Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

НАЗАРЕНКО ОЛЕГ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК.536.62

КВАЗІДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ КОНДУКТИВНИЙ КАЛОРИМЕТР ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ

Спеціальність 05.11.04 – Прилади та методи вимірювання теплових величин
(152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка)

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Інституті технічної теплофізики
Національної академії наук України, м. Київ

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор
Бабак Віталій Павлович
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ,
завідувач відділу теплометрії, діагностики та оптимізації в енергетиці

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Жуков Леонід Федорович,
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів
НАН України, завідувач відділу термометрії та
фізико-хімічних досліджень

кандидат технічних наук, доцент
Крайовський Володимир Ярославович,
Національний технічний університет
«Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України,
проректор

Захист відбудеться 06 грудня 2017 р. о 10 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.02 в Інституті технічної теплофізики НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2а, актовий зал.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

Автореферат розіслано 03 листопада 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.02,
кандидат технічних наук С.І. Ковтун

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. В умовах стрімкого підвищення вартості енергоносіїв та гострого дефіциту енергоресурсів питання визначення якості палива, яке видобувається в Україні або імпортується, надзвичайно актуальне, оскільки є визначальним у формуванні обґрунтованої цінової політики, проведення економічних розрахунків тощо.

В тепловій енергетиці України існує гострий дефіцит сучасних універсальних засобів вимірювання теплоти згоряння палива, що надходить на котельні установки та теплоелектростанції. Наявність таких пристроїв дозволить підвищити точність розрахунку техніко-економічних показників теплоенергетичних установок, що призведе до економії енергоресурсів за умови значної нестабільності показників якості палива, що постачається. Такий прилад повинен, по-перше, мати задовільні для масових технічних вимірювань метрологічні характеристики, по-друге, передбачати можливість автоматизації процесу підготовки до вимірювань і самих вимірювань, і, по-третє, конструкція приладу і його вузлів повинна бути економічно виправдана в умовах дрібносерійного виробництва.

Вагомий внесок у розроблення та вирішення питань вказаної проблематики зробили закордонні та вітчизняні вчені: Е. Кальве, А. Пратт, А. Тіан, Л.І. Анатичук, Л.М. Гальперін, Г.М. Кондратьєв, В.Я. Черепанов, О.А. Геращенко та інші.

Розроблені фахівцями НАН України бомбові анероїдні калориметри серії КТС хоча й частково задовольнили потребу енергетичного ринку України у вітчизняних калориметричних засобах визначення якості різних видів палива, але наразі потребують вдосконалення. Це, в свою чергу, вимагає проведення додаткових наукових досліджень та розроблення нових конструктивних рішень, спрямованих на забезпечення похибки вимірювання теплоти згоряння на світовому рівні та одночасного суттєвого (в рази) підвищення швидкодії засобів вимірювань.

Тому розроблення і вдосконалення динамічних методів вимірювання теплоти згоряння в бомбовому калориметрі з метою підвищення точності та скорочення тривалості вимірювань є актуальним науково-прикладним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст дисертаційної роботи складають результати, отримані під час виконання госпдоговору №581 від 02.08.2010 р. «Створення, дослідження метрологічних характеристик та постачання бомбового калориметра КТС-4» та держбюджетної теми Інституту технічної теплофізики НАН України 1.7.1.843 «Розвиток теоретичних засад моніторингу технічного стану об’єктів теплоенергетики та підвищення їх ефективності» (2012 – 2016 рр., № ДР 0112U001929).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності та швидкодії визначення калорійності палива.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

– провести порівняльний аналіз видів існуючих калориметричних систем та методів оброблення вимірювальної інформації, а також напрямів вдосконалення кондуктивних калориметрів для визначення теплоти згоряння палива;

– визначити раціональні параметри теплової частини приладу і вторинної

вимірювальної і регулюючої апаратури шляхом математичного моделювання та експериментальних досліджень;

– провести моделювання та запропонувати метод налаштування динамічних характеристик компенсаційної комірки для мінімізації впливу зовнішніх збурень;

– обґрунтувати структуру та дослідити функціонування блоку керування та вимірювання для оптимізації калориметричного процесу;

– створити дослідний зразок квазідиференціальної калориметричної системи, провести експериментальні дослідження розроблених методів та системи і сформувати рекомендації щодо їх практичного використання та перспектив подальшого розвитку цього науково-технічного напряму.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання теплоти згоряння палива.

Предмет дослідження – моделі, метод та кондуктивні калориметри вимірювання калорийності палива.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні прямих методів безпосереднього вимірювання теплоти згоряння різних видів палива з застосуванням методів теорії теплообміну, термодинаміки, теплофізики, математичного моделювання, обчислювального та інженерно-фізичного експерименту, теорії вимірювань в стаціонарних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертаційній роботі:

– вперше розроблено метод квазідиференціальних вимірювань у бомбовій калориметрії, який базується на диференціальній схемі, що дозволило зменшити похибку вимірювань для калориметричного експерименту;

– вперше запропоновано модель квазідиференціального калориметра з використанням методу електротеплової аналогії, що дозволило дослідити вплив зовнішніх збурень на похибку вимірювань;

– вперше розроблено метод зменшення неконтрольованого теплообміну та аксіальних тепловтрат шляхом організації активної адіабатної теплоізоляції торців реакційної комірки, що дало можливість підвищити точність вимірювання кількості теплоти в диференціальному калориметрі;

– вперше запропоновано спосіб зменшення теплового опору теплометричної чутливої оболонки, що дало можливість підвищити вдвічі швидкість одержання результатів калориметричного експерименту;

– розвинуто метод динамічного вимірювання імпульсного тепловиділення в бомбових калориметрах, що дало можливість зменшити час опрацювання результатів вимірювання теплотворної здатності палива.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні та практичному застосуванні квазідиференціальних калориметрів та апаратно-програмних засобів вимірювання теплотворної здатності палива, в тому числі:

– розроблено узагальнену структуру та конструкцію теплового блоку квазідиференціального калориметра, що дозволило забезпечити підвищення точності та швидкодії вимірювання теплотворної здатності палива;

– створено програмне забезпечення для контролю та вимірювання калорійності палива, що дало змогу керувати процесом контролю та вимірювання;

– обґрунтовано технічні рішення та розроблено нові методи і засоби вимірювання теплотворної здатності палива з покращеними метрологічними характеристиками;

– розроблено алгоритми й програми, реалізовані в створеному квазідиференціальному калориметрі, що дозволило автоматизувати процес вимірювань та контролю, забезпечуючи при цьому високу достовірність кінцевих даних;

– на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень теплотворної здатності палива розроблено зразки квазідиференціальних калориметрів, проведено їх метрологічну атестацію та впровадження, що дало змогу здійснити імпортозаміщення вказаних засобів вимірювань. Зокрема, впроваджено бомбові калориметри типу КТС-4: у ДП «Рівнестандартметрологія» (акт від 08.02.2016 р.), НТК «ІПМаш» НАН України (акт від 07.02.2012 р.), ТОВ «Терра еколенд» (акт від 21.09.2011 р.). Результати наукових досліджень використано в навчальному процесі кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики теплоенергетичного факультету НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» (акт від 25.09.2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Моделювання теплових процесів і розрахунок раціональних параметрів квазідиференціального калориметра, розробка апаратних і програмних засобів та апробація методу налаштування динамічних характеристик компенсаційної комірки, основна частина експериментальних досліджень виконані автором самостійно. Визначення напряму досліджень, розробку конструкції, технології і схемотехнічних рішень, аналіз результатів окремих досліджень проведено в співавторстві згідно з наведеним списком літератури.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи обговорювалися на: V – X міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки» (Київ, 2007, 2011, 2013, 2015, 2017 рр.); 7-й міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2014 р.); X міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (Харків, 2016 р); 8-ма Національна науково-технічна конференція «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (Київ, 2016).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено в 16 наукових працях, у тому числі: 1 монографія, 4 статті в наукових фахових виданнях, 2 статті у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних (Index Copernicus), 2 патенти України на винахід, 6 публікацій у збірниках матеріалів Всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 152 найменувань та додатків. Дисертація містить 212 сторінок, в тому числі 127 сторінок основного тексту, 42 рисунки і 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання наукових досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про зв'язок роботи з науковими темами, апробацію результатів роботи, впровадження та публікації.

У першому розділі проведено огляд та порівняльний аналіз існуючих методів та приладів визначення теплоти згоряння палива. Зазначено, що найбільш точну та достовірну інформацію дають прямі калориметричні методи вимірювання. Запропоновано класифікацію калориметрів згоряння, що базується на аналізі способу спалювання, принципу дії та теплового режиму, особливостей конструкції приладу та агрегатного стану робочої речовини калориметра. Розглянуто принцип дії та особливості конструкції, технічні характеристики сучасних калориметрів різних типів, а також різноманітних типів бомбових калориметрів та приладів неперервної дії вітчизняного та закордонного виробництва. Крім того, розглянуто методи підвищення ефективності вимірювання теплоти згоряння калориметрами за рахунок змін конструкції та підвищення рівня автоматизації процесу вимірювання.

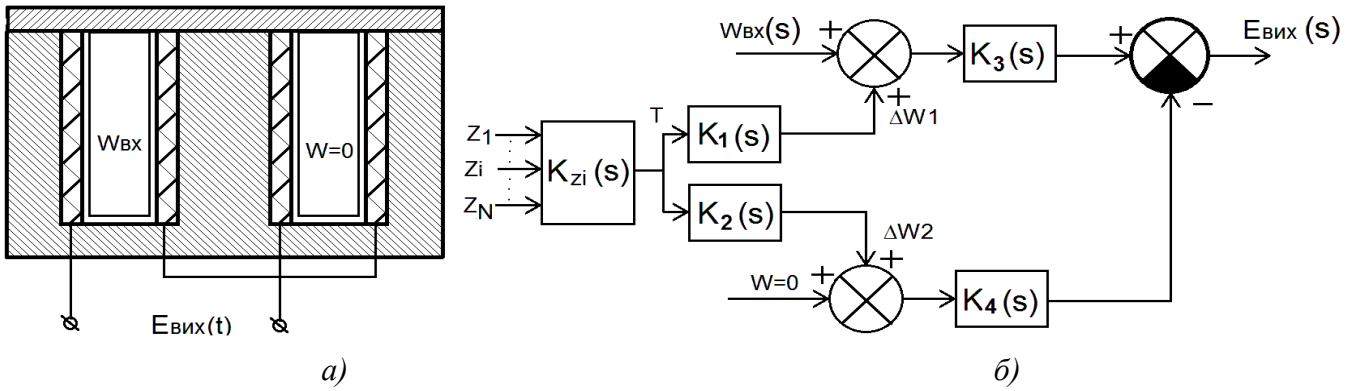
На підставі аналізу тенденцій розвитку калориметричного приладобудування зроблено висновок про те, що для сучасного етапу характерне створення комп'ютеризованих приладів з високим рівнем автоматизації процесів вимірювання, обґрунтовано доцільність переходу від рідинних (водяних) калориметрів до анероїдних приладів – масивних або кондуктивних, та підкреслено ефективність використання диференціальної схеми для суттєвого зменшення похибки вимірювань.

За результатами проведеного аналізу сформульовано мету та завдання дослідження, намічено шляхи розроблення та оптимізації кондуктивного ізоперіболічного анероїдного калориметра вимірювання теплоти згоряння.

Другий розділ присвячено моделюванню теплових процесів у квазідиференціальному кондуктивному калориметрі, дослідженню основних факторів впливу на похибку вимірювання та визначенню основних параметрів конструкції приладу.

Поряд з незаперечними перевагами калориметри теплового потоку (або кондуктивні калориметри), в порівнянні з традиційними водяними, мають низку недоліків, головний з яких – збільшення похибки вимірювань через вплив неконтрольованих зовнішніх збурень. Як ефективний спосіб розв'язання цієї проблеми в калориметрах теплового потоку запропоновано використання диференціальної схеми підключення чутливих елементів.

До складу диференціального калориметра, структуру якого показано на рис.1*а*, входять дві ідентичні калориметричні комірки, причому досліджуваний процес тепловиділення $W_{вх}$ має місце тільки в одній – основній робочій реакційній комірці, а в іншій – компенсаційній комірці, корисне тепловиділення відсутнє, тобто $W = 0$.



а) *б)*

Рис. 1. Структура (*а*) і блок-схема (*б*) диференціального калориметра

Показано, що вихідний сигнал диференціальної калориметричної системи із застосуванням операційного обчислення в області зображень за Лапласом (оператор s) можна визначити як:

$$E_{\text{вих}}(s)=W_{\text{вх}}(s)\cdot K_3(s)+\left[\sum_{i=1}^{N}Z_i(s)\cdot K_{zi}(s)\right]\cdot\left[K_1(s)\cdot K_3(s)-K_2(s)\cdot K_4(s)\right], \qquad (1)$$

За умови ідентичності параметрів основної та компенсаційної комірки

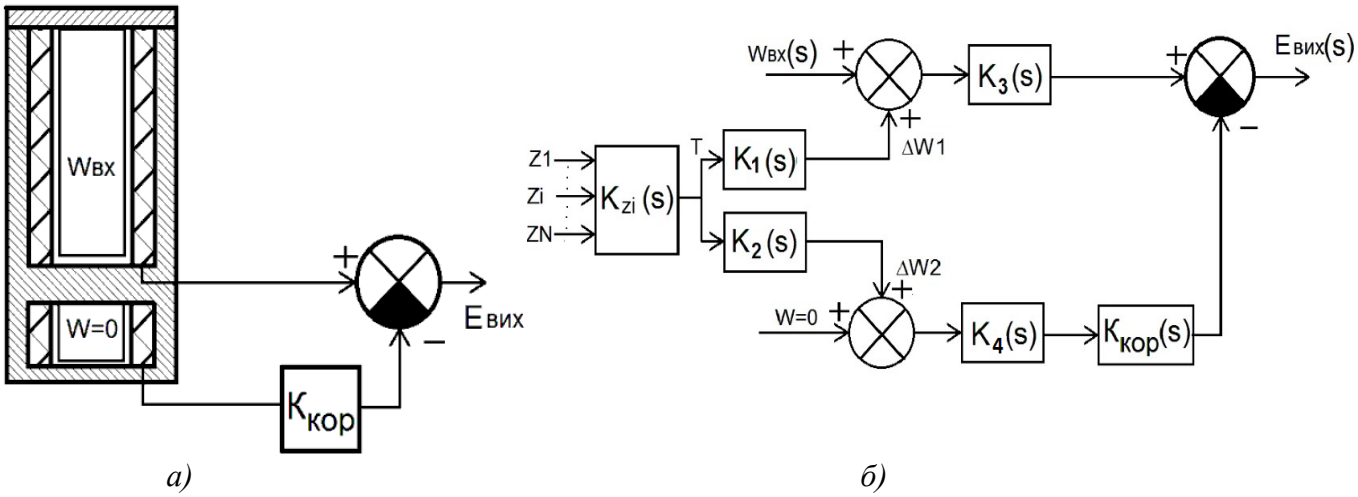
$$K_1(s)\cdot K_3(s)=K_2(s)\cdot K_4(s), \qquad (2)$$

отже рівняння (1) перетворюється до виразу:

$$E_{\text{вих}}(s)=W_{\text{вх}}(s)\cdot K_3(s). \qquad (3)$$

Оскільки чутливі елементи комірок включені диференціально, а на обидві комірки однаково впливають зовнішні збурення, вплив цих збурень на вихідний сигнал $E_{\text{вих}}$ істотно зменшується і залежить лише від ідентичності комірок і чутливих елементів. Але така схема підходить в основному для мікрокалориметрії, оскільки система термостатування масивного блоку не здатна відводити значну кількість теплоти, що виділяється в реакційній комірці. Крім того, наявність двох однакових комірок призводить до збільшення габаритів і маси пристрою. Ці недоліки особливо наочно проявляються при спробі створення диференційного бомбового калориметра за класичною схемою у випадку використання бомб, що за розмірами відповідають вимогам діючих стандартів до маси проби палива.

Для усунення зазначених суперечностей запропоновано квазідиференціальну схему калориметра, структуру якого показано на рис. 2*а*. Такий прилад має два відділення – основну робочу комірку необхідних розмірів для розміщення реакційної посудини (калориметричної бомби) і компенсаційну комірку значно меншого розміру.



а) *б)*

Рис. 2. Структура (*а*) і блок-схема (*б*) квазідиференціального кондуктивного калориметра

Для вирівнювання динамічних характеристик комірки і чутливих елементів до структури калориметра введено ланку корекції сигналу чутливого елемента компенсаційної комірки з функцією передачі $K_{\text{кор}}$ і суматор сигналів. Рівняння (1) в цьому випадку набуває вигляду:

$$E_{\text{вих}}(s)=W_{\text{вх}}(s)\cdot K_3(s)+\left[\sum_{i=1}^{N}Z_i(s)\cdot K_{zi}(s)\right]\cdot\left[K_1(s)\cdot K_3(s)-K_2(s)\cdot K_4(s)\cdot K_{\text{кор}}(s)\right], \quad (4)$$

а умова ідентичності основної та компенсаційної комірок:

$$K_1(s)\cdot K_3(s)=K_2(s)\cdot K_4(s)\cdot K_{\text{кор}}(s) \quad (5)$$

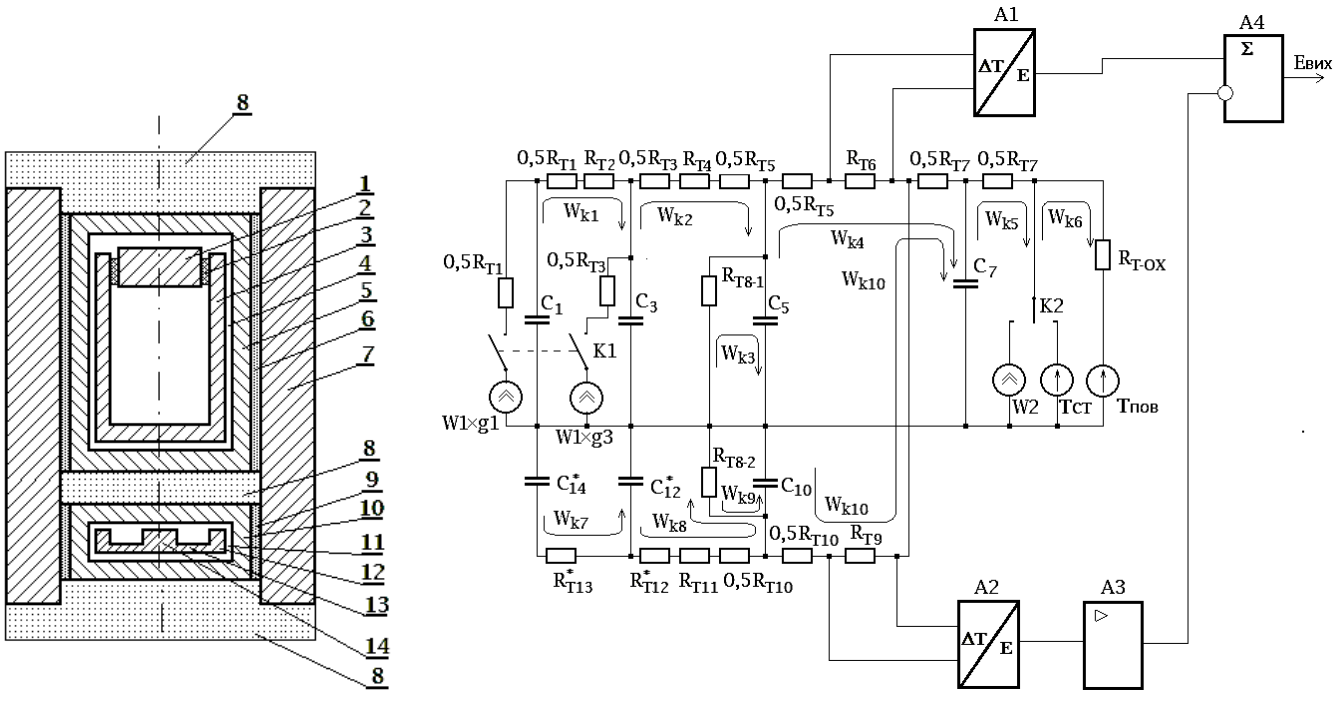
звідки

$$K_{\text{кор}}(s)=\frac{K_1(s)\cdot K_3(s)}{K_2(s)\cdot K_4(s)}. \quad (6)$$

Якщо виконується умова $\dfrac{K_1(s)\cdot K_3(s)}{K_2(s)\cdot K_4(s)}=const$, то $K_{\text{кор}}(s)=K_{\text{кор}}$.

У загальному випадку ланка корекції комплексно впливає на амплітудно-частотну характеристику ланцюга, проте іноді зручно роздільно регулювати амплітудні і частотно-часові характеристики. Застосування чутливого елемента компенсаційної комірки з такими ж питомими характеристиками, як і відповідні характеристики робочої комірки, і розміщення в компенсаційній комірці спеціального імітатора реакційної посудини забезпечує подібність частотно-часових характеристик сигналів чутливих елементів комірок. Тому в якості коригуючої ланки застосовано широкосмуговий підсилювач з регульованим коефіцієнтом підсилення.

Для визначення оптимальних параметрів і режимів роботи виконано моделювання квазідиференціального калориметра методом електротеплової аналогії. На рис. 3 представлена спрощена модель теплового блоку калориметра у вигляді багатошарової циліндричної конструкції (рис. 3*а*) та еквівалентна електротеплова схема заміщення (рис. 3*б*).



а) *б)*

Рис. 3. Модель теплового блоку квазідиференціального калориметра (*а*) та еквівалентна електротеплова схема заміщення (*б*): 1 – кришка; 2 – ущільнення кришки; 3 – стакан; 4, 11 – повітряний зазор; 5 – калориметрична комірка; 6 – основна теплометрична оболонка; 7 – теплорозсіювальний корпус; 8 – торцева теплоізоляція; 9 – теплометрична оболонка компенсаційної комірки; 10 – компенсаційна комірка; 12, 13, 14 – елементи імітатора реакційної посудини

Електричними аналогами теплового потоку і температури є, відповідно, струм і напруга. Розглянута модель складається з двох типів елементів, перший з яких має малий термічний опір та високу теплоємність, а другий – високий термічний опір та малу теплоємність.Сталеву калориметричну бомбу, що складається з масивної верхньої кришки 1 (рис. 3*а*), стакана 3 та ущільнення 2, встановлено в стакані 5 основної калориметричної комірки з повітряним зазором 4. На зовнішній поверхні комірки 5 розташовано сенсор теплового потоку 6 у вигляді циліндричної теплометричної оболонки, зовнішня поверхня якої, в свою чергу, контактує з масивним корпусом 7, термостатованим за допомогою електричного нагрівника. Тепловідведення конвективне потоком повітря. В нижній частині корпусу 7 через шар теплоізоляції 8 співвісно з основною калориметричною коміркою встановлено стакан 10 компенсаційної комірки, яка містить набір елементів 12 – 14 імітатора реакційної посудини. Зовні стакан 10 оточено компенсаційною теплометричною оболонкою – сенсором 9. Торцеві поверхні калориметра також захищені ефективною теплоізоляцією 8. Стакани комірок 5 та 10, корпус 7 та деталі імітатора реакційної посудини виконують з високотеплопровідного матеріалу, наприклад, з дюралюмінію або міді.

На еквівалентній схемі заміщення (рис. 3*б*), кожен з елементів конструкції представлений у вигляді Т-подібного RC-фільтра, у якому електричний опір є аналогом теплового опору відповідного елемента, а електрична ємність – аналог повної теплоємності. Аналогом теплової потужності, що виділяється при згорянні проби палива є джерело W1, яке розділене на дві частини з ваговими коефіцієнтами g1 та g3 для врахування розподілу енергії згоряння між кришкою 1 та стаканом бомби 3 (g1 + g3 = 1). Джерела W2 та T_{CT} відповідають тепловому режиму поверхні корпуса 7 у режимах початкового розігріву та термостабілізації, відповідно. Джерело $T_{ПОВ}$ імітує температуру повітря, що обдуває та охолоджує корпус 7. Ключі К1, К2 комутують джерела енергії відповідно різним режимам роботи калориметра.

Розрахунки теплових потоків і температури проведені методом контурних струмів із застосуванням операційного обчислення в області зображень за Лапласом. Система рівнянь для контурних теплових потоків має вигляд:

$$|Z| \times |W| = |T| \qquad (7)$$

де $|W|$ і $|T|$ – матриці-стовбці зображень контурних потоків і температур:

$$|W| = \begin{vmatrix} W_{k1}(s) \\ W_{k2}(s) \\ W_{k3}(s) \\ W_{k4}(s) \\ W_{k5}(s) \\ W_{k6}(s) \\ W_{k7}(s) \\ W_{k8}(s) \\ W_{k9}(s) \\ W_{k10}(s) \end{vmatrix} \qquad |T| = \begin{vmatrix} [T_{C1} - T_{C3} + W1(s) \cdot (g1/C_1 - g3/C_3)]/s \\ [T_{C3} + W1(s) \cdot g3/C_3]/s \\ -T_{C5}/s \\ (T_{C5} - T_{C7})/s \\ T_{C7}/s - T_{CT}(s) \\ T_{CT}(s) - T_{ПОВ}(s) \\ (T_{C14} - T_{C12})/s \\ T_{C12}/s \\ -T_{C10}/s \\ (T_{C10} - T_{C7})/s \end{vmatrix}$$

$|Z|$ – матриця зображень опорів схеми, в якій по діагоналі розташовані повні контурні опори, а інші елементи є взаємними опорами суміжних гілок контурів. Елементи Z_{ij} рядка i та стовбця j матриці зображень опорів визначають за формулами (інші елементи матриці $|Z|$ дорівнюють 0):

$$Z_{11} = 1/(sC_1) + 1/(sC_3) + R_{T1}/2 + R_{T2} \qquad Z_{12} = Z_{21} = -1/(sC_3)$$
$$Z_{22} = 1/(sC_3) + R_{T3}/2 + R_{T5}/2 + R_{T8-1} + R_{T4} \qquad Z_{23} = Z_{32} = -R_{T8-1}$$
$$Z_{33} = 1/(sC_5) + R_{T8-1} \qquad Z_{34} = Z_{43} = -1/(sC_5)$$
$$Z_{44} = 1/(sC_5) + 1/(sC_7) + R_{T5}/2 + R_{T7}/2 + R_{T6} \qquad Z_{45} = Z_{54} = -1/(sC_7)$$
$$Z_{55} = 1/(sC_7) + R_{T7}/2 \qquad Z_{78} = Z_{87} = -1/(sC_{12})$$
$$Z_{66} = R_{T-\mathrm{OX}} \qquad Z_{89} = Z_{98} = -R_{T8-2}$$
$$Z_{77} = 1/(sC_{12}) + 1/(sC_{14}) + R_{T13} \qquad Z_{9,10} = Z_{10,9} = -1/(sC_{10})$$
$$Z_{88} = 1/(sC_{12}) + R_{T10}/2 + R_{T8-2} + R_{T11} + R_{T12} \qquad Z_{4,10} = Z_{10,4} = R_{T7}/2 + 1/(sC_7)$$
$$Z_{99} = 1/(sC_{10}) + R_{T8-2} \qquad Z_{5,10} = Z_{10,5} = -1/(sC_7)$$
$$Z_{10,10} = 1/(sC_{10}) + 1/(sC_7) + R_{T10}/2 + R_{T7}/2 + R_{T9}$$

Розв'язок системи рівнянь (7) відносно зображення теплового потока $W_{ki}(s)$ має вигляд:

$$W_{ki} = \sum_{j=1}^{10} T_{jj}(s) \cdot \frac{\Delta_{ij}}{\Delta} \quad , \tag{8}$$

де Δ – визначник матриці опорів; Δ_{ij} – алгебраїчне доповнення елементу рядка i, стовпця j цієї матриці.

За умови, якщо початкові температури усіх елементів дорівнюють заданій температурі термостатування корпусу, тобто настає режим термостабілізації, розв'язок цієї системи для теплового потоку $W_{44}(s)$ крізь теплометричну оболонку, має вигляд:

$$W_{44}(s) = \frac{W1(s)}{\Delta} \cdot \left[\left(\frac{g1}{sC_1} - \frac{g3}{sC_3} \right) \cdot \Delta_{41} + \frac{g3}{sC_3} \cdot \Delta_{42} \right].$$

Показано, що для найкращої компенсації зовнішніх збурень динамічні характеристики компенсаційної комірки та імітатора реакційної посудини повинні бути подібними, тобто мають взаємно відповідати сталі часу контурів 7 та 1, 8 і 2, 10 і 4 (рис. 3*б*). Під час проектування квазідиференціального калориметра встановлюється масштабний коефіцієнт M, який дорівнює відношенню висоти робочої комірки до висоти компенсаційної комірки. Оскільки діаметри комірок однакові, справедливими є вирази:

$$R_{T9} = M \times R_{T6};\ R_{T10} = M \times R_{T5};\ C_{10} = C_5/M;. \tag{9}$$

З умови подібності динамічних характеристик контурів випливають наступні співвідношення:

$$C_{12}^* = C_3/M;\ C_{14}^* = C_1/M;\ R_{T13}^* = M \times (R_{T1}/2 + R_{T2});$$
$$R_{T10}/2 + R_{T8-2} + R_{T11} + R_{T12}^* = M \times (R_{T3}/2 + R_{T5}/2 + R_{T8-1} + R_{T4}) \tag{10}$$

Для виконання цих співвідношень конструкцією калориметра передбачено можливість експериментального підбирання значень параметрів налагодження R^*_{T12}; R^*_{T13}; C^*_{12}; C^*_{14}. відповідних компонентів за реального налаштування. Це зумовлює компенсацію можливого розкиду характеристик технологічно важко відтворюваних елементів, наприклад зазорів 4 і 11.

Моделювання динаміки теплових процесів в калориметрі проведене з використанням програмного пакету для розрахунку процесів в електричних колах Micro-Cup. Характеристики елементів робочої комірки та всієї калориметричної системи розраховані за формулами (9), (10) із застосуванням масштабного коефіцієнта $M = 10$. За допомогою моделі досліджено вплив конструктивних параметрів та низки режимних факторів на динамічні характеристики приладу та складові похибки вимірювання. Результати моделювання представлено на рис. 4 у вигляді графіків теплового потоку:

а – крізь сенсори робочої комірки (контурний струм W_{k4}) та компенсаційної комірки (контурний струм W_{k10}) з підсиленням, коефіцієнт якого чисельно дорівнює масштабному коефіцієнту $K_п = M = 10$;

б – скоригований за допомогою квазідиференціальної схеми графік теплового потоку $W_{k4} – K_п \times W_{k10}$.

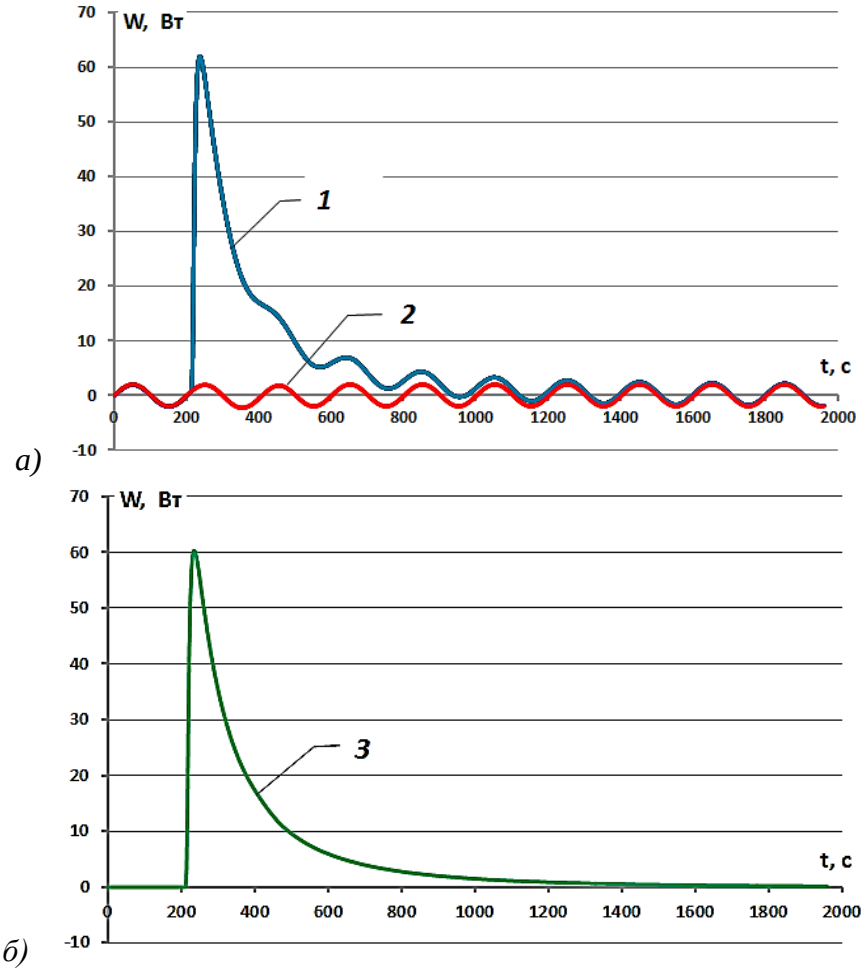
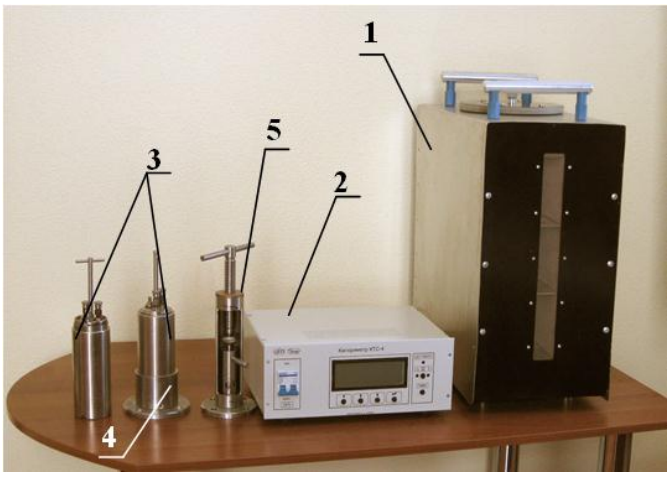


Рис. 4. Графіки теплового потоку: 1 – крізь основну калориметричну оболонку (контурний струм W_{k4}); 2 – крізь компенсаційну оболонку (контурний струм $W_{k10} \times K_п$); 3 – скоригований тепловий потік

Порівняння графіків рис. 4 демонструє ефективність застосування квазідиференціальної схеми калориметричних вимірювань – у випадку коректного вибору параметрів компенсаційної комірки та імітатора вплив збурень температури корпусу нівелюється.

На практиці у реальній калориметричній системі складно досягти повної компенсації. Проведено моделювання системи за відмінності параметрів компенсаційної комірки та імітатора на ± 10% від номінальних та досліджено величину похибки визначення енергії, що виділяється внаслідок коливань температури корпусу. Значення похибки залежить як від параметрів конструкції калориметричної системи, так і від амплітуди, періоду і фази коливань. За сталої амплітуди коливань найменші похибки спостерігаються у випадку, коли час інтегрування є кратним цілому числу періодів коливань напруги живлення, а найбільша похибка спостерігається, якщо час інтегрування складає чверть періоду коливань.

У третьому розділі описано конструкцію розробленої квазідиференціальної калориметричної системи (рис. 5), яка за своїми основними технічними характеристиками не поступається імпортним аналогам, її основних функціональних блоків та алгоритмів опрацювання вимірювальної інформації.



1 – тепловий блок;
2 – електронний блок;
3 – універсальні калориметричні бомби (2 шт.);
4, 5 – сервісне обладнання

Рис. 5. Комплектність калориметричної системи КТС-4

Основні технічні характеристики:

- діапазон вимірювань кількості теплоти 10…35 кДж;
- границі основної відносної похибки не більше ± 0,1%;
- загальний час підготовки до вимірювань не більше 1,5 год.;
- час проведення вимірювань 5…30 хв

В тепловому блоці калориметра (рис. 6) реалізовано розроблену квізідиференціальну схему (див. модель рис. 3). В термостатований блок 2 вмонтовано калориметричну чутливу оболонку 1, в якій розміщено робочу комірку 8 з реакційною посудиною – універсальною калориметричною бомбою 9. Під основною калориметричною оболонкою 1 співвісно з нею розташовано компенсаційну оболонку 10, яка має такий самий діаметр, конструкцію і щільність термоелементів, що й основна, а у висоту менша на порядок. В компенсаційній оболонці 10 встановлено імітатор 11 комірки і реакційної посудини, який має таку саму питому теплоємність на одиницю площі поверхні оболонки, що і основна оболонка.

Система термостатування блоку 2 складається з вбудованого сенсора температури 3 і електронного терморегулятора 4 з задатчиком температури 5. Виконавчими елементами системи термостатування є електричний нагрівник 6, розташований на зовнішній поверхні блока 2, і блок вентиляторів 7, який утворює потік холодного повітря в каналі навколо блока 2.

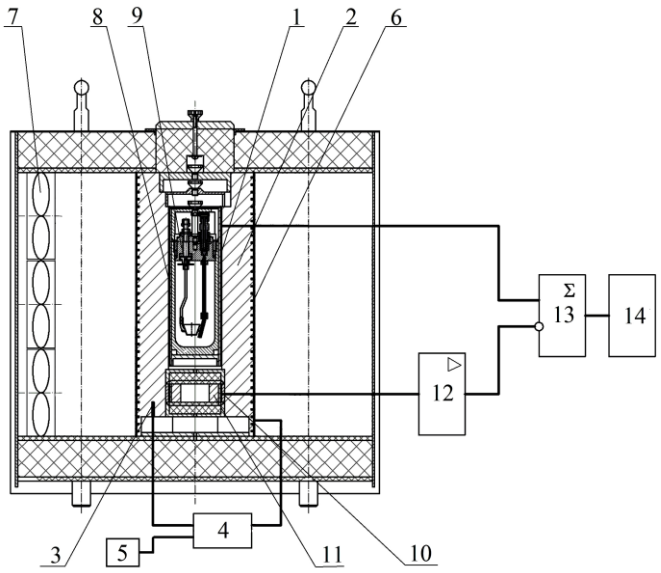
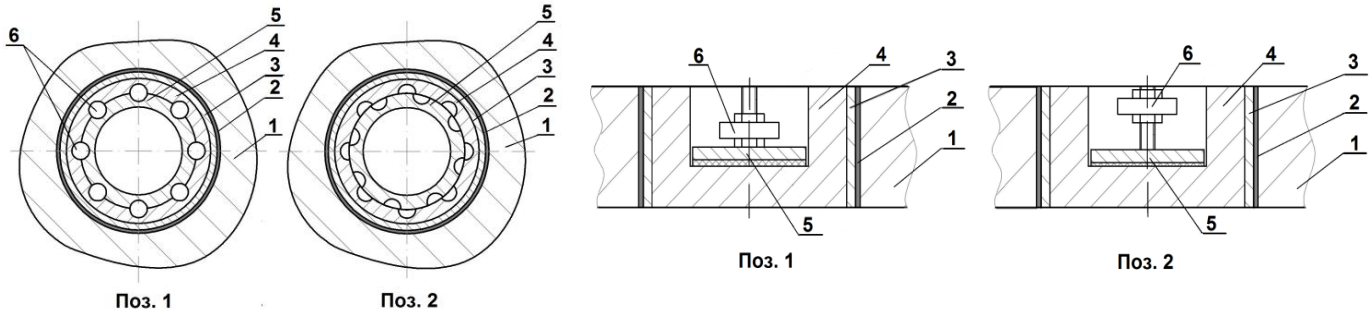


Рис. 6. Загальна структура квазідиференціального бомбового калориметра

Вихід компенсаційної оболонки 10 з'єднаний з входом підсилювача 12, вихід якого – з інвертуючим входом суматора 13, до неінвертуючого входу якого приєднаний вихід основної калориметричної оболонки 1. Вихід суматора 13 з'єднаний з входом вимірювально-обчислювальної системи 14.

Розроблено варіації конструктивного виконання імітатора комірки і реакційної посудини (рис. 7). Імітатор встановлено в блоці 1 та оточено компенсаційною оболонкою 2, як описано вище. Кільце 3 імітує калориметричну комірку, тому щільно прилягає до компенсаційної оболонки 2 та за своєю товщиною й теплофізичними властивостями відповідає параметрам цієї комірки. У кільцевій конструкції (рис. 7*а*) тепловий опір регулюється поворотом внутрішніх кілець 4 та 5 та зміною площі їх контакту, а у гвинтовій (рис. 7*б*) – зміною зазору між диском 5 і блоком 1 та переміщенням втулки 6 вздовж гвинта.



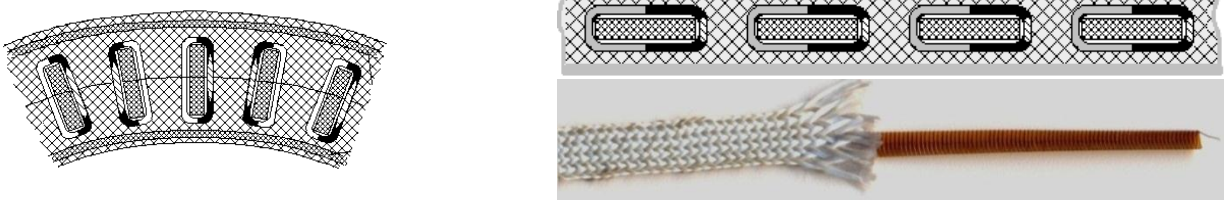
а) *б)*

Рис. 7. Варіанти конструктивного виконання компенсаційної комірки:
1 – термостатований блок; 2 – компенсаційна оболонка;
3 – імітатор калориметричної комірки; 4, 5, 6 – регульовані теплові опори

Таким чином, в процесі налагодження калориметра підбиранням теплових опорів між частинами імітатора забезпечується динаміка зміни сигналу і компенсаційної оболонки, що відповідає зміні сигналу основної оболонки у випадку впливу однакового зовнішнього збурення.

З метою збільшення швидкодії процесу вимірювань запропоновано модернізовану технологію виготовлення чутливої вимірювальної калориметричної оболонки. Замість сенсора теплового потоку у вигляді монолітного циліндру, радіальний переріз якого показано на рис. 8*а* в модернізованій оболонці стрічка термоелементів в

скловолокнистій ізоляції (рис. 8*б*) монтується безпосередньо на зовнішній поверхні мідного стакану реакційної комірки.



а) *б)*

Рис. 8. Вимірювальна калориметрична оболонка: *а*) радіальний переріз сенсора теплового потоку попередніх моделей; *б*) переріз модернізованої стрічки термоелементів

Зміна положення батареї термоелементів призводить до зменшення товщини оболонки і, відповідно, її теплового опору, що в свою чергу спричиняє зменшення сталих часу, а швидкодія процесу вимірювань зростає вдвічі.

Електронні вузли калориметра призначені для регулювання температури теплового блоку, вимірювання та опрацювання сигналів основної і компенсаційної калориметричних оболонок. Електроніка забезпечує безперервне вимірювання і індикацію теплового потоку, інтегрування теплового потоку за часом з моменту підпалу протягом усього робочого режиму і надає кінцевий результат у формі значення енергії згоряння проби палива.

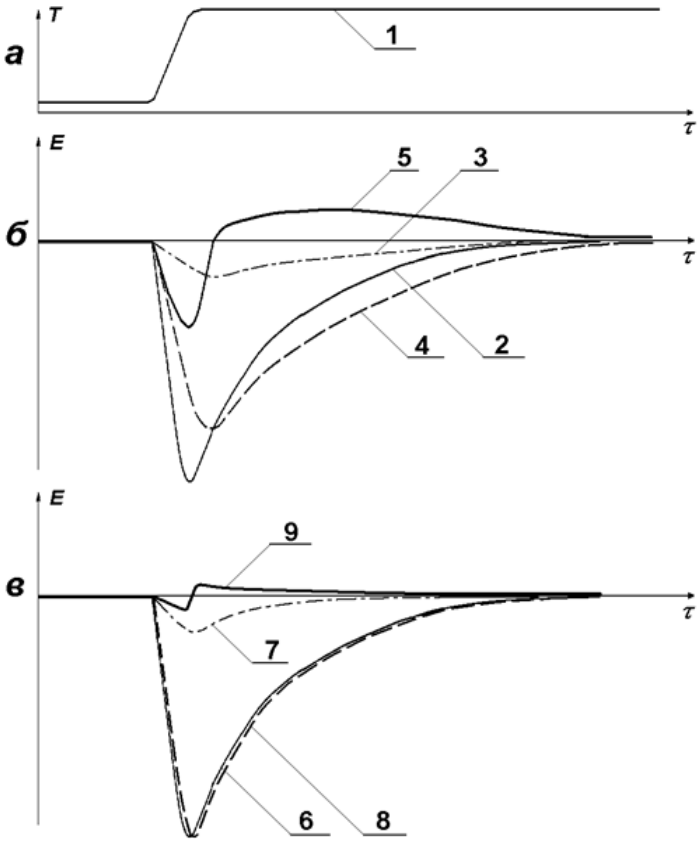


Рис. 9. Графіки зміни при налагодженні температури корпусу (*а,* 1) та сигналів до (*б*) та після (*в*) регулювання:
2, 6 – основної калориметричної оболонки;
3, 7 – компенсаційної калориметричної оболонки;
4, 8 – на виході підсилювача;
5, 9 – на виході суматора

Запропоновано методику налагодження квазідиференціального калориметра (рис. 9). Після штучного збурення температури блоку регулюванням теплових опорів в імітаторі комірки і реакційної посудини змінюють сталі часу вихідного сигналу компенсаційної оболонки таким чином, щоб вони наблизились до сталих часу вихідного сигналу основної калориметричної оболонки, і встановлюють значення коефіцієнта підсилення K підсилювача, визначене на підставі зареєстрованих значень сигналів калориметричних оболонок за розрахунковою формулою:

$$K = \int_0^{\tau_n} E_{oo}(\tau)d\tau \Big/ \int_0^{\tau_n} E_{ko}(\tau)d\tau, \quad (11)$$

де E_{oo} і E_{ko} – сигнали основної та компенсаційної оболонки, виміряні протягом перехідного процесу.

Внаслідок проведеного регулювання криві зміни сигналу основної калориметричної оболонки та сигналу

на виході підсилювача практично співпадають за формою та амплітудою (див. графіки рис. 9*в*), а зміна сигналу 9 значно менша, ніж до налагодження, тобто вихідний сигнал стає малочутливим до зовнішніх збурень.

У четвертому розділі розглянуто методики підготовки та проведення калориметричного експерименту, викладено результати досліджень метрологічних характеристик розроблених калориметрів та розрахункового експерименту з підвищення швидкодії одержання результатів досліду, а також представлено результати визначення теплотворної здатності різноманітних видів палива, в тому числі нетрадиційних та біопалива.

Вимірювання кількості теплоти Q, що виділяється під час спалювання проби палива, можливе декількома способами. Найменшу похибку вимірювань забезпечує інтегральний спосіб, який передбачає інтегрування сигналу теплометричної оболонки від моменту підпалу проби палива і до встановлення стаціонарного теплового режиму. Тривалість вимірювання визначається часом встановлення стаціонарного режиму в тепловому блоці. Протягом робочого режиму циклічно проводиться вимірювання сигналу від теплової оболонки та його подальше інтегрування. В розробленому калориметрі один цикл опрацювання інформації складає $\Delta t_c = 1$ с, а кількість циклів ненормована та залежить від багатьох параметрів. Визначення величини Q інтегральним способом відбувається за формулою:

$$Q = \int_0^t W(t) \cdot dt = A \cdot (1 + \sum E_n) \cdot \sum_{i=1}^{c} (K_i - K_0) \cdot \Delta t_c \,, \qquad (12)$$

де $W(t)$ – поточне значення теплової потужності; A – коефіцієнт перетворення; $(1+\sum E_n)$ – множник, що враховує мультиплікативні поправки; K_i – виміряне значення сигналу від теплометричної оболонки, K_0 – усереднене значення сигналу від теплометричної оболонки за останні 3 хвилини перед підпалом палива.

Мультиплікативні поправки E_n враховують як методичні, так і інструментальні похибки. Значення множника $A\cdot(1+\sum E_n)$ визначається експериментально під час градуювання калориметра та заноситься в пам’ять мікроконтролера. За результатами повірок калориметра значення цього множника може бути відкориговане. Кінцеве значення величини Q при вимірюванні інтегральним способом відображається на дисплеї після завершення робочого режиму. У випадку вимірювання інтегральним способом тривалість процесу підготовки, тобто встановлення початкового стаціонарного режиму, складає 1,5 – 2 години, тривалість інтегрування після згоряння палива – близько 30 хв.

Коректність результатів калориметричних досліджень оцінено похибкою вимірювання, розрахованою за результатами первинної повірки за методикою, затвердженою в ДП «Укрметртестстандарт». Для отримання представницьких оцінок складових похибок проведено серію з 20 дослідів спалювання проб еталонної речовини – бензойної кислоти. За результатами експериментів (табл.1) визначено границі довірчого інтервалу максимальної похибки при інтегральному методі вимірювань.

Для розробленого квазідиференціального калориметра границі основної відносної похибки складають

$$\delta_{lim} = \pm \max\left(|\delta_l|, |\delta_h|\right) = \pm\ 0{,}093\% \approx \pm\ 0{,}1\% \qquad (13)$$

в робочому діапазоні вимірювань, що підтверджено відповідним свідоцтвом ДП «Укрметртестстандарт».

Таблиця 1. Результати досліджень метрологічних характеристик калориметра

Абсолютна систематична похибка $\overline{\Delta_S}$, кДж/кг	Відносна систематична похибка $\overline{\delta_S}$, %	СКВ абсолютної випадкової складової похибки $\sigma(\Delta_h)$, кДж/кг	СКВ відносної випадкової складової похибки $\delta[\sigma(\Delta_h)]$, %	СКВ відносної систематичної складової похибки $\delta[\sigma(\Delta_S)]$, %	Границі довірчого інтервалу відносної похибки, %	
					нижня δ_l	верхня δ_h
0,13	0,00048	11,58	0,044	0,015	-0,093	0,093

Застосування балістичного способу вимірювань дозволяє значно скоротити час робочого режиму, проте похибка за цим методом значно зростає у порівнянні з інтегральним способом. Тривалість робочого режиму у балістичному способі визначається часом $t_{\max}$, протягом якого сигнал від теплометричної оболонки досягає максимального значення $K_{\max}$ після підпалювання проби палива. Визначення величини Q здійснюється апроксимуванням поліноміальної функції:

$$Q = \sum_j P_j \cdot (K_{\max} - K_0)^j, \qquad (14)$$

де коефіцієнти полінома P_j визначаються експериментально під час градуювання калориметра та заносяться до пам'яті мікроконтролера.

Для реалізація можливості зменшення часу експерименту досліджено ряд інтерполяційних функцій для усереднення значень результатів вимірювання та визначено коефіцієнти детермінації на відповідних часових проміжках. Типи функцій, що використовувалися для інтерполяції даних, їх загальний та експериментальний вигляд наведено в таблиці 2. Результати розрахункового експерименту доводять, що найбільший коефіцієнт детермінації на всьому часовому проміжку калориметричного досліду забезпечується інтерполяцією експоненціальною функцією. Таким чином, хоча тривалість підготовки для балістичного способу ідентична інтегральному, з'являється можливість зменшити час опрацювання результатів експерименту в декілька разів – з 30 до 5 хвилин від підпалу дослідної проби палива.

За допомогою розробленої квазідиференціальної калориметричної системи проведено великий обсяг експериментальних досліджень теплотворної здатності різноманітних видів палива, в тому числі нетрадиційних та біопалива (табл. 3), що дало можливість надати кількісну характеристику їх якості та оцінити можливість використання в промислово-господарському комплексі України. Одержані дані підтверджують високі показники теплотворної сучасних видів біопалива та свідчать про доцільність та економічність його виробництва та масового вжитку.

Вперше досліджено нетрадиційні види палива, виготовлені з відходів виробництва – нафтового шламу, петролатума, деревної тирси, низькосортного вугілля, а також відходів виробництва харчових продуктів та пакувальних матеріалів.

Таблиця 2. Інтерполяційні функції для опрацювання експериментальних даних

Тип функції	Загальний вигляд	Експериментальний вигляд
Логарифмічна	$Q(t) = a \cdot \ln(t + b) + c$	$Q_{\log}(t) = 11{,}85 \cdot \ln(t) + 83{,}322$ $R_{\log}$=0,868
Степенева	$Q(t) = a \cdot t^b + c$	$Q_{pow}(t) = 200{,}094 \cdot t^{-0{,}514}$ R_{pow}=0,662
Експоненціальна	$Q(t) = a \cdot e^{b \cdot t} + c$	$Q_{\exp}(t) = 70{,}424 \cdot e^{-7{,}359 \times 10^{-3} \cdot t} + 1{,}017$ $\boldsymbol{R_{\text{exp}}}$**=0,994**
Сигмоідна	$Q(t) = \dfrac{a}{1 + b \cdot e^{c \cdot t}}$	$Q_{sig}(t) = \dfrac{5{,}284 \times 10^{14}}{1 + 7{,}544 \times 10^{12} \cdot e^{6{,}872 \times 10^{-3} \cdot t}}$ R_{sig}=0,989
Поліноміальна:		
2-го порядку	$Q(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$	$Q_{pol2}(t) = 2{,}867 \times 10^{-5} \cdot t^2 - 0{,}068 \cdot t + 36{,}146$ R_{pol2}=0,732
3-го порядку	$Q(t) = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d$	$Q_{pol3}(t) = -4{,}532 \times 10^{-8} \cdot t^3 + 1{,}512 \times 10^{-4} \cdot t^2 - 0{,}156 \cdot t + 49{,}428$ R_{pol3}=0,890
4-го порядку	$Q(t) = a \cdot t^4 + b \cdot t^3 + c \cdot t^2 + d \cdot t + e$	$Q_{pol4}(t) = -7{,}611 \times 10^{-11} \cdot t^4 + 2{,}858 \times 10^{-7} \cdot t^3 - 3{,}419 \times 10^{-4} \cdot t^2 + 0{,}129 \cdot t + 8{,}618 \times 10^{-4}$ R_{pol4}=0,975

Таблиця 3. Результати визначення теплотворної здатності зразків біопалива

Зразок	Вологість, %	Робоча теплота згоряння, МДж/кг	
		вища $q^{\text{P}}_{\text{В}}$	нижча $q^{\text{P}}_{\text{Н}}$
Брикети з деревини	3,5	18,5	17,0
Брикети з щепи	24,8	15,4	13,7
Біосуміш 50% силосу та 50% курячого посліду	9,1	16,8	15,5
Гранули бурякового жому	8,2	16,2	14,8
Гранули з лушпиння соняха	11,3	18,1	16,6
Фрезерний торф	26,6	11,4	9,8
	0	15,5	14,5
Біоетанол	0,3	29,0	26,1
Біодизель	–	40,9	37,3

Дослідження ряду нових для нашої країни енергетичних сільськогосподарських культур доводять перспективність їх культивування для вирішення питання забезпечення України відтворюваними джерелами біопалива.

У додатках наведено матеріали, які підтверджують впровадження результатів дисертації, технічні характеристики розроблених приладів, приклади низки розроблених алгоритмів та програмного забезпечення розробленого блоку вимірювання і керування.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення точності та швидкодії засобів вимірювання теплоти згоряння твердого, рідкого та газоподібного палива.

Основні висновки та результати:

1. Проведено порівняльний аналіз видів існуючих калориметричних систем і методів опрацювання вимірювальної інформації, що дозволило визначити напрями вдосконалення кондуктивних калориметрів теплоти згоряння палива.
2. Розроблено конструкцію диференціального бомбового калориметра за класичною схемою та запропоновано метод зменшення неконтрольованого теплообміну та аксіальних тепловтрат шляхом організації активної адіабатної теплоізоляції торців теплового блоку, що підвищує точність вимірювання кількості теплоти.
3. Обґрунтовано квазідиференціальну схему побудови бомбового кондуктивного ізоперіболічного анероїдного калориметра та розроблено математичні моделі, які адекватно описують динаміку теплових процесів під час згоряння проби палива.
4. Розроблено методику налаштування динамічних характеристик компенсаційної комірки, що дозволило мінімізувати вплив зовнішніх збурень та забезпечити похибку вимірювання калориметра в межах 0,1%.
5. Модернізовано конструкцію чутливої калориметричної оболонки, що призвело до підвищення швидкодії приладу та дозволило скоротити тривалість експерименту вдвічі.
6. Застосування розробленої автоматизованої системи вимірювання, контролю і управління калориметра значно скорочує трудомісткість проведення калориметричного досліду і виключає суб'єктивні помилки вимірювання.
7. Виготовлено квазідиференціальну калориметричну систему, проведено експериментальні дослідження теплоти згоряння та визначено якість зразків палива різних видів.
8. Матеріали дисертаційної роботи знайшли практичне використання. Розроблено, виготовлено і впроваджено на підприємствах енергетичного комплексу України бомбові квазідиференціальні кондуктивні калориметри вимірювання теплоти згоряння типу КТС-4.
9. Результати досліджень можуть бути використані для подальшого покращення метрологічних характеристик калориметрів та розроблення автоматизованих контрольно-вимірювальних пристроїв експрес-контролю тощо. Серед об’єктів потенційного впровадження – близько 2 тисяч споживачів, які забезпечують перероблення та використання паливних ресурсів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії : Монографія / В.П. Бабак, В.С. Берегун та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / – К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2016. – 298 с. *(Розділ 5, п.5.1, розділ 7, п.7.2)*

2. Burova Z.A. Biofuels: the combustion heat analysis / Z.A. Burova, L.I. Vorobyov, O.O. Nazarenko // SWorldJournal, Issue №11, Vol.10. Technical sciences. – 2016. – P. 149-152. *Індексується в Index Copernicus. (Автором здійснено аналіз відповідності результатів експериментальних калориметричних досліджень біопалива вітчизняного виробництва світовим стандартам)*

3. Бабак В.П. Аналіз апроксимації результатів вимірювань теплового потоку бомбового калориметра в нестаціонарному режимі / В.П. Бабак, А.О. Запорожець, О.О. Назаренко, О.О. Редько // Scientific Journal «ScienceRise», №8(37), 2017. – С. 24-32. *Індексується в Index Copernicus. (Автором підібрано апроксимаційну функцію для максимального зменшення часу опрацювання результатів калориметричного експерименту)*

4. Квазідиференціальний калориметр теплового потоку для визначення теплоти згоряння / Л. Декуша, Л. Воробйов, Т. Грищенко, З. Бурова, О. Назаренко, О. Мазуренко // Метрологія та прилади – Харків, 2011. – № 5, С. 27-31. *(Автором описано конструктивні особливості квазідиференціального калориметра)*

5. Воробйов Л.Й. Определение теплотворной способности биотопливных смесей / Л.И. Воробьев, Л.Н. Грабов, Л.В. Декуша, О.А. Назаренко, А.И. Шматок // «Промышленная теплотехника». – К., 2011. – Т. 33, № 4. – С. 87-93. *(Автором представлено методики визначення вищої та нижчої теплоти згоряння твердих, рідких та газоподібних видів біопалива)*

6. Воробьев Л.И. Применение метода квазидиференциальной калориметрии при реализации прибора для измерения теплоты сгорания / Л.И. Воробьев, Л.В. Декуша, О.А. Назаренко, Т.Г. Грищенко // «Промышленная теплотехника». – К., 2017. – №1. – С. 71-75. *(Автором обґрунтовано доцільність застосування квазідиференціального методу для зменшення похибки калориметричних вимірювань)*

7. Воробйов Л.Й. Моделювання теплових процесів у квазідиференціальному калориметрі / Л.Й. Воробйов, Р.В. Сергієнко, З.А. Бурова, О.О. Назаренко // «Промышленная теплотехника». – К., 2017. – Т. 39, № 4. – С. 77-83. *(Автором проаналізовано результати математичного моделювання теплових процесів в калориметрі)*

8. Патент на винахід 108312 UA МПК (2015.01) G01K 17/00 G01N 25/26 (2006.01) Кондуктивний калориметр / Назаренко О.О., Бабак В.П., Бурова З.А., Воробйов Л.Й., Декуша Л.В.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України. – № а 2013 14487, заявл. 20.12.2013р., опубл. 10.04.2015. Бюл. № 7.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Декуша Л.В. Методы повышения быстродействия кондуктивных бомбовых калориметров / Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев, О.А. Назаренко, Т.Г. Грищенко // Тези-

сы докладов V Межд. конференции «Проблемы промышленной теплотехники».– Киев. − 2007.− С.337-338.

10. Декуша Л.В. Новая модель бомбового калориметра для измерения теплоты сгорания / Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Л.И. Воробьев, В.И. Шаповалов, О.А. Назаренко, З.А. Бурова // Тезисы докладов VII Межд. конференции «Проблемы промышленной теплотехники». – К. : Пром. теплотехника, 2011. – Т.33. – №7. – С.129.

11. Воробйов Л.Й. Улучшение эксплуатационных характеристик кондуктивных бомбовых калориметров / Л.И. Воробьев, Л.В. Декуша, О.А. Назаренко, Т.Г. Грищенко // Промышленная теплотехника, т.37 №7, 2015. Материалы IX Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники», Киев. – С. 84-85.

12. Бабак В.П. Квазідиференційний калориметр / В.П. Бабак, О.О. Назаренко, Л.В. Декуша, Л.Й. Воробйов // Матеріали 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції і виставки «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», 25-28 листопада 2014 р. – Івано-Франківськ. – С. 274-279.

13. Воробйов Л.Й. Усовершенствование методов измерения в бомбовых калориметрах теплового потока / Л.И. Воробьев, Л.В. Декуша, О.А. Назаренко, Т.Г. Грищенко // Наукові праці X Міжн. наук.-техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія -2016»). – Харків, 2016. – С. 138

14. Воробйов Л.Й., Контроль палива за теплотою згоряння з використанням бомбового квазідиференціального калориметру теплового потоку / Воробйов Л.Й., Декуша Л.В., Назаренко О.О., Сергієнко Р.В. // Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016: 8-а Національна науково-технічна конференція, 22 – 24 листопада 2016 р.: збірник доповідей – К.: УТ НКТД, 2016. – С.89-94.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. Воробйов Л.Й. Теплота згоряння біопалив та біопаливних сумішей / Л.Й. Воробйов, Л.М. Грабов, Л.В. Декуша, О.О. Назаренко, О.І. Шматок // «Енергетика та електрифікація». – К., 2011. – № 7. – С. 54-59. *(Автором узагальнено та проаналізовано результати досліджень теплоти згоряння різноманітних видів біопалива)*

16. Патент на винахід 101716 UA МПК (2013.01) G01K 17/00 G01N 25/26 (2006.01) Калориметр теплового потоку / Декуша Л.В., Воробйов Л.Й., Грищенко Т.Г., Бурова З.А., Назаренко О.О.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України. – № а 2011 08830, опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.

АНОТАЦІЇ

Назаренко О.О. Квазідиференціальний кондуктивний калориметр вимірювання теплоти згоряння. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.04 – Прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка). – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуального науково-прикладного завдання підвищення точності та швидкодії засобів вимірювання теплоти згоряння твердого, рідкого та газоподібного палива.

Базуючись на ґрунтовному порівняльному аналізі видів існуючих калориметричних систем і методів опрацювання вимірювальної інформації, визначено напрями вдосконалення кондуктивних калориметрів теплоти згоряння палива та розроблено конструкцію диференціального бомбового калориметра за класичною схемою. Розроблено метод зменшення неконтрольованого теплообміну та аксіальних тепловтрат шляхом організації активної адіабатної теплоізоляції торців теплового блоку, що додатково підвищує точність вимірювання кількості теплоти.

Для підвищення точності калориметричних вимірювань вперше запропоновано і обґрунтовано квазідиференціальну схему побудови бомбового кондуктивного ізоперіболічного анероїдного калориметра. Розроблено математичні моделі, які адекватно описують динаміку теплових процесів під час згоряння проби палива, та методику налаштування динамічних характеристик компенсаційної комірки, що дозволило мінімізувати вплив зовнішніх збурень та забезпечити похибку вимірювання калориметра в межах 0,1%. Це підтверджено результатами первинної повірки та свідоцтвами ДП «Укрметртестстандарт». Модернізація конструкції чутливої калориметричної оболонки призвела до підвищення швидкодії приладу вдвічі.

Результати теоретичних досліджень втілено у дослідному зразку квазідиференціальної калориметричної системи, проведено експериментальні дослідження розроблених методів та вимірювальної системи і сформовано рекомендації щодо їх практичного використання та перспектив подальшого розвитку цього наукового напряму. Практичне впровадження результатів дисертаційної роботи, підтверджене відповідними актами, дало змогу здійснити імпортозаміщення калориметричних засобів вимірювання та дослідити теплотворну здатність різноманітних сучасних видів палива, в тому числі нетрадиційних і біопалива, а також оцінити доцільність та економічність їх виробництва та використання в промислово-господарському комплексі України.

Ключові слова: паливо, теплота згоряння, калориметр теплового потоку, квазідиференціальний калориметр, калориметрична бомба, похибка вимірювання.

Nazarenko O.O. The combustion heat quasidifferential conductive calorimeter. – Qualifying scientific thesis on rights for a manuscript.

The thesis for a candidate of technical science degree (PhD degree), speciality 05.11.04 – Devices and methods for measurement of thermal quantities (152 – Metrology and information-measuring technique). – Institute of Engineering Thermophysics Ukraine National Academy of Sciences. – Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to the decision of the actual scientifically-applied task the accuracy and fast-acting increasing of facilities for hard, liquid and gaseous fuel combustion heat measuring.

Being based on the solid comparative analysis of the existent calorimetric systems types and methods of measuring information treatment, directions of fuel combustion heat conductive calorimeters perfection were defined by application of differential chart of their construction as the effective method of measuring error reduction. The construction

of differential bomb calorimeter was worked out on a classic scheme and the method of out-of-control heat exchange and axial heat losses reduction was offered by the thermal block butt ends active adiabatic heat-insulation organization that promotes heat measuring accuracy additionally.

By further modernisation of bomb conductive isoperibol aneroid calorimeter the quasidifferential measuring method and quasidifferential calorimeter model were firstly developed with the electrothermal analogy method use. The dynamics of thermal processes in the device and influence of uneven temperature distribution were investigated in a calorimetric cell on the error of measuring, the criteria of optimization and the rational parameters of devices thermal part and secondary measuring and regulative apparatus were defined by a mathematical model and experimental researches.

As a result of modelling the method of compensative cell dynamic characteristics tuning for minimization of external indignations influence was offered, a structure was validated and control and measuring module functioning was explored for a calorimetric process optimization. Technology of heat-metrical sensible shell making was modernized, that resulted in reduction of its thermal resistance and gave the opportunity to promote speed of calorimetric experiment results receipting twice.

The results of theoretical researches were realized in the quasidifferential calorimetric system pre-production model, experimental studies of the worked out methods and measuring system were undertaken and recommendations were formed in relation to their practical use and prospects of further development of this scientific direction. The developed automated management, control and measuring system of calorimeter with the specialized software application considerably abbreviates calorimetric test laboriousness and eliminates subjective errors.

The correctness of calorimetric researches results were estimated by the measurement error, expected on a primary check results by the methodology ratified in GE “Ukrmetrteststandard”. The measurement error limits is 0,1%, that was confirmed by corresponding certificates. Such measurement error is provided by the integral combustion heat measuring method that is distinguished during the fuel sample incineration. This method envisages integration the heat-metrical shell signal from the fuel sample arson moment to the stationary thermal mode establishment during near a half an hour, and whole time of calorimetric experience come up to two hours. The ballistic express-method of the impulsive heat flux dynamic measuring application in bomb calorimeters was validated, that gave the opportunity to decrease a fuel combustion heat measuring results data analysis in several times.

The practical introduction of thesis results, confirmed by corresponding acts, gave the opportunity to carry out the measuring calorimetric devises import substitution and study the combustion heat of various modern types of fuel, including unconventional and biofuels, also to estimate expediency and economy of their production and use in the industrial & economic complex of Ukraine.

Keywords: fuel, combustion heat, heat flow calorimeter, quasidifferential method, calorimeter bomb, measurement error.