

2. Gray, J. The Transaction Concept: Virtues and Limitations [Text] / J. Gray // Proceedings of the 7th International Conference on Very Large Databases. – 1981. – P. 144–154.
3. Brewer, E. CAP twelve years later: How the “rules” have changed [Text] / Computer. – 2012. – Vol. 45, Issue 2. – P. 23–29. doi: 10.1109/mc.2012.37
4. Gilbert, S. Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services [Text] / S. Gilbert, N. Lynch // ACM SIGACT News. – 2002. – Vol. 33, Issue 2. – P. 51–59. doi: 10.1145/564585.564601
5. Birman, K. Overcoming CAP with Consistent Soft-State Replication [Text] / K. Birman, D. Freedman, Q. Huang, P. Dowell // Computer. – 2012. – Vol. 45, Issue 2. – P. 50–58. doi: 10.1109/mc.2011.387
6. Gilbert, S. Perspectives on the CAP Theorem [Text] / S. Gilbert, N. Lynch // Computer. – 2012. – Vol. 45, Issue 2. – P. 30–36. doi: 10.1109/mc.2011.389
7. Pritchett, D. BASE: an ACID alternative [Text] / D. Pritchett // Queue. – 2008. – Vol. 6, Issue 3. – P. 48–55. doi: 10.1145/1394127.1394128
8. Bailis, P. Eventual consistency today [Text] / P. Bailis, A. Ghodsi // Communications of the ACM. – 2013. – Vol. 56, Issue 5. – P. 55–63. doi: 10.1145/2447976.2447992
9. Gupta, M. K. In-Memory Database Systems – A Paradigm Shift [Text] / M. K. Gupta, V. Verma, M. S. Verma // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2013. – P. 333–336.
10. Шапоренков, Д. А. Эффективные методы индексирования данных и выполнения запросов в системах управления базами данных в основной памяти [Текст]: дис. канд. физ.-мат. наук / Д. А. Шапоренков. – СПб., 2006. – 126 с.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Бузовський О. В.
Дата надходження рукопису 20.06.2017*

Добровольський Олександр Юрійович, кафедра обчислювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: dobrunya777@gmail.com

УДК 536.62

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.108935

АНАЛІЗ АПРОКСИМАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ БОМБОВОГО КАЛОРИМЕТРА В НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

© В. П. Бабак, А. О. Запорожець, О. О. Назаренко, О. О. Редько

Досліджено принцип функціонування бомбового калориметра та методи визначення теплоти згорання палива. Проведені експериментальні дослідження по визначенню теплоти згорання дерев'яних пелетів. На основі проведених досліджень показані потенціальні зони скорочення часу встановлення показів результатів вимірювання бомбового калориметра. Запропоновано метод скорочення часу вимірювання теплоти згорання палива та проаналізовані його імовірнісні характеристики

Ключові слова: бомбовий калориметр, теплота згорання палива, інтерполяційні функції, коефіцієнт детермінації

1. Вступ

Забезпечення енергоефективності та енергозбереження є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасного інноваційно-технологічного суспільства. На підприємствах різних сфер промисловості для контролю енергетичної ефективності багатьох технічних засобів та оцінки теплотворної здатності палив в обов'язковому порядку використовуються калориметричні установки. Тому вирішення проблем метрологічного забезпечення вимірювань, що характеризують теплотворну здатність енергетичних ресурсів, є одним із стратегічних завдань розвитку промисловості, зокрема паливно-енергетичного сектору. Перехід на новий техніко-економічний рівень обліку транспортування та постачання енергоресурсів за енергетичними показниками вимагає вирішення комплексу важливих науково-технічних проблем, орієнтованих на вдосконалення взаємопов'язаних еталонів, оснащення підприємств новітніми приладами та методами обліку ене-

ргетичних параметрів та досягнення сучасного рівня метрологічного забезпечення таких приладів.

2. Літературний огляд

До теперішнього часу на більшості підприємств для визначення теплотворної здатності різних видів енергетичних палив в основному використовується бомбовий адиабатичний калориметр спалювання В2-08 [1, 2]. Випускаються також інші марки калориметрів, наприклад, АБК-1, що є аналогами В2-08. Вони базуються на вимірюванні зміни температури калориметричної рідини при спалюванні речовини в посуді («бомбі»), що розміщується в цій рідині [3]. Процес вимірювання є достатньо довгим (складає близько 30–40 хвилин) і в його основі лежать емпіричні формули алгоритму перетворення зміни температури в кількість теплоти. Процес вимірювання на цих калориметрах проходить в напівавтоматичному режимі і вимагає для роботи кваліфікованого оператора.

Серед зарубіжних калориметрів, що використовуються для визначення енергетичних властивостей палив, широко відомі засоби фірм: Anter Corporation (США), Gearing Scientific Ltd (Великобританія), Instrument Specialists Inc. (США), Leco Corporation (США), Linseis Messgeraete GmbH (Німеччина), Mettler-Toledo International Inc. (США), MicroCal Incorporated (США), NETZSCH Group (Німеччина), Part Instrument Company (США), PerkinElmer Inc (США), Rigaku Corporation (Японія), Setaram Instrumentation (Франція), Shimadzu Corporation (Японія), TA Instruments (США), Xentaur Corporation (США), БМЦ (Білорусь) та інші [4, 5].

Більшість марок калориметрів від виробників, наведених вище, використовують аналогічний вітчизняним метод вимірювання, але віграють у швидкодії та степені автоматизації, при цьому їх вартість значно вища.

Точність вимірювання як вітчизняних, так і зарубіжних калориметрів, залежить від швидкості зміни температури навколишнього середовища та від робочого тіла калориметра [6]. Тому часто на них працюють в спеціальних приміщеннях зі стабільною температурою та вологістю повітря [7].

Діаметричні калориметри вимірюють тепловий потік, що йде від бомби з речовиною, що спалюється, через чутливий елемент до масивного блоку. При інтегруванні сигналу, що пропорційний тепловому та має імпульсний характер, безпосередньо визначається кількість теплоти, що виділилася при спалюванні палива [8].

В роботах [9, 10] наведені оригінальні рішення, направлені на скорочення часу вимірювань в діаметричних калориметрах. Але через порівняно високий тепловий опір термобатарей при роботі в максимально можливих діапазонах та при частих експериментах відбувався перегрів вимірювальної комірки, що призводило до зростання похибки.

В роботі [11] наведені балістичні методи, що є допоміжними у приладах типу КТС. Вони дозволяють скоротити тривалість робочого режиму, але при цьому значно зменшується точність визначення енергетичних характеристик палива. Попередній результат вимірювання може бути доступний вже через 2–3 хвилини після підпалу палива, при цьому експериментатор може або зупинити вимірювання, або продовжити його до настання стаціонарного режиму. Проте дані про точність вимірювань не наводяться.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – скорочення часу визначення теплотворної здатності палив (твердих, рідких, газоподібних) шляхом інтерполяції даних вимірювань із забезпеченням міжнародних стандартів.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- дослідити принцип функціонування та режими роботи розробленого квазідиференціального бомбового калориметра КТС-4;
- провести експериментальні дослідження визначення теплотворної здатності палива;
- розробити метод скорочення часу вимірювання шляхом апроксимації отриманих даних;

– оцінити ймовірнісні характеристики розробленого методу та описати рекомендації щодо його впровадження.

4. Методи та засоби дослідження теплотворних властивостей палив на базі бомбового калориметра

Калориметричний експеримент звичайно розділяють на 3 періоди:

1) початковий – передує спалюванню проби та служить для врахування теплообміну калориметричного посуду з навколишнім середовищем в умовах початкової температури експерименту;

2) головний – відбувається спалювання проби, відведення калориметричною рідиною теплоти, що виділилася, та вирівнювання температури в калориметричному посуді;

3) кінцевий – служить для врахування теплообміну в умовах кінцевої температури експерименту.

Вимірювання теплоти Q , що виділяється під час спалювання проби палива, можливо декількома способами. Інтегральний спосіб є основним, він забезпечує найменшу похибку вимірювання та найтриваліший час проведення експерименту. 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 досліджуваному калориметрі один цикл обробки інформації складає $\Delta t_c = 1$ с. Кількість циклів ненормована, та залежить від багатьох параметрів. Визначення величини Q інтегральним способом відбувається за формулою:

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

де $W(t)$ – поточне значення теплової потужності; A – коефіцієнт перетворення; $(1 + \sum E_n)$ – множник, що враховує мультиплікативні поправки; K_i – вимірне значення сигналу від теплотметричної оболонки, K_0 – усереднене значення сигналу від теплотметричної 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 при градуванні калориметра та заноситься в пам'ять мікроконтролера. При проведенні перевірок калориметра значення цього множника може бути відкоректованим. Кінцеве значення величини Q при вимірюванні інтегральним способом відображається на дисплеї після завершення робочого режиму.

Для вимірювання значення Q використовується також балістичний спосіб, що дозволяє значно скоротити час робочого режиму, проте точність вимірювання за цим методом значно знижується в порівнянні з інтегральним способом. Тривалість робочого режиму при балістичному способі визначається часом t_{maz} , при якому сигнал від теплотметричної оболонки досягає максимального значення K_{maz} після пі-

дпалювання проби палива. Далі вимірювання Q проводять за допомогою апроксимуючої поліноміальної функції:

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

де коефіцієнти полінома P_j визначаються експериментально при градуванні калориметра та заносяться до пам'яті мікроконтролера. Тривалість підготовки при балістичному способі ідентична інтегральному, але результат може бути отриманий вже через 2–3 хвилини після підпалу палива.

Теплотворну здатність палив в експерименті було досліджено за допомогою калориметра типу КТС-4, що розроблений у відділі теплотехніки, діагностики та оптимізації в енергетиці ІГТФ НАН України. Прилад КТС-4 є бомбовим анероїдним ізоперіболічним калориметром теплового потоку. Принцип роботи калориметра базується на вимірюванні теплового потоку, що формується при спалюванні проби палива, та його інтегруванні, внаслідок чого визначають теплоту, що виділяється при спалюванні палива.

В порівнянні з іншими моделями калориметрів КТС [12, 13], в конструкцію пристрою КТС-4 додано ряд удосконалень, направлених на підвищення технологічності виготовлення, зменшення часу підготовки та підвищення точності вимірювання. Діапазон вимірювань калориметра – від 10 до 40 кДж, похибка вимірювань складає $\pm 0,1\%$, тривалість процесу підготовки – не більше 90 хвилин, тривалість процесу вимірювання – 30 хвилин. Технічні характеристики бомбового калориметра КТС-4 приведені в табл. 1.

Представлене в роботі дослідження має на меті скоротити час вимірювання теплотворних характеристик палив.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики калориметра КТС-4

Параметри	Значення
Діапазон вимірюваної кількості теплоти, кДж	10–40
Межі основної відносної похибки, %	$\pm 0,1$
Загальний час підготовки до вимірювань, хв	≤ 90
Час проведення вимірювань, хв	30
Потужність (від мережі 220 В, 50 Гц), ВА	≤ 850
Індикація результатів вимірювань	цифрова
Маса, кг	
– теплового блоку	50,0
– електронного блоку	15,0
– калориметричної бомби	2,5

Зовнішній вигляд бомбового калориметра КТС-4 представлено на рис. 1.

До його складу входять:

- 1) тепловий блок, призначений для розміщення в ньому проби палива, забезпечення необхідного температурного режиму роботи та вимірювання тепловиділення із бомби при спалюванні проби палива;
- 2) дві калориметричні бомби БКУ-2, призначені для спалювання проби палива в кисні;
- 3) електронний блок, призначений для регулювання теплового режиму, вимірювання та обробки сигналів первинних перетворювачів, формування електричного імпульсу підпалу проби палива, передачі вимірювальної інформації в персональний комп'ютер.



Рис. 1. Зовнішній вигляд бомбового калориметра КТС-4

Вимірювання кількості теплоти, що виділяється при спалюванні проби палива відбувається наступним чином [14]. Проба палива, підготовлена відповідно до стандартів, спалюється в калориметричній бомбі, що встановлюється в тепловому блоці калориметра та заповнена киснем, при тиску 2,5...3 МПа.

Температура поверхні теплового блоку стабілізується за допомогою електронного регулятора. Теплота, що виділяється при спалюванні проби палива, визначається інтегруванням теплового потоку, що вимірюється термоелектричним перетворювачем теплового потоку. Вимірювання й обробка інформації прово-

дяться на базі мікропроцесорного пристрою, а результат відображається на цифровому дисплеї електронного блоку у вигляді одиниць кількості теплоти, що виділилася при спалюванні палива (Дж/ккал). Отриманий результат передається до комп'ютера для подальшої обробки, а саме розрахунку вищої і нижчої теплоти згоряння, внесення поправок, друкування протоколу. Для виключення впливу температури і конвекції повітря тепловий блок калориметра розміщують в кліматичній камері, а для стабілізації напруги живлення в мережі використовують стабілізатор мережевої напруги.

При підготовці проби проводиться вимірювання маси проби паливного матеріалу M_{fuel} , мідного запального дроту M_{w1} , поліетиленової упаковки M_p та наповнювача M_{fill} . При проведенні калориметричного дослідження визначається теплота Q_{fuel} , що виділяється при спалюванні проби. Після дослідження вимірюється залишкова маса запального дроту M_{w2} . Питомою теплою згоряння палива в бомбі розраховується за формулою:

$$q_b = \left[Q_{fuel} - q_w \cdot (M_{w1} - M_{w2}) - q_p \cdot M_p - q_{fill} \cdot M_{fill} \right] / M_{fuel}$$

де q_b – питома теплота згоряння палива в бомбі калориметра; Q_{fuel} – виміряна теплота згоряння проби палива, Дж; q_w – питома теплота згоряння дроту підпалу (2510 Дж/г); q_p – питома теплота згоряння упаковки із поліетилену (46382 Дж/г); q_{fill} – питома теплота згоряння наповнювача (16700 Дж/г).

5. Результати експериментальних досліджень вимірювання теплоти згоряння палива в бомбовому калориметрі

Процес вимірювання в бомбовому калориметрі відбувався при переході з одного стаціонарного режиму в інший. Моменти початку і кінця вимірювання визначаються ступенями досягнення стаціонарного режиму.

Калориметрична бомба, попередньо заповнена речовиною, теплота згоряння якої вимірюється в експерименті, та киснем підігрівалася до температури, що дещо перевищує робочу температуру калориметра (звичайно, на 2–3 °С). Далі калориметрична бомба розміщувалася у вимірювальній комірці калориметра, після чого розпочинався процес вимірювання. Після спадання значень теплового потоку від калориметричної бомби до заданого (стаціонарного) рівня відбувалося загоряння речовини від спіралі підпалу, що знаходилася в контакт з речовиною. Одночасно з цим починалося інтегрування сигналу, що надходив від сенсорів теплового потоку, від згоряння речовини. Спочатку рівень сигналу зростав до максимального значення, після чого відбувалося його спадання до встановлення стаціонарного режиму. Після цього інтегрування закінчувалося і на моніторі відображалося чисельне значення теплоти згоряння речовини, характеристика якої досліджувалася в експерименті.

В приведеному дослідженні проводилося визначення теплоти згоряння дерев'яних пелетів. На рис. 2 показані графіки зміни рівня теплового потоку Q протягом часу вимірювання t при переході між стаціонарними рівнями.

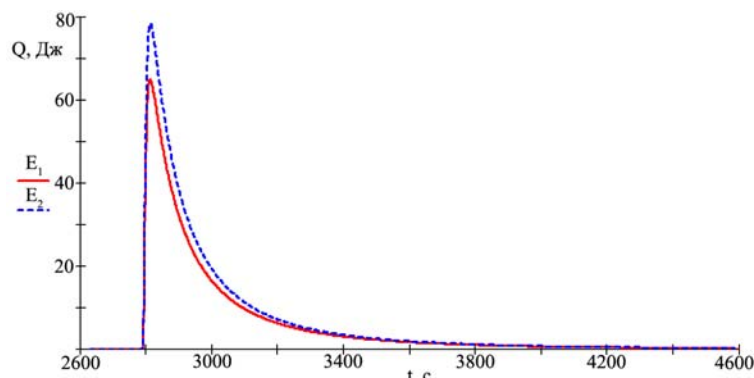


Рис. 2. Зміна теплового потоку в ході експериментальних досліджень на бомбовому калориметрі

В ході експериментальних досліджень проводилося два окремих вимірювання значень теплоти згоряння однакових зразків дерев'яних пелетів. Встановлено, що теплота згоряння (після інтегрування сигналу від сенсорів теплового потоку) 1-го зразка становила $Q_{b1}=11243$ Дж, 2-го – $Q_{b2}=13273$ Дж (на рис. 2 графіки E_1 та E_2 відповідно).

Період встановлення стаціонарного режиму калориметричної бомби до підпалювання дерев'яних пелетів у 1-му експерименті склав 2786 с, у 2-му – 3410 с.

Часовий проміжок від моменту підпалу до встановлення максимального значення теплового потоку у 1-му експерименті склав 23 с, у 2-му – 25 с при максимальних значеннях рівня теплового потоку склали 64,851 Дж та 78,278 Дж відповідно.

Час встановлення стаціонарного режиму після досягнення пікового значення теплового режиму у 1-му експерименті 1774 с, у 2-му – 1773 с.

6. Обговорення результатів вимірювання теплоти згоряння палива в бомбовому калориметрі

Згідно ДСТУ 3581-97 (ГОСТ 30517-97) вимірювання вищої і нижчої теплоти згоряння твердого палива слід проводити згідно ДСТУ ISO 1928:2006. В національному стандарті ДСТУ ISO 1928:2006 зазначається, що результатом випробування є середньоарифметичне значення (E_{ave}) результатів двох паралельних вимірювань, збіжність яких не більше ніж 120 кДж/кг.

В даній роботі пропонується метод скорочення часу встановлення питомої теплоти згоряння палива, який полягає у прогнозуванні значення відліку часу за значенням E_{ave} в режимі реального часу. Завдання прогнозування вирішується використанням визначеної функціональної залежності, отриманої шляхом апроксимації результатів вимірювання теплоти згоряння палива через деякий час після досягнення пікового значення теплового потоку. Цей часовий проміжок є одним з найбільш інформативних параметрів у процесі визначення теплоти згоряння палива.

Оскільки головним результатом в даному дослідженні є найбільше наближення шуканої функціональної залежності до експериментальних даних, то було прийнято рішення застосувати інтерполяційний метод, оскільки він забезпечує співпадіння значень апроксимуючої функції $\varphi(x)$ з вихідними вимірними значеннями функції $y(x)$. При всіх значеннях аргументу розуміють, що $y(x) \approx \varphi(x)$, та їх близькість отримують введенням в апроксимуючу функції вільних параметрів $c = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ і відповідним їх вибором. Підбір вдалого виду функціональної залежності $\varphi(x; c)$ проводився в програмному пакеті MathCAD. Пошук найкращих рівномірних наближень для функції заданої на проміжку $[a, b]$, визначається умовою:

$$\Delta(y, \varphi) = \min, \text{ де } \Delta(y, \varphi) = \max_{a \leq x \leq b} |y(x) - \varphi(x)|.$$

Якість обраного виду та розрахованих параметрів рівнянь інтерполянтів визначалась шляхом розрахунку та порівняння коефіцієнтів детермінації R^2 , область значень якого від 0 до 1 (чим ближче значення R^2 до 1, тим більша відповідність моделі вхідним даним):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y(x_i) - \varphi(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n \left(y(x_i) - \frac{\sum_{i=1}^n y(x_i)}{n} \right)^2}.$$

Загальний аналітичний вид типів функцій та визначені їх параметри, що використовувалися для інтерполяції даних на часовому проміжку від пікового значення Q до його затухання з інтервалом 1 с, наведено в табл. 2.

На рис. 3–7 наведені інтерполянти для вибраних типів функцій, що апроксимують результати вимірювання теплоти згорання палива після досягнення пікового значення теплового потоку. Для спрощення розрахунків часовий відлік по осі абсцис встановлювався на рівні 0 с для пікового значення теплового потоку.

Як видно з рис. 3–7, найбільший коефіцієнт детермінації на всьому часовому проміжку експерименту забезпечується інтерполяцією експоненціальною функцією – $R^2_{\text{exp}} = 0,994$, найменший – $R^2_{\text{pol4}} = 0,075$ (інтерполяція поліномом 4-го порядку).

Для дослідження можливості раннього встановлення питомої теплоти згорання в процесі вимірювання, були розраховані коефіцієнти детермінації для визначених інтерполюючих функцій на $k = [t(Q_{\text{кін}}) - t(Q_{\text{поч}})] / 30$ часових інтервалах від пікового значення Q до встановлення стабільного низького значення з кроком в 1 с. Довжина кожного часового інтервалу збільшується на 30 с: $t_{\text{int}} = j \cdot 30$, де $j = \overline{1, k}$. На рис. 8, 9 відображена зміна коефіцієнтів детермінації для всіх типів застосованих інтерполянтів в залежності від k -го часового інтервалу. Деякі розраховані значення коефіцієнтів детермінації на різних часових інтервалах наведено в табл. 3.

Таблиця 2

Інтерполяційні функції для обробки експериментальних даних

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

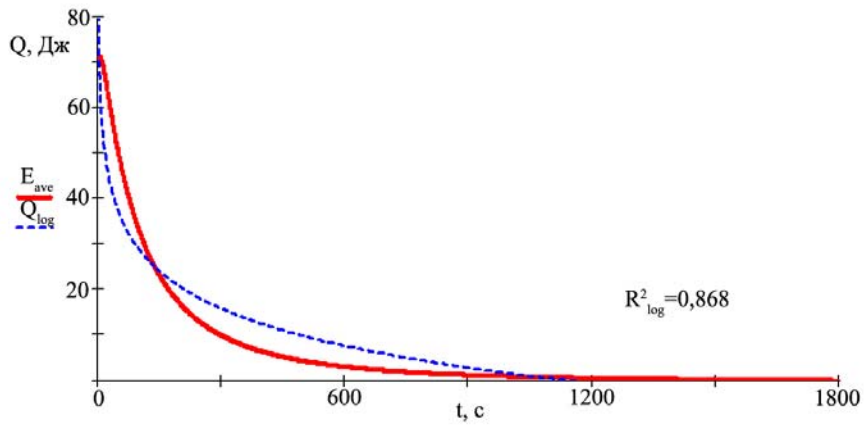


Рис. 3. Интерполяция результатов эксперимента функцией вида Q_{log}

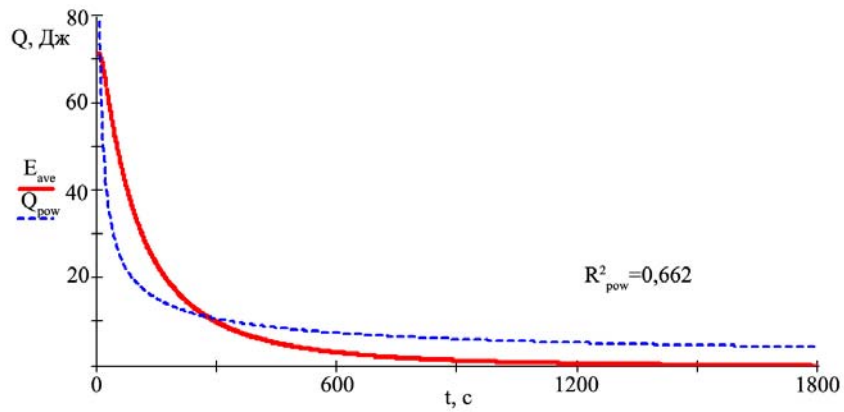


Рис. 4. Интерполяция результатов эксперимента функцией вида Q_{pow}

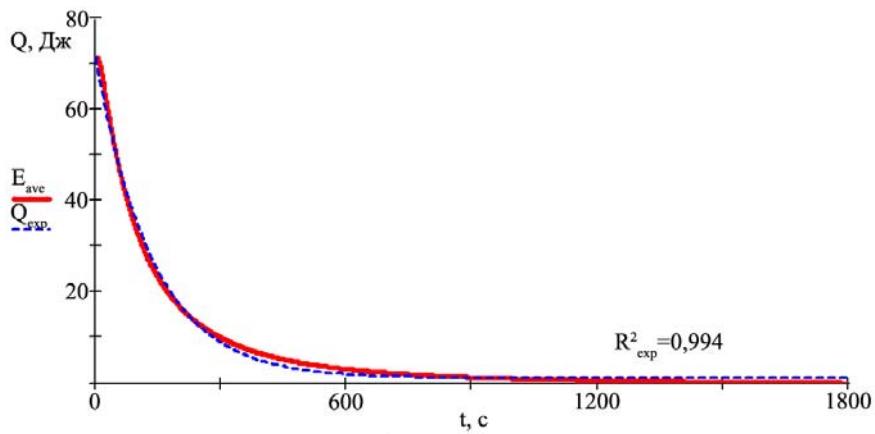


Рис. 5. Интерполяция результатов эксперимента функцией вида Q_{exp}

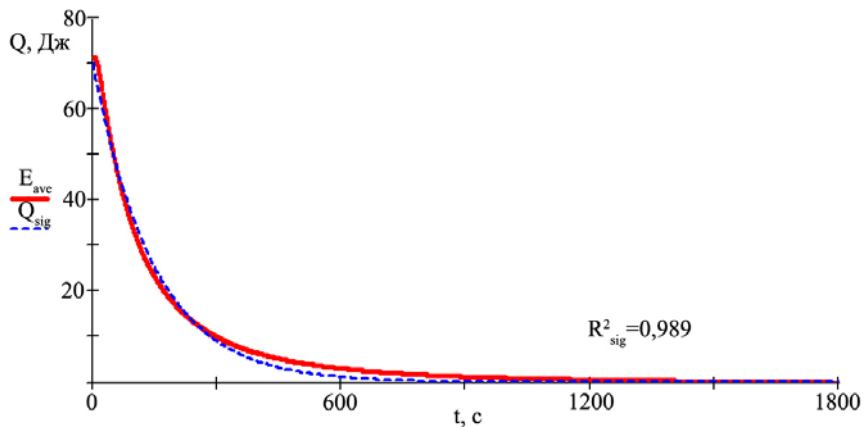


Рис. 6. Интерполяция результатов эксперимента функцией вида Q_{sig}

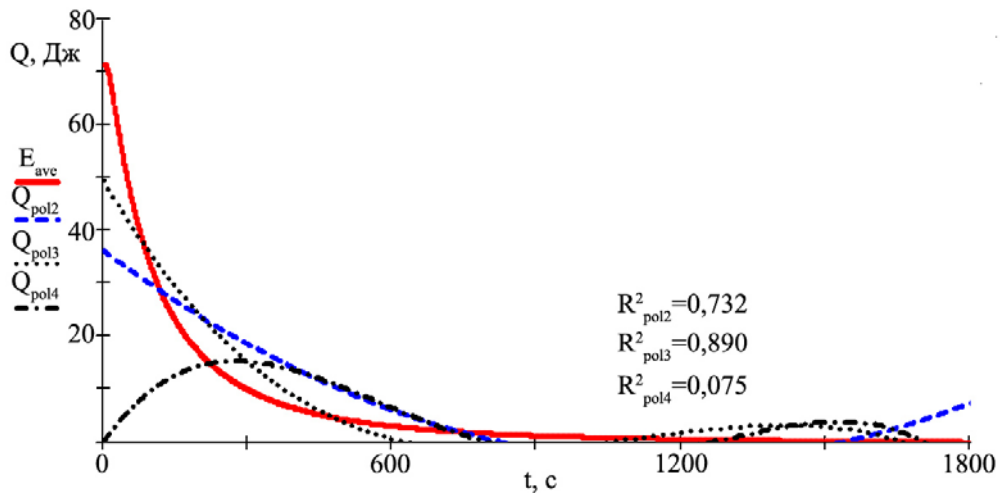


Рис. 7. Інтерполяція результатів експерименту функцією виду Q_{pol2} , Q_{pol3} , Q_{pol4}

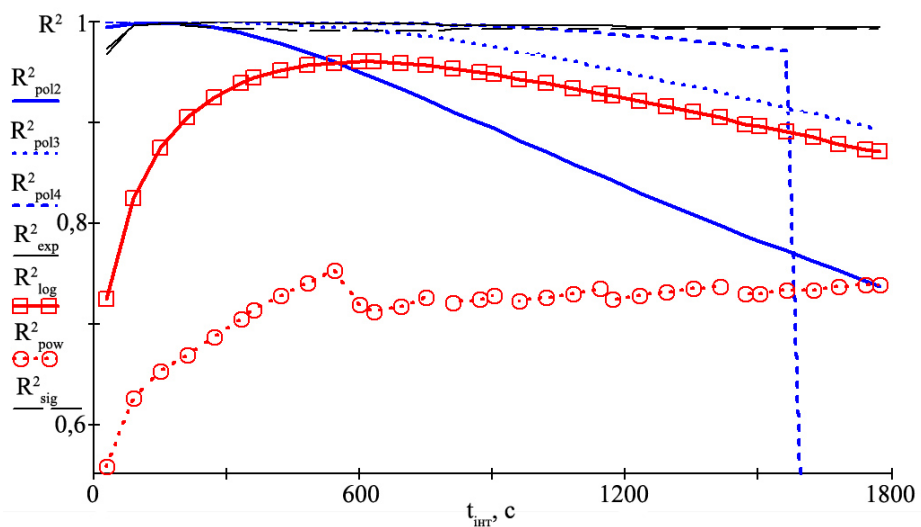


Рис. 8. Графіки зміни значень коефіцієнтів детермінації всіх типів інтерполяційних функцій

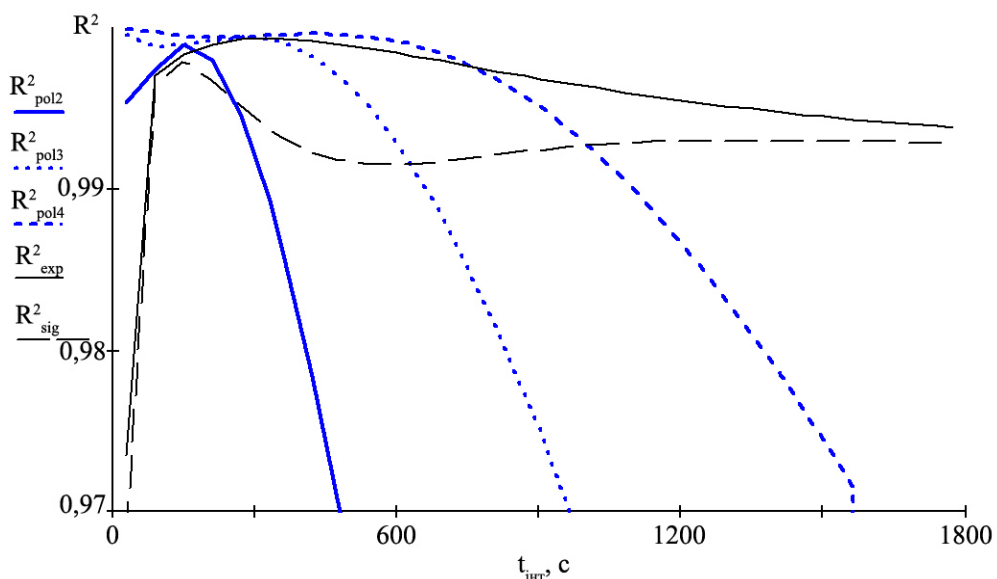


Рис. 9. Графіки зміни значень коефіцієнтів детермінації деяких типів інтерполяційних функцій (R^2_{pol2} , R^2_{pol3} , R^2_{pol4} , R^2_{exp} , R^2_{sig})

Таблиця 3

Коефіцієнти детермінації інтерполяційних функцій на різних часових проміжках встановлення стаціонарного режиму

$t_{\text{инт}}, \text{с}$	R^2_{pol2}	R^2_{pol3}	R^2_{pol4}	R^2_{exp}	R^2_{log}	R^2_{pow}	R^2_{sig}
90	0,9974	0,9988	0,9997	0,9971	0,8252	0,6257	0,9963
180	0,9987	0,9991	0,9994	0,9987	0,891	0,6645	0,9974
270	0,9945	0,9994	0,9994	0,9992	0,9255	0,6862	0,9951
360	0,9859	0,9991	0,9995	0,9993	0,9448	0,7132	0,9931
450	0,9741	0,9976	0,9996	0,9991	0,955	0,7345	0,9919
540	0,9601	0,9951	0,9994	0,9987	0,9593	0,7519	0,9915
630	0,9446	0,9915	0,9989	0,9982	0,9598	0,7119	0,9915
720	0,928	0,9868	0,9981	0,9978	0,9574	0,7213	0,9918
810	0,9109	0,9813	0,9968	0,9973	0,9532	0,72	0,9921
900	0,8935	0,975	0,9951	0,9968	0,9476	0,7276	0,9924
990	0,876	0,968	0,9931	0,9964	0,9411	0,7241	0,9927
1080	0,8587	0,9605	0,9906	0,996	0,9338	0,7297	0,9928
1170	0,8416	0,9525	0,9877	0,9956	0,9261	0,7246	0,9929
1260	0,8248	0,9442	0,9845	0,9952	0,9181	0,7301	0,993
1350	0,8083	0,9356	0,9809	0,9949	0,9098	0,7338	0,993
1440	0,7923	0,9267	0,9771	0,9946	0,9015	0,7273	0,993
1530	0,7767	0,9176	0,973	0,9944	0,893	0,7313	0,9929
1620	0,7616	0,9085	0,1431	0,9941	0,8845	0,7337	0,9929
1710	0,7468	0,8992	0,1339	0,9939	0,8761	0,7371	0,9928
1800	0,7324	0,8901	0,1257	0,9937	0,8679	0,7401	0,9928

Як видно з рис. 8, 9 та табл. 3, найбільше значення коефіцієнта детермінації на j -их проміжках часу до $t_{\text{инт}} \approx 750$ с забезпечується для поліноміальної функції 4-го порядку, але на всьому проміжку експерименту найбільший коефіцієнт детермінації забезпечується експоненціальною інтерполюючою функцією $R^2_{\text{exp}} = 0,994$.

Слід звернути увагу, що на j -их проміжках часу від пікового значення Q до $t_{\text{инт}} \approx 660$ с для всіх обраних моделей інтерполіантів, окрім степеневі та на деяких інтервалах логарифмічної, коефіцієнти детермінації R^2 приймають значення більші ніж 0,995, що свідчить про високу адекватність розрахованих параметрів запропонованих математичних моделей.

Таким чином, підтверджується можливість застосування методу скорочення часу вимірювання питомої теплоти згоряння палива шляхом інтерполяції отриманих даних зміни теплового потоку в часі, вже через деякий час після досягнення його пікового значення (≈ 90 с). Для використання даного методу необхідно володіти емпіричною інформацією про характер нестационарного режиму спалювання окремого виду палива в бомбовому калориметрі. Прогнозування значення теплоти згоряння можливо двома способами, за визначеними емпірично інтерполюючими функціями: на всьому проміжку часу від пікового значення до початку стаціонарного режиму або на j -ому проміжку часу.

Реалізація запропонованого методу можлива шляхом введення в електронний блок схеми запропонованого розрахункового алгоритму та модулю реструктуризації функціональних залежностей зміни теплового потоку в часі для різних типів палива. При цьому, дані про вимірювання питомої теплоти згоряння палива будуть відображенні на інтерфейсі оператора програмного забезпечення калориметра через

встановлюваний короткий проміжок часу (≈ 120 с) після запалювання експериментального зразка.

В наступних роботах планується представити розрахунок значення розширеної невизначеності результату вимірювання питомої теплоти згоряння палива, для різних номінальних значень величини q різних видів палив та для обох способів запропонованого методу прогнозування.

7. Висновки

1. Розглянуто принцип функціонування та основні технічні характеристики розробленого в Інституті технічної теплофізики НАН України квазидиференціального бомбового калориметра КТС-4. Наведені методика визначення теплоти згоряння палива та методи скорочення часу експериментальних досліджень.

2. Проведені експериментальні дослідження по визначенню теплоти згоряння дерев'яних пелетів. Середнє значення теплоти згоряння в експерименті склало $Q_b = 12258$ Дж. Загальний час проведення двох експериментів склав ≈ 165 хв. Показано, що найбільший потенціал до скорочення часу вимірювань лежить в межах встановлення стаціонарних режимів (1 – до підпалювання експериментального зразку, 2 – після досягнення пікового значення теплового потоку). Скорочення часу встановлення першого стаціонарного режиму можливе шляхом вдосконалення апаратної частини бомбового калориметра. Скорочення часу встановлення значення теплоти спалювання палива можливе шляхом використання результатів математичних методів обробки вимірювальних експериментів.

3. Запропоновано метод скорочення часу встановлення значення питомої теплоти згоряння палива шляхом апроксимації результатів вимірювального експерименту за допомогою інтерполяційних функцій.

цій різних типів (логарифмічної, степеневі, експоненціальної, сигмоїдної, поліноміальної різних порядків).

4. Показано, що застосування експоненціальної функції для інтерполяції експериментальних даних забезпечує найбільший коефіцієнт детермінації серед розглянутих функціональних залежностей ($R^2_{\text{exp}}=0,994$), що свідчить про адекватність запропонованої математичної моделі. При цьому результат вимірювання можна отримати вже через декілька секунд після досягнення пікового значення теплового потоку. Коефіцієнти детермінації для інших типів розглянутих функціональних залежностей на всьому

часовому проміжку встановлення стаціонарного режиму в порядку їх спадання становлять: $R^2_{\text{sig}}=0,989$ (сигмоїдна); $R^2_{\text{pol3}}=0,890$ (поліноміальна 3-го порядку); $R^2_{\text{log}}=0,868$ (логарифмічна); $R^2_{\text{pol2}}=0,732$ (поліноміальна 2-го порядку); $R^2_{\text{pow}}=0,662$ (степенева); $R^2_{\text{pol4}}=0,075$ (поліноміальна 4-го порядку).

Для підвищення точності та зменшення часу визначення теплоти спалювання палива доцільно застосовувати бібліотеку даних, створення якої можливе шляхом зберігання та опрацювання даних вимірювань відповідно до кожного виду та стану паливних матеріалів. Реалізація даного методу буде розглянута в наступних роботах.

Література

1. Машкинов, Л. Б. Быстродействующий диатермический бомбовый калориметр сжиганий БКС-2Х [Текст] / Л. Б. Машкинов, П. К. Васильев, В. В. Батылин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 4. – С. 42–44.
2. Корчагина, Е. Н. Калориметрия сгорания топлива [Текст] / Е. Н. Корчагина, Е. В. Ермакова, В. П. Варганов // Мир измерений. – 2012. – № 2. – С. 32–39.
3. Yang, X. Construction of a rotating-bomb combustion calorimeter and measurement of thermal effects [Text] / X. Yang, S. Chen, S. Gao, H. Li, Q. Shi // Instrumentation Science & Technology. – 2002. – Vol. 30, Issue 3. – P. 311–321. doi: 10.1081/ci-120013509
4. Peralta, D. Coal blend performance during pulverised-fuel combustion: estimation of relative reactivities by a bomb-calorimeter test [Text] / D. Peralta, N. P. Paterson, D. R. Dugwell, R. Kandiyoti // Fuel. – 2001. – Vol. 80, Issue 11. – P. 1623–1634. doi: 10.1016/S0016-2361(01)00031-X
5. Yu, X. Study on thermodynamic properties of glyphosate by oxygen-bomb calorimeter and DSC [Text] / X. Yu, C.-R. Zhou, X.-W. Han, G.-P. Li // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2012. – Vol. 111, Issue 1. – P. 943–949. doi: 10.1007/s10973-012-2384-5
6. Zhao, M.-R. Thermodynamic properties of diosgenin determined by oxygen-bomb calorimetry and DSC [Text] / M.-R. Zhao, H.-J. Wang, S.-Y. Wang, X.-X. Yue // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2014. – Vol. 88, Issue 12. – P. 2280–2282. doi: 10.1134/S003602441412022X
7. Lyon, R. E. Thermal dynamics of bomb calorimeters [Text] / R. E. Lyon // Review of Scientific Instruments. – 2015. – Vol. 86, Issue 12. – P. 125103. doi: 10.1063/1.4936568
8. Overdeep, K. R. Design and functionality of a high-sensitivity bomb calorimeter specialized for reactive metallic foils [Text] / K. R. Overdeep, T. P. Weihs // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2015. – Vol. 122, Issue 2. – P. 787–794. doi: 10.1007/s10973-015-4805-8
9. Иноземцев, Я. О. Калориметр для контроля эффективности энергоемких системы и калорийности энергоресурсов [Текст] / Я. О. Иноземцев, А. Б. Воробьев, Ю. Н. Матюшин // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 1. – С. 71–74.
10. Максимук, Ю. В. Метрологическое обеспечение измерений теплоты сгорания твердых и жидких топлив [Текст] / Ю. В. Максимук, В. В. Фесько, И. В. Васаренко, В. Г. Дубовик // Методы измерений, контроля, диагностики. – 2014. – № 2 (9). – С. 67–74.
11. Воробьев, Л. И. Кондуктивный бомбовый калориметр для измерения теплоты сгорания топлива [Текст]: дис. канд. техн. наук / Л. И. Воробьев. – К., 2000. – 185 с.
12. Воробьев, Л. И. Определение теплотворной способности биотопливных смесей [Текст] / Л. И. Воробьев, Л. Н. Грабов, Л. В. Декуша, О. А. Назаренко, А. И. Шматок // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 4. – С. 87–93.
13. Бабак, В. П. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії [Текст]: монографія / В. П. Бабак, В. С. Берегун та ін.; ред. В. П. Бабак. – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2016. – 298 с.
14. Burova, Z. A. Biofuels: the combustion heat analysis [Text] / Z. A. Burova, L. I. Vorobyov, O. O. Nazarenko // SWorld Journal. – 2016. – Vol. 10, Issue 11. – P. 152–155.

Дата надходження рукопису 29.06.2017

Бабак Віталій Павлович, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, Відділ теплотермії, діагностики та оптимізації в енергетиці, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, Україна, 03057
E-mail: vdcoe@ukr.net

Запорожець Артур Олександрович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Відділ теплотермії, діагностики та оптимізації в енергетиці, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, Україна, 03057
E-mail: art.morco@gmail.com

Назаренко Олег Олексійович, аспірант, відділ теплотермії, діагностики та оптимізації в енергетиці, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, Україна, 03057
E-mail: encenter@bigmir.net

Редько Олександр Олександрович, провідний інженер, служба головного метролога, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058,
E-mail: o.redko.ua@gmail.com