

У спеціалізовану вчену раду Д 26.224.02
Інституту технічної теплофізики НАН України

ВІДГУК

офіційного опонента, професора кафедри приладів і систем неруйнівного контролю НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктора технічних наук, професора **Куца Юрія Васильовича**, на дисертаційну роботу **Воробйова Леоніда Йосиповича** на тему

“Науково-практичні засади кондуктивної калориметрії”,

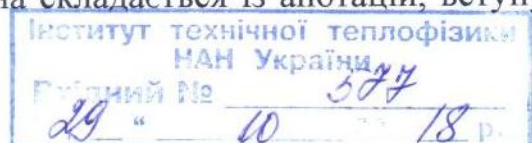
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин

Актуальність теми. Відповідно до Закону України про «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» на період до 2020 року до числа таких напрямів віднесені: енергетика та енергоефективність; раціональне природокористування; нові речовини і матеріали. До кожного з цих пріоритетних напрямів пряме і безпосереднє відношення має калориметрія, яка є галуззю вимірювальної техніки та метрології і уявляє собою сукупність методів вимірювання кількості теплоти, що виділяється або поглинається під час перебігу різних фізичних або хімічних процесів.

Історія калориметрії налічує понад 250 років, але ця наука продовжує активно розвиватись, ставлячи і вирішуючи нові завдання, створюючи нові методи і засоби вимірювань. На сьогоднішній день актуальними напрямками її розвитку є розширення діапазону вимірюваної енергії як у сторону збільшення, так і у сторону вимірювання малих енергій – мікроват та нановат; підвищення швидкодії та продуктивності засобів вимірювань; покращення метрологічних характеристик, а саме, точності та відтворюваності вимірювань; зменшення маси і габаритів калориметричних приладів; удосконалення конструкції та технології виготовлення чутливих елементів кондуктивних калориметричних систем.

Виходячи з цього, актуальність теми дисертаційної роботи Л.Й. Воробйова, яка присвячена розвитку наукових засад побудови, розроблення та практичного застосування кондуктивних калориметричних систем та засобів з покращеними експлуатаційними та метрологічними характеристиками, які призначені для визначення теплофізичних властивостей речовин та параметрів процесів, не викликає сумніву.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається із анотацій, вступу,



п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 378 найменувань та 3 додатків. Робота викладена на 296 сторінках основного тексту та містить 121 рисунок і 18 таблиць.

В анотації подано узагальнений короткий виклад основного змісту дисертації, представлені основні результати дослідження із зазначенням їх наукової новизни та практичного значення.

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

Перший розділ присвячено аналітичному огляду методів калориметрії, на підставі яких проведено класифікацію калориметрів; розглянуто первинні перетворювачі кондуктивних калориметричних приладів та наведені приклади реалізації калориметричних засобів вимірювань. Розглянуто методи моделювання калориметричних систем. За результатами проведених досліджень сформульовано науково-прикладну проблему та визначено завдання дисертаційного дослідження, виконання яких дозволяє удосконалити методи та засоби кондуктивної калориметрії.

У другому розділі запропоновано та обґрунтовано методи калориметричних вимірювань, які дають змогу зменшити вплив зовнішніх збурень на результати вимірювань, зменшити масо-габаритні характеристики приладів та підвищити їх швидкодію та продуктивність. Розглянуто узагальнену модель однокоміркового калориметра та модель диференціального кондуктивного калориметра, на підставі яких обґрунтовано методи квазидиференціальної калориметрії.

Показано, що перспективним напрямом розвитку квазидиференціальних методів калориметричних вимірювань є створення багатокоміркових систем калориметрії.

Розглянуто метод динамічного вимірювання імпульсного тепловиділення шляхом екстраполяції вихідного сигналу калориметра в регулярному режимі і обґрунтована можливість зменшення тривалості та підвищення продуктивності калориметричних вимірювань.

У третьому розділі подано результати удосконалення методу прогнозування чутливості перетворювачів на етапі проектування, який забезпечує зменшення похибки розрахунку і пояснює залежність чутливості перетворювача від товщини та теплофізичних властивостей його поверхневого шару.

Розглянуто перетворювачі теплового потоку, що містять послідовно включені спіралі з дротів хромелю та алюмелю з нанесеним нікелевим

покриттям. На базі таких перетворювачів розроблений внутрішньореакторний калориметр, який може експлуатуватися в умовах ядерного випромінювання.

Дисертантом запропоновано технологію виготовлення циліндричного перетворювача теплового потоку для застосування у калориметричних приладах.

Важливим результатом, отриманим дисертантом є методика оцінювання складової похибки вимірювання, яка виникає внаслідок взаємодії нерівномірності просторової чутливості перетворювача та неспівпадіння розподілів теплового потоку у калориметричній комірці при дослідженні різних процесів.

У четвертому розділі наведенні описи принципів дії і структури, а також надана інформація про технічні і метрологічні характеристики розроблених на підставі отриманих теоретичних результатів вимірювальних засобів визначення теплофізичних властивостей палив, матеріалів, сировини.

Подано інформацію про квазидиференціальний бомбовий калориметр, призначений для вимірювання теплоти згоряння різноманітних видів органічних палив. Наведено результати вимірювання теплоти згоряння різних речовин – паливних пелет та брикетів, торфу, біодизеля, відходів.

Розглянуто створену багатокоміркову калориметричну систему для вимірювання теплоємності матеріалів методом покрового сканування.

Представлено результати розроблення калориметричної системи з поворотним модулем, яка призначена для визначення теплофізичних властивостей цементно-бетонної суміші в процесі гідратації. Така система дозволяє в одному досліді одночасно вимірювати теплоту гідратації та теплопровідність досліджуваної суміші.

Описано створену систему синхронного теплового аналізу, що призначена для визначення питомої теплоємності та вимірювання теплоти випаровування рідин з різноманітних речовин і матеріалів, у тому числі з неоднорідною складною структурою.

У п'ятому розділі подано інформацію щодо розроблених методів та калориметричних засобів визначення параметрів теплофізичних процесів.

Представлено створений комплекс приладів для вимірювання радіаційного теплового потоку, а саме: радіометр, піргеліометр та два типи піранометрів.

Розглянуто метод визначення інтегральних теплових втрат на ділянці теплотраси та створені комплекси приладів для прецизійного вимірювання температури теплоносія із занурюваними термометрами опору. Удосконалені методи вимірювання температури теплоносія із застосуванням накладних комбінованих перетворювачів. Запропонований метод і прилади дозволяють визначати інтегральні теплові втрати на ділянці трубопроводу та забезпечують

можливість прецизійного вимірювання температури теплоносія у режимі експлуатації без відключення споживачів.

У сукупності отримані наукові та практичні результати надали можливість обґрунтувати основні тенденції подальшого розвитку калориметрії.

У *висновках* сформульовано основні наукові результати, що отримані в ході виконання дисертаційного дослідження.

У *додатках до дисертаційної роботи* наведено список публікацій дисертанта за темою представленої роботи, копії свідоцтва про метрологічну атестацію та перевірку розроблених вимірювальних засобів, матеріалів експериментальних досліджень, проведених з використанням створених приладів, копії тринадцяти актів впровадження та використання результатів роботи.

Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації.

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, яка полягає в розвитку й удосконаленні методів кондуктивної калориметрії, що забезпечують покращення метрологічних та експлуатаційних характеристик теплометричних засобів. До найбільш вагомих наукових результатів дисертації, на мою думку, слід віднести наступні:

1) вперше обґрунтовано та розроблено методи квазидиференціальної та мультиреферентної калориметрії, які забезпечують зменшення впливу зовнішніх завад, масо-габаритних характеристик приладів, а також компенсацію динамічних збурень в калориметрах теплового потоку зі складною конфігурацією комірок та реакційних посудин;

2) розвинуто метод динамічного вимірювання імпульсного тепловиділення шляхом екстраполяції вихідного сигналу калориметра в регулярному режимі. Такий підхід надав можливість зменшити тривалість експериментальних досліджень та підвищити продуктивність калориметричних вимірювань для завдань визначення енергії короткотривалих імпульсів тепловиділення;

3) суттєвим результатом, отриманим у роботі є метод розрахунку характеристик перетворювачів теплового потоку, в якому фізична модель перетворювача розглядається у вигляді гетерогенного тіла з замкненими включеннями з контрастною теплопровідністю. Метод забезпечує зменшення похибки розрахунку чутливості і є базою теоретичного обґрунтування залежності чутливості від товщини та теплофізичних властивостей поверхневих шарів перетворювачів;

4) в роботі запропоновано метод досліджень бетонних та цементних сумішей в процесі гідратації, в якому використовуються закономірності

теплообміну у плоскому шарі з об'ємним тепловиділенням. Це дозволяє одночасно в одному досліді вимірювати різномірні теплофізичні властивості;

5) з метою визначення теплоти випаровування рідин розвинуто метод синхронного теплового аналізу, який відрізняється врахуванням поправок на неідентичність умов теплообміну робочої комірки та комірки-референта внаслідок випаровування з поверхні зразка, що забезпечує зменшення похибки вимірювання.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що в результаті розвитку теоретичних засад кондуктивної калориметрії створено комплекс теплотричних приладів, установок та систем для вирішення широкого кола практичних задач у будівельній, теплоенергетичній, космічній галузях, тощо.

Створено і впроваджено у науковий та виробничий комплекс України калориметричні засоби нового покоління з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками, гармонізовано низку міжнародних стандартів у галузі геліоенергетики, контролю якості скла з енергоефективним покриттям та визначення теплоємності.

Практична цінність дисертації підтверджена тринадцятьма актами впровадження та використання результатів досліджень.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено використанням фундаментальних законів класичної теорії та сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на міжнародних та національних науково-технічних конференціях, метрологічною атестацією розроблених приладів.

Отримані експериментальні результати знаходяться в задовільній якійсній та кількісній відповідності до висунутих теоретичних положень.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях. Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 50 друкованих наукових роботах, серед яких 2 монографії, 25 статей у наукових фахових виданнях України, 11 публікацій у виданнях України та інших держав, які включено до міжнародних наукометричних баз даних, та 7 патентів України на винаходи.

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

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались й обговорювалися на 25 міжнародних та національних науково-технічних конференціях, симпозіумах та семінарах.

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

Зауваження по дисертаційній роботі і автореферату.

1. При проведенні моделювання квазідиференціального бомбового калориметра методом електротеплової аналогії (стор.123), згоряння проби палива у бомбі імітується прямокутним імпульсом тривалістю 20 с. Чому обрано саме таку форму імпульсу, чи відповідає вона реальності?

2. Для запропонованого у п.2.5 квазідиференціального калориметра з мультиреферентним імітатором відсутні рекомендації щодо встановлення кількості незалежних референтів. Скільки їх повинно бути? Наявність великої кількості референтів призводить до значного ускладнення структури приладу та до труднощів його калібруванням. Можливо більш доцільним є використання відомої диференціальної схеми з однаковими комірками?

3. При розгляді застосування активної адіабатної торцевої теплоізоляції стверджується, що вона забезпечує підвищення точності вимірювання теплоти за рахунок зменшення неконтрольованого теплообміну крізь торці термостатованого блоку, але відсутні будь які розрахунки, експериментальні результати та числові оцінки цього підвищення точності.

4. На стор. 217 зазначено, що систематична складова неконтрольованих втрат теплоти через торці калориметричної комірки визначена прямим вимірюванням з використанням допоміжного перетворювача теплового потоку (ПТП), але незрозумілий порядок проведення дослідження та відсутні рекомендації з вибору місця розташування допоміжного ПТП.

5. У рівняння вимірювань багатоканальної системи для визначення теплоємності (стор. 236) входить декілька температурозалежних параметрів – коефіцієнти перетворення сенсорів та власні теплоємності комірок. В роботі відсутній опис методики визначення значень цих параметрів.

6. До стилю викладення дисертації та автореферату є наступні загальні зауваження:

- здобувач не завжди притримується єдиної термінології, до прикладу, в тексті зустрічається «батарея термопар» і «батарея термоелементів; «сенсор» і «перетворювач»; «комірка-референт» і «компенсаційна комірка».

- до деяких формул наданий неповний перелік позначень.

- у тексті дисертації зустрічаються окремі стилістичні помилки.

Загальні висновки

Вищевказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують його наукову новизну

та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу теоретичних і експериментальних досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота **Воробйова Л.Й.** на тему **“Науково-практичні засади кондуктивної калориметрії”**, 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 актуальну науково-прикладну проблему розвитку теоретичних засад побудови, розроблення та практичного застосування кондуктивних калориметричних систем та засобів, які забезпечують покращення експлуатаційних та метрологічних характеристик засобів визначення теплофізичних властивостей речовин та параметрів процесів. Дисертаційна робота відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин, 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 автор, **Леонід Йосипович Воробйов**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за обраною спеціальністю.

Офіційний опонент,
професор кафедри приладів і систем
неруйнівного контролю
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
доктор технічних наук, професор

Ю. В. Куц

Ю.В. Куц

Підпис засвідчую
Вчений секретар
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



А. А. Мельниченко

А.А. Мельниченко