

УДК 536.62

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У КВАЗІДИФЕРЕНЦІАЛЬНОМУ КАЛОРИМЕТРІ

Воробйов Л.Й.¹, канд. техн. наук, Сергієнко Р.В.¹, канд. техн. наук, Бурова З.А.², канд. техн. наук, Назаренко О.О.¹

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна

Запропоновано модель квазидиференціальної калориметричної системи, побудовану за методом електротеплової аналогії. За допомогою моделі досліджено динаміку зміни середніх температур і теплових потоків в елементах системи, вплив температурних збурень і розкиду технологічних параметрів на похибку вимірювання.

Предложена модель квазидифференциальной калориметрической системы, построенная по методу электро-тепловой аналогии. С помощью модели исследована динамика изменения средних температур и тепловых потоков в элементах системы, влияние температурных возмущений и разброса технологических параметров на погрешность измерения.

The model of the quasi-differential calorimetric system based on the electrothermal analogy method is proposed. Using the model, the dynamics of average temperatures and heat flow changes in the system elements, the temperature perturbations and the technological parameters spread influences on the measurement error are researched.

Бібл. 11, рис. 3.

Ключові слова: теплота згорання, тепловий потік, квазидиференціальна калориметрична система, електротеплова аналогія, похибка вимірювання.

C – теплова ємність елемента;

g – ваговий коефіцієнт;

i, j – номери рядка та стовпця матриці;

K – коефіцієнт підсилення;

M – масштабний коефіцієнт;

R_T – тепловий опір;

s – оператор перетворення Лапласа;

T – температура, елемент матриці температур;

W – теплова потужність, елемент матриці

контурних потоків;

Z – елемент матриці опорів;

Δ – визначник матриці;

$\Delta_{i,j}$ – алгебраїчне доповнення елементів рядка i та стовпця j матриці.

Вступ

Ефективність роботи енергетичного обладнання значною мірою залежить від якості використаного палива. У свою чергу, якість палива визначають за його теплотою згорання (теплотворною здатністю). З розвитком біоенергетики та використанням в енергетичних цілях нових видів палива та продуктів діяльності промислових підприємств (відходи деревообробної, харчової промисловості тощо) надважливим стає оперативний контроль їх характеристик. Для визначення теплоти згорання палива і хімічних речовин традиційно використовують ентальпійні водяні бомбові калориметри, проте в останні роки для таких вимірювань набувають поширення калориметри теплового потоку або кондуктивні калориметри, які мають вагомні переваги порівняно з традиційними водяними, зокрема, не вимагають кондиціонування і точного зважування води, легко автоматизуються та не потребують спеціальних приміщень для експлуатації [1, 2]. У той же час калориметри теплового потоку за своїми метрологічними характеристиками і швидкодією дещо поступаються традиційним ентальпійним калориметрам. Тому актуальною є задача

поліпшення метрологічних та експлуатаційних характеристик калориметрів теплового потоку.

Огляд літератури та постановка проблеми

Провідні фірми світу виробляють широку гаму калориметрів теплоти згорання, для яких характерні висока точність вимірювань (відтворюваність на рівні 0,05...0,3 %) та високий рівень автоматизації підготовки проби і вимірювань [1, 3 – 5]. В ІТТФ для потреб підприємств України вже 20 років розробляють, виготовляють та обслуговують ізопериболічні калориметри серії КТС [1, 2], побудовані на базі термоелектричних перетворювачів теплового потоку.

В кондуктивному калориметрі комірку з реакційною посудиною – калориметричною бомбою – оточено чутливою калориметричною оболонкою, вмонтованою в масивний термостатований блок. Оболонку з'єднано з вимірювально-обчислювальною системою, яка вимірює та опрацьовує сигнали первинних перетворювачів теплового потоку і температури. Теплота, що виникає в результаті згорання зразка, проходить крізь калориметричну чутливу оболонку, в результаті чого оболонка генерує сигнал, що надходить до вимірювально-

обчислювальної системи, де здійснюється його вимірювання та інтегрування.

Зменшення впливу зовнішніх збурень та інших факторів та, відповідно, похибок вимірювань можна досягти застосуванням диференціальної схеми калориметричних вимірювань [6], однак це гарантовано призводить до збільшення масогабаритних характеристик приладів. Для вирішення цього протиріччя запропоновано метод квазидиференціальної калориметрії та розглянуто його застосування при реалізації приладу вимірювання теплоти згорання [7 – 10]. Такий прилад має дві комірки – основну робочу необхідних розмірів для розміщення калориметричної бомби та компенсаційну комірку значно меншого розміру. Для вирівнювання динамічних характеристик комірок і чутливих елементів в калориметричний прилад введено ланку корекції сигналу чутливого елемента компенсаційної комірки із заданою передавальною функцією, а також суматор сигналів. У загальному випадку ланка корекції може комплексно впливати на амплітудно-частотну характеристику ланцюга, проте, в деяких випадках зручно роздільно регулювати амплітудні та частотно-часові характеристики. Наприклад, застосування чутливого елемента компенсаційної комірки з такими ж питомими характеристиками, як і робочої, та розміщення в компенсаційній комірці спеціального імітатора реакційної посудини дозволяє зробити подібними частотно-часові характеристики сигналів чутливих елементів комірок. У цьому випадку в якості коригуючої ланки може бути застосований широкосмуговий підсилювач з регульованим коефіцієнтом посилення.

Відомо [6], що теплоту згорання в кондуктивному калориметрі можна визначати двома способами: інтегральним і балістичним. У першому випадку теплота згорання пропорційна інтегральному значенню теплового потоку з калориметричної комірки за проміжок часу від підпалу проби палива до відновлення

стаціонарного режиму, а в другому – є функцією максимального значення теплового потоку після підпалу. За базовий обрано інтегральний спосіб вимірювання теплоти згорання.

До початку вимірювань в тепловому блоці калориметра має встановитися стаціонарний режим, тобто необхідно стабілізувати температури всіх внутрішніх елементів. Динаміка процесів зміни температур і теплових потоків в тепловому блоці визначає найважливіші експлуатаційні та метрологічні характеристики калориметру. При проектуванні квазидиференціального калориметру необхідно визначити співвідношення параметрів робочої комірки та комірки порівняння, які забезпечать компенсацію зовнішніх збурень. Тому для дослідження теплових процесів необхідно розробити модель приладу, яка відображає істотну термічну неоднорідність калориметричних комірок та дослідити вплив параметрів і особливостей конструкції калориметричної системи на її характеристики.

Модель квазидиференціального калориметра

Розглянемо спрощену модель теплового блоку квазидиференціального кондуктивного бомбового калориметра та еквівалентну їй математичну модель, побудовану за принципом електротеплової аналогії, де основні елементи конструкції представлено у вигляді тіл із зосередженими параметрами.

Тепловий блок приладу (рис. 1) має циліндричну чутливу теплометричну оболонку 6, у внутрішньому просторі якої розміщено калориметричну комірку 5. Зовні теплометричну оболонку оточено теплорозсіювальним корпусом 7. До комірки поміщено реакційну посудину – калориметричну бомбу, що містить стакан 3 з кришкою 1 і ущільненням 2. В нижній частині корпусу співвісно змонтовано компенсаційну комірку 10, оточену власною калориметричною оболонкою 9, яка має такий самий діаметр, конструкцію та щільність термоелементів, що й основна оболонка.

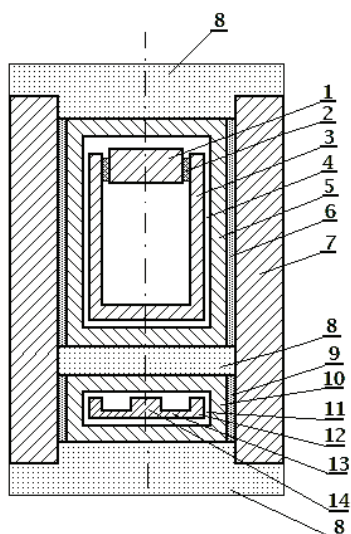


Рис. 1. Спрощена модель теплового блоку квазидиференціального калориметра.

Компенсаційна комірка містить складений імітатор реакційної посудини з елементами 12, 13, 14 та має питому теплоємність на одиницю площі поверхні оболонки ідентичну основній. Між стаканом бомби і робочою коміркою є повітряний зазор 4, а між імітатором і компенсаційною коміркою – зазор 11, а сам корпус захищено торцевою теплоізоляцією 8.

Аналітичний розв’язок нестационарної задачі теплопровідності для описаної моделі отримати практично неможливо. У той же час, представлена модель складається переважно з двох типів конструктивних елементів, одні з яких мають малий термічний опір і високу теплоємність, а інші високий опір і незначну теплоємність. Така система досить добре моделюється як система з зосередженими параметрами.

У схемі заміщення (рис. 2) кожен з циліндричних шарів представлений у вигляді пасивного чотириполосника (Т-подібного RC-фільтру), в якому електричні опори між входом і виходом є аналогами термічного опору відповідного шару, а електрична ємність – аналог повної теплоємності. Електричними аналогами теплового потоку і температури є, відповідно, струм і напруга. Тому джерела теплової енергії в схемі заміщення представлені джерелами струму W або напруги T . Індеси в позначеннях опорів і ємностей в еквівалентній схемі заміщення теплового блоку калориметру відповідають номерам елементів моделі теплового блоку з рис. 1. Теплоємності ущільнення, повітряного прошарку і

теплометричної оболонки порівняно з теплоємністю інших вузлів незначні, тому не показані на еквівалентній схемі.

Джерело струму $W1$ є електричним аналогом потужності, що виділяється при спалюванні проби палива. Він представлений у вигляді двох частин з ваговими коефіцієнтами $g1$ і $g3$ ($g1 + g3 = 1$) для обліку розподілу енергії згоряння проби між кришкою 1 і стаканом бомби 3. Вагові коефіцієнти $g1$ і $g3$ пропорційні площам внутрішніх поверхонь кришки 1 і бомби 3 і, відповідно, дорівнюють: $g1 = 0,12$; $g3 = 0,88$.

Джерела $W2$ і TCT відповідають тепловому режиму поверхні корпусу калориметра в режимах початкового розігріву і термостабілізації, відповідно. Джерело ТПОВ імітує температуру повітря, що обдуває корпус 7. Ключі $K1$ і $K2$ комутують джерела енергії відповідно до заданих режимів роботи калориметра. Для моделювання перетворення та опрацювання сигналів до еквівалентної схеми додатково введені ланки $A1$ та $A2$, які моделюють перетворення різниці температури на поверхнях теплометричної оболонки 6 робочої комірки та теплометричної оболонки 9 комірки порівняння, підсилювач $A3$ та аналоговий суматор з прямим та інверсним входами $A4$.

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

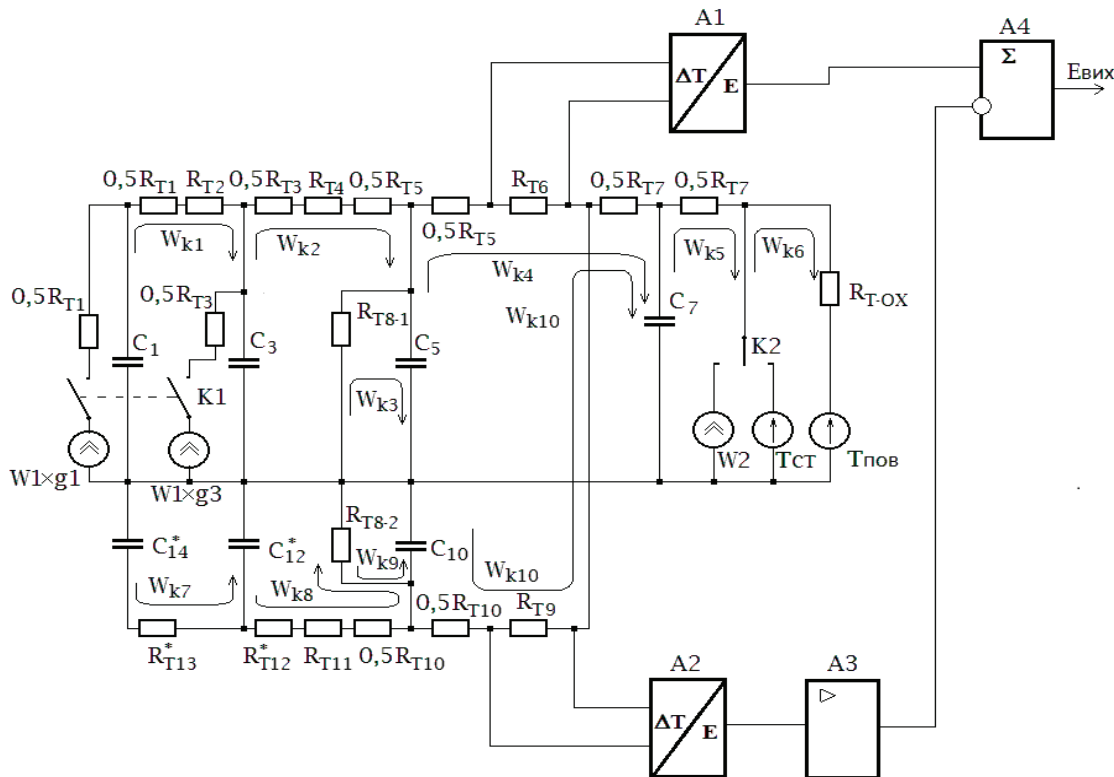


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення методом електротеплової аналогії.

$$|Z| \times |W| = |T| \tag{1}$$

де $|W|$ і $|T|$ – матриці-стовпці зображень контурних теплових потоків і температур,

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

Розв'язок системи рівнянь (1) відносно теплового потоку має вигляд:

$$W_{ki} = \sum_{j=1}^{10} T_{ij}(s) \cdot \frac{\Delta_{ij}}{\Delta}, \tag{2}$$

де Δ – визначник матриці опорів;

Δ_{ij} – алгебраїчне доповнення елементів рядка i та стовпця j цієї матриці.

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

В окремому випадку, коли початкові температури всіх елементів дорівнюють заданій температурі термо-

статування корпусу, розв'язок для теплового потоку $W_{k4}(s)$, що протікає крізь теплометричну оболонку, має вигляд:

$$W_{k4}(s) = \frac{W1(s)}{\Delta} \cdot \left[\left(\frac{g1}{sC_1} - \frac{g3}{sC_3} \right) \cdot \Delta_{41} + \frac{g3}{sC_3} \cdot \Delta_{42} \right]$$

Для найкращої компенсації зовнішніх збурень динамічні характеристики компенсаційної комірки та імітатора реакційної посудини (бомби) повинні бути подібними, тобто стала часу контуру 7 повинна відповідати сталій контуру 1, контуру 8 – відповідно, контуру 2, контуру 10 – контуру 4. При проектуванні квазидиференціального калориметра встановлюється

масштабний коефіцієнт M , який дорівнює відношенню висоти робочої комірки до висоти компенсаційної комірки. Оскільки діаметри комірок однакові, справедливим є співвідношення:

$$R_{T9} = M \times R_{T6}; \quad R_{T10} = M \times R_{T5}; \quad C_{10} = C_5/M. \tag{3}$$

З умови подібності динамічних характеристик контурів витікають наступні співвідношення:

$$C_{12}^* = C_3/M; C_{14}^* = C_1/M; R_{T13}^* = M \times (R_{T1}/2 + R_{T2});$$

$$R_{T10}/2 + R_{T8-2} + R_{T11} + R_{T12}^* = M \times (R_{T3}/2 + R_{T5}/2 + R_{T8-1} + R_{T4}). \quad (4)$$

Для виконання цих співвідношень підбирають значення параметрів налагодження R_{T12}^* ; R_{T13}^* ; C_{12}^* ; C_{14}^* . Конструкція калориметра повинна передбачати можливість експериментального підбирання параметрів відповідних компонентів при реальному налаштуванні для компенсації можливого розкиду характеристик деяких технологічно важковідтворюваних елементів, наприклад зазорів 4 і 11.

Результати моделювання

Аналітичне дослідження рівнянь (1) та (2) є достатньо складним, оскільки характеристичне рівняння системи, яке отримують з визначника матриці опорів Δ , має 10-й порядок. Для їх розв'язку ефективним є використання програмних пакетів для розрахунку процесів в електричних колах, наприклад, програми схемотехнічного моделювання «Micro-Cup».

За допомогою даної програми проведено моделювання динаміки теплових процесів в калориметрі. Характеристики елементів робочої комірки та всієї калориметричної системи розраховано за наведеними вище формулами, характеристики компенсаційної комірки та імітатора калориметричної бомби розраховані за формулами (3) та (4) 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.

Процес моделювання проводився за наступних умов:

1) температура корпусу не стабільна, а змінюється за гармонійним законом з періодом 200 с, що приблизно відповідає періоду власних коливань системи термостабілізації, водночас амплітуда коливань складає 0,5 К, що приблизно у 100 разів перевищує реальний рівень коливань температури корпусу;

2) у певний момент часу імітується згоряння проби палива у бомбі – прямокутний імпульс від джерела $W1$ – тривалістю 20 с, потужністю 5000 Вт, тобто із загальною енергією 10 кДж, що близька до нижньої межі діапазону вимірювань приладу.

Збільшену амплітуду коливань температури корпусу встановлено для можливості візуальної демонстрації у масштабі графіків впливу нестабільності температури корпусу на спотворення форми сигналів і похибку вимірювання. Коефіцієнт підсилення чисельно дорівнює масштабному коефіцієнту $K_{\Pi} = M = 10$.

Порівняння графіків рис. 3 демонструє ефективність застосування квазидиференціальної схеми калориметричних вимірювань – у випадку коректного вибору параметрів компенсаційної комірки та імітатора вплив збурень температури корпусу практично компенсується. На практиці у реальній калориметричній системі повної компенсації досягнути дуже складно.

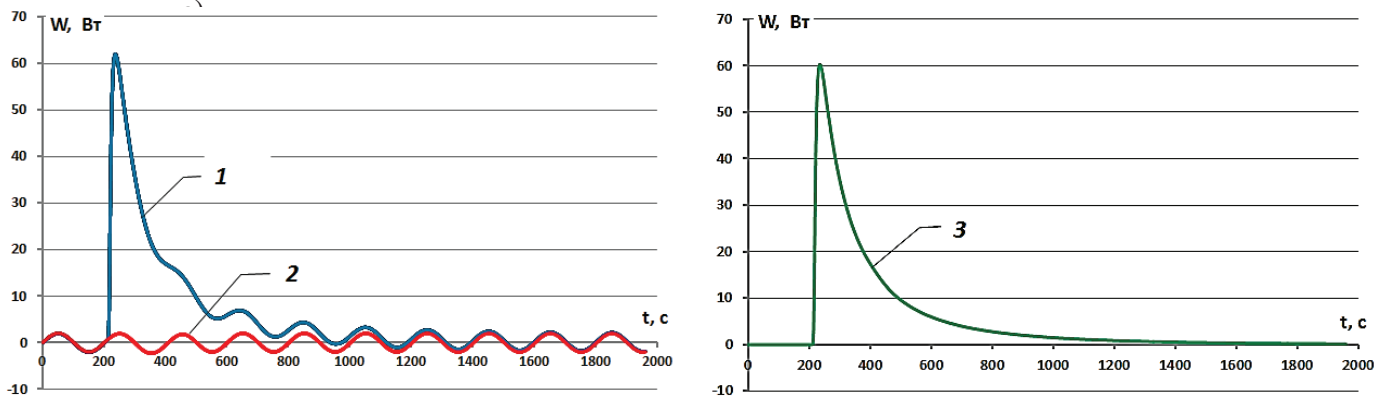


Рис. 3. Графіки теплового потоку: 1 – крізь основну калориметричну оболонку (контурний струм $W_{кд}$); 2 – крізь компенсаційну оболонку (контурний струм $W_{к10} \times K_{\Pi}$); 3 – скоригований тепловий потік.

Також проведено моделювання системи при відмінності параметрів компенсаційної комірки та імітатора на $\pm 10\%$ від номінальних та досліджено величину похибки визначення енергії, що виникає внаслідок коливань температури корпусу. Значення похибки залежить як від параметрів конструкції калориметричної системи, так і від амплітуди, періоду і фази коли-

вань. За сталої амплітуди коливань найменші похибки спостерігаються у випадку, коли час інтегрування є кратним цілому числу періодів коливань, а найбільша похибка спостерігається, якщо час інтегрування складає чверть періоду коливань.

За результатами моделювання отримано важливі кількісні оцінки режимних параметрів та характеристик.

Зокрема за номінальних значень параметрів конструкції калориметру максимальний тепловий потік крізь перетворювач сягає 50 Вт при енергії згоряння проби 8 кДж та 220 Вт при енергії згоряння проби 35 кДж, а максимально можлива різниця температури між калориметричною коміркою та корпусом (на перетворювачі теплового потоку) під час вимірювань не перевищує 12 К.

Суттєвий вплив на максимальне значення теплового потоку при спалюванні проби має величина зазору між калориметричною бомбою та коміркою, яка у свою чергу залежить від технологічного розкиду діаметрів бомби і комірки. Максимальне значення теплового потоку при зазорі у 0,3 мм приблизно на 25 % менше, ніж при номінальному значенні зазору 0,1 мм.

Як вказано вище, похибка вимірювань, що виникає внаслідок нестабільності температури корпусу, залежить від характерного закону зміни цієї температури, але може бути практично повністю компенсована за умови ідеального вибору параметрів компенсаційної комірки та імітатора. Оскільки запропонована модель не абсолютно адекватна реальній калориметричній системі, та ідеальний вибір параметрів неможливий, досліджено випадок відмінності параметрів компенсаційної комірки та імітатора на $\pm 10\%$ від розрахункових (ідеалізованих). У разі одночасної зміни всіх параметрів в один бік (збільшення або зменшення) максимальне значення складової похибки вимірювання при застосуванні квазидиференціальної схеми по відношенню до складової похибки однокоміркової структури зменшується у 6...8 разів при лінійному зростанні температури корпусу і у 3...5 разів при гармонічних коливаннях температури з періодом 200...280 с.

Висновки

1. Запропоновано модель квазидиференціальної калориметричної системи, яка побудована за методом електротеплової аналогії, причому основні елементи конструкції системи представлені у вигляді тіл із зосередженими параметрами.

2. Досліджено динаміку зміни середніх температур і теплових потоків в елементах калориметричної системи, вплив температурних збурень і розкиду технологічних параметрів на похибку вимірювання, зокрема максимальний тепловий потік крізь перетворювач сягає 220 Вт при енергії згоряння проби 35 кДж, а максимальне значення складової похибки вимірювання при застосуванні квазидиференціальної схеми зменшується у 3...8 разів порівняно зі складовою

похибки однокоміркової системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Л.И. Воробьев, Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива // Инженерно-физический журнал. – 1997. – Т. 70, № 5. – С. 828–839.

2. Л.И. Воробьев, Л.Н. Грабов, Л.В. Декуша, О.А. Назаренко, А.И. Шматок. Определение теплотворной способности биотопливных смесей // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 4. – С. 87–93.

3. Корчагина Е.Н. Современное состояние и тенденции развития калориметрии сжигания // Измерительная техника – 1998. – №11. – С.49–54.

4. Е.Н. Корчагина, Е.В. Ермакова, В.И. Беляков. Сравнительный анализ технических и метрологических характеристик бомбовых калориметров, применяемых в России // Измерительная техника. – 2011. – № 2. – С. 51–57.

5. Максимук Ю.В., Фесько В.В., Васаренко И.В., Дубовик В.Г. Метрологическое обеспечение измерений теплоты сгорания твердых и жидких топлив // Приборы и методы измерений. – № 2 (9), 2014. – С. 67–74.

6. Кальве Э., Праг А. Микрокалориметрия. Применение в физической химии и биологии. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 478 с.

7. Л.И. Воробьев, Л.В. Декуша, О.А. Назаренко, Т.Г. Грищенко. Применение метода квазидиференциальной калориметрии при реализации прибора для измерения теплоты сгорания // Промышленная теплотехника. – 2017. – №1. – С. 71–75.

8. Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Бурова З.А., Назаренко О.О., Воробйов Л.И. Патент України на винахід № 101716. Калориметр теплового потоку / заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ; опубліковано: 25.04.2013.

9. Декуша Л., Воробйов Л., Грищенко Т., Бурова З., Назаренко О., Мазуренко О. Квазидиференційний калориметр теплового потоку для визначення теплоти згоряння // Метрологія та прилади. – 2011. – № 5. – С. 27–31.

10. Бурова З.А., Воробйов Л.И., Назаренко О.О. Підвищення точності вимірювань теплоти згоряння палива // Научные труды SWorld. – 2016. – Т. 1. № 3 (44). – С. 93–97.

11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 750 с.

**THERMAL PROCESSES MODELING IN
QUASI-DIFFERENTIAL CALORIMETER**

**Vorobiov L.I.¹, Serhiienko R.V.¹, Burova Z.A.²,
Nazarenko O.A.¹**

¹Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

A model of the quasi-differential calorimetric system based on the electrothermal analogy method is proposed, where the construction system basic elements are presented as objects with the lumped parameters. The dynamics of average temperatures and heat flow changes in the calorimetric system elements, the temperature perturbations and the technological parameters spread influences on the measurement error are researched. With the quasi-differential system application the combustion heat measurement error component value is reduced by 3...8 times in comparison with the one-cell calorimetric system error. References 11, figures 3.

Key words: combustion heat, heat flow, quasi-differential calorimetric system, electrothermal analogy, measurement error.

1. *L.I. Vorobiov, T.G. Grisichenko, L.V. Dekusha.* Bomb calorimetry for determine the combustion heat of fuel // *Journal of Engineering Physics.* 1997. V. 70, № 5. P. 828–839. (Rus.)

2. *L.I. Vorobiev, L.N. Grabov, L.V. Dekusha, O.A. Nazarenko, A.I. Shmatok.* Determination of the thermal

capacity of biofuel mixtures. *Promyishlennaya teplotehnika.* 2011. T. 33, № 4. P. 87–93. (Rus.)

3. *Korchagina E.N.* Current state and development trends of combustion calorimetry. *Izmeritel'naya tehnika.* 1998. №11. P.49–54. (Rus.)

4. *E.N. Korchagina, E.V. Ermakova, V.I. Belyakov.* Comparative analysis of the technical and metrological characteristics of the bomb calorimeters used in Russia. *Izmeritel'naya tehnika.* 2011. №2, P. 51–57. (Rus.)

5. *Maksimuk Yu.V., Fesko V.V., Vasarenko I.V., Dubovik V.G.* Metrological assurance of solid and liquid fuels combustion heat measurements. *Pribory i metody izmereniy.* 2014. № 2 (9). P.67–74. (Rus.)

6. *E. Calvet, H. Prat* Microcalorimetric: Applications Physico-Chimiques et Biologiques. Paris: Masson, 1956 – 395 p. (Fr.)

7. *L.I. Vorobiev, L.V. Dekusha, O.A. Nazarenko, T.G. Grisichenko.* Application of the method of quasi-differential calorimetry in the implementation of a device for measuring the heat of combustion // *Promyishlennaya teplotehnika.* 2017. №1. P. 71–75. (Rus.)

8. *Grisichenko T.G., Dekusha L.V., Burova Z.A., Nazarenko O.O., Vorobiov L.Y.* Patent of Ukraine № 101716. Heat flow calorimeter, 25.04.2013. (Ukr.)

9. *Dekusha L., Vorobiov L., Grisichenko T., Burova Z., Nazarenko O., Mazurenko O.* Quasi-differential heat flow calorimeter to determine the heat of combustion // *Metrologiya ta priladi.* 2011. № 5. P. 27–31. (Ukr.)

10. *Burova Z.A., Vorobiov L.I., Nazarenko O.O.* Combustion heat fuel measurements accuracy increasing // *SWorldjournal.* 2016. V. 1. № 3 (44). P. 93–97. (Ukr.)

11. *Bessonov L.A.* Theoretical foundations of electrical engineering. M.: Visshaia shkola. 1973. 750 p. (Rus.)

Получено 28.09.2017

Received 28.09.2017