.

#### **Достовірність результатів дисертаційної роботи.**

Достовірність наукових результатів забезпечена застосуванням сучасних методик теоретичних і експериментальних досліджень, використанням прецизійних засобів вимірювання, які пройшли процедуру калібрування відповідно до встановлених вимог.

Апробація основних наукових положень дисертації проведена на 18 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних і науково-практичних конференціях, що відповідають тематиці роботи.

#### **Наукова новизна дисертаційної роботи.**

З точки зору офіційного опонента найвагоміші наукові результати роботи такі:

1. На підставі комплексного аналізу відомих методів і засобів вимірювання теплового потоку та сучасного стану їхнього метрологічного забезпечення розроблено вперше запропоновано концепцію побудови еталону поверхневої густини теплового потоку за модульним принципом, яка полягає у розділенні динамічного діапазону на три частини, що дозволило розширити на порядок діапазон відтворюваних величин за встановлених значень їх невизначеності.

2. Вперше представлено математичну модель теплового поля, як об'єкту дослідження, у виді векторного випадкового поля, що дало змогу проаналізувати формування однорідного у просторі і стаціонарного у часі теплового потоку на теплоприймальній поверхні засобу вимірювання.

3. На основі аналізу складових сумарної невизначеності відтворення поверхневої густини теплового потоку за кондуктивного способу підведення теплової енергії, 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.

4. Вдосконалено спосіб калібрування термоелектричних сенсорів теплового потоку шляхом проведення калібрування сенсорів у два етапи та визначення поправки на коефіцієнт перетворення сенсорів в умовах експлуатації, що забезпечує підвищення точності вимірювання поверхневої густини теплового потоку та проведення процедури перевірки без демонтажу сенсора.

5. Розвинуто інформаційно-вимірювальну технологію забезпечення єдності вимірювання поверхневої густини теплового потоку в широкому діапазоні, що дозволило розширити предметні сфери застосування сенсорів теплового потоку.

#### **Практична цінність дисертаційної роботи.**

Практична цінність роботи полягає в тому, що реалізація запропонованої концептуальної моделі еталону поверхневої густини теплового потоку за модульним принципом дозволила забезпечити відтворювання та передавання розміру одиниці вимірювання в розширеному на порядки (у порівнянні з існуючими межами) діапазоні вимірювань.

Удосконалений спосіб калібрування сенсорів теплового потоку дозволяє проводити процедуру перевірки засобів вимірювання на місці експлуатації без демонтажу сенсорів, що є актуальним для вирішення низки прикладних завдань.

Запропонована ієрархічна схема дозволяє організувати простежуваність результатів вимірювання поверхневої густини теплового потоку до Державного еталону.

#### **Повнота викладення основних результатів в опублікованих працях.**

Основні наукові положення опубліковані в період з 2013 по 2018 роки. Зміст дисертаційної роботи достатньо повно відображений в опублікованих 33 наукових працях, зокрема, 3 монографіях, 20 статей у наукових (в тому числі електронних) фахових виданнях України та інших держав, серед яких 14 публікацій у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, та 10 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

Конкретний персональний внесок здобувача в роботи, які написані у співавторстві, відображений як в дисертації, так і в авторефераті.

Текст автореферату адекватно відображає зміст, структуру та основні положення дисертації.

#### **Зауваження до змісту дисертації та автореферату:**

1. В розділах 4 і 5 дисертації розглядаються джерела невизначеностей результатів вимірювання за радіаційного способу формування теплової енергії. На мою думку, варто було б їх систематизувати та з відповідними оцінками подати у вигляді бюджету невизначеностей, як, наприклад, це зроблено в розділі 3 для кондуктивного способу.

2. На графіках розподілу значень кутових коефіцієнтів випромінювання по поверхні тепловідводу при варіації відносної висоти порожнини випромінювача, що представлені на рисунку 5.2, відсутні позначення отриманих даних, що ускладнює їх інтерпретацію.

3. За результатами проведеної роботи процедура калібрування робочих засобів вимірювання поверхневої густини теплового потоку не оформлена у вигляді нормативного документу.

4. Для підтвердження статусу розробленого еталону поверхневої густини теплового потоку варто було б провести міжнародні звірення.

**Висновок про відповідність дисертації вимогам «Порядку...»**

Не зважаючи, на наведені зауваження, вважаю, що вони не знижують загальну позитивну оцінку представленої дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Ковтун С.І. «Науково-технічні засади забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку» є завершеною працею, містить висунуті здобувачем нові наукові положення, а також науково-обґрунтовані теоретичні і експериментальні результати, що в сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему, що полягає у забезпеченні єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку в широкому динамічному діапазоні за рахунок реалізації еталону за модульним принципом.

Робота характеризується єдністю змісту і свідчить про особистий внесок здобувача у науку.

Мета роботи, поставлені та розв'язані в ній завдання, викладені основні наукові результати дозволяють зробити висновок про те, що О.З.Готри засвідчують, що дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин та профілю спеціалізованої вченої ради Д 26.224.02.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи Ковтун С.І. «Науково-технічні засади забезпечення єдності вимірювань поверхневої густини теплового потоку» можна зробити висновок про те, що за актуальністю, науковим рівнем, отриманими науковими результатами та практичною цінністю вона відповідає пп. 9, 10, 12, 13 «Постанови КМ від 24.07.2013 № 567» (зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015, № 567 від 27.07.2016), а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
керівник відділу телеінформатики та  
медичної діагностики Інституту електроніки  
та інформаційних технологій  
Люблінської політехніки

О.З. Готра

Z-ca DYREKTORA ds. kształcenia  
Instytutu Elektroniki i Techniki Informacyjnych

Підпис Готри О.З. засвідчую  
заступник директора Інституту електроніки та  
інформаційних технологій Люблінської політехніки

Dr inż. Wojciech Surtel

Войцех Суртель