

НАУКОВІ ВІСТІ

Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут"

Науково-технічний журнал

№ 3 (4)

1998

Започаткований у вересні 1997 року

Редакційна колегія:

Головний редактор
М.З. Згуровський

Заступник головного
редактора
М.Ю. Льченко

Відповідальний секретар
Г.Ф. Бублик

Члени редколегії

М.І. Бобир
О.В. Збруцький
О.А. Молчанов
Б.В. Новіков
О.М. Новіков
А.В. Праховник
В.П. Сігорський
В.О. Христич
О.Г. Юрченко
Ю.І. Якименко

Секретар редакції
Л.Д. Калько

Адреса редакції:
252056, Київ-56,
проспект Перемоги, 37,
Національний технічний
університет України
"Київський політехнічний
інститут",
Тел. 441-19-73

У номері:

Електроніка, радіотехніка
та засоби телекомунікацій

Електротехніка
та енергозбереження

Енергетика та нові
енергогенеруючі технології

Інформаційні технології,
системний аналіз та керування

Матеріалознавство
та машинобудування

Приладобудування
та інформаційно-вимірювальна
техніка

Проблеми фундаментальних
та прикладних наук

Соціально-економічні,
гуманітарні проблеми
та проблеми вищої школи

Фізичні, хімічні
і біологічні процеси,
проблеми екології

УДК 536. 62

Л.Й. Воробйов, А.В. Гайдучек,
Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша,
О.Г. Мазуренко, А.І. Самокиш,
П.Д. Хаврюченко

НОВИЙ КАЛОРИМЕТР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА

Вступ

Кількісна оцінка енергетичної характеристики органічного палива — теплоти згоряння — має важливе значення, оскільки паливна складова в собівартості 1 кВт-год електричної енергії в Україні за даними на жовтень 1994 р. становила 90% від загальної величини [1].

В Україні і країнах СНД теплоту згоряння вимірюють ізопериметричними водяними калориметрами В-08-М та В-08-МА [2,3], які виготовляють в Росії і Казахстані. Згідно з діючими стандартами [4], пробу палива відомої маси (для твердих і рідких видів палива) спалюють при постійному об'ємі і високому тиску кисню в калориметричній бомбі (КБ), зануреній у посудину з дистильованою водою відомої маси. Теплоту згоряння проби палива визначають за приростом температури води, яку вимірюють метастатичним або платиновим термометром.

Водяні калориметри незручні в експлуатації, бо потребують приміщень з малими коливаннями температури та вологості, вимагають від оператора великої уважності при контролі маси води в посудині, вимірюванні її температури з точністю до $\pm 0,001^\circ\text{C}$ та проведенні відповідних обчислень, внаслідок чого результати визначення теплоти згоряння містять суб'єктивну похибку. Крім того, для водяних калориметрів нормована не похибка вимірювання теплоти згоряння палива, а похибка визначення власної ефективної теплоємності калориметра.

Водяні калориметри не відповідають ні потребам сучасної теплоенергетики, ні можливостям сучасної техніки теплових вимірювань, і до того ж, в Україні не виготовляються.

В Інституті технічної теплофізики НАНУ спільно з конструкторським бюро "Шторм" при НТУУ "КПІ" розроблено калориметр згоряння КТЗ-1 [5], який не має властивих водяним калориметрам недоліків і автоматизує

процес вимірювання теплоти згоряння твердих та рідких видів палива з урахуванням вимог діючих стандартів [4,6]. Цей калориметр може бути робочим засобом в національній системі контролю якості палива за величиною теплоти згоряння.

Принцип дії нового калориметра

За принципом дії КТЗ-1 є ізопериметричним кондуктивним калориметром [7]. В ньому тепло, яке утворюється при згорянні в КБ проби палива, відводиться до ізотермічної оболонки через перетворювач теплового потоку (ПТП), сигнал якого є пропорційним тепловій потужності, що проходить через нього. В КТЗ-1 реалізовано два способи визначення теплоти згоряння: інтегральний (інтегруванням сигналу ПТП протягом всього часу протікання теплового процесу) та балістичний (за величиною максимуму сигналу ПТП).

Зовнішній вигляд КТЗ-1 представлений на рис. 1. Калориметр складається з двох блоків: теплового (ТБ) і електронного (ЕБ).

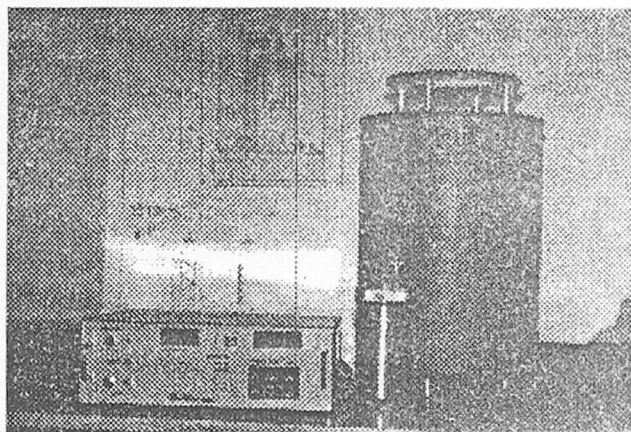


Рис. 1. Зовнішній вигляд КТЗ-1

Тепловий блок калориметра

Конструктивна схема ТБ представлена на рис. 2. Масивний циліндричний корпус 1 ТБ виготовлений з дюралюмінію. Дно корпуса утворене механічно з'єднаними нижньою кришкою 2 і кришкою 3 з теплоізоляційною вкладкою 4.

На зовнішній поверхні корпуса 1 в пазах багатозаходної різьби розміщено електричний нагрівач (ЕН) 5, виконаний з електроізоляваного константанового дроту, та мідний термометр опору, який є первинним вимірю-

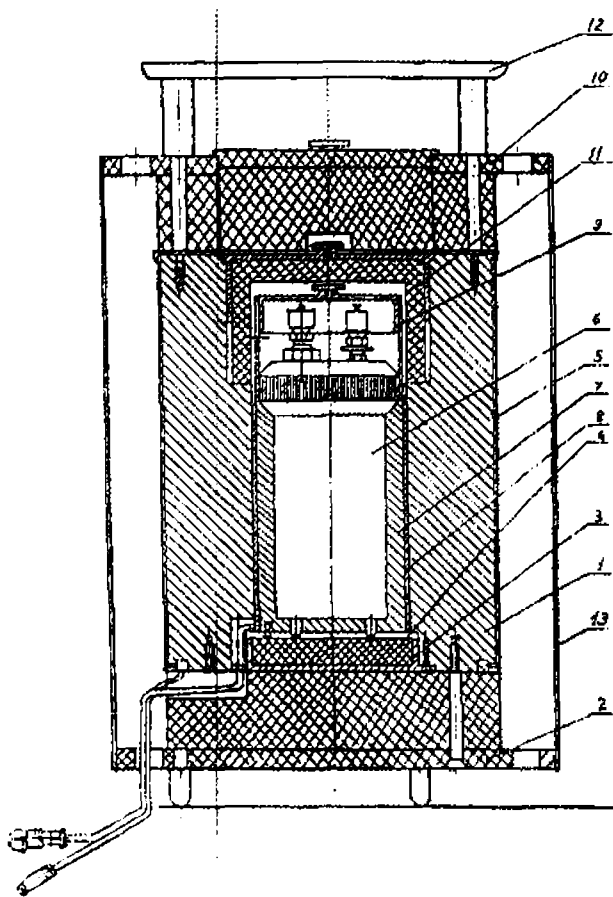


Рис. 2. Конструктивна схема теплового блоку КТЗ-1

вальним перетворювачем температури (ПТ). ЕН і ПТ призначені для забезпечення ізотермічності корпусу 1.

Самоушільнювана КБ 6 типу ЛБС (завод "Хроматограф", м. Москва), заповнена пробюю палива та киснем, розміщена в калориметричній комірці, утвореній дюралюмінієвим стаканом 7, теплометричною оболонкою 8 і кришкою 9. Внутрішні розміри стакана 7 забезпечують добрий тепловий контакт з поверхнею КБ. В дні стакана передбачено три отвори для опорних ніжок КБ, завдяки яким досягається фіксація її положення в стакані.

Теплометрична оболонка 8, розміщена на зовнішній поверхні стакана 7, є первинним вимірювальним перетворювачем теплового потоку (ПТП) термоелектричного типу [8,9], виконаний у вигляді циліндричної стінки, товщина якої дорівнює ширині зазору між корпусом 1 і стаканом 7.

Для калориметра КТЗ-1 розроблено спеціальну циліндричну оболонку великого діаметра, що дозволило створити калориметричну комірку з корисним об'ємом 750 мл. В за-

зорі, заповненому теплометричною оболонкою, передбачено паз прямокутного перетину для укладання проводів підводу електроенергії, необхідної для підпалювання проби палива в КБ. Корпус 1 ТБ зверху закривається кришкою 10 з теплоізоляційною вкладкою 11. Для транспортування ТБ служить кільцева ручка 12. Зовнішня поверхня корпусу 1 захищена металевим кожухом 13.

Електронний блок калориметра

Електронний блок складається з трьох функціональних вузлів (рис.3): системи стабілізації температури (ССТ) корпусу ТБ, системи підпалювання проби палива (СПП) і системи вимірювання та обробки сигналів (СВО).

ССТ – це пропорційний регулятор, який забезпечує нагрівання корпусу ТБ до температури $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ та її підтримування із стабільністю $\pm 0,005^\circ\text{C}$ протягом всього робочого режиму калориметра. Для вимірювання температури корпусу ТБ служить утворений резисторами R_1, R_2, R_3 та ПТ збалансований на 50°C міст Уїтстона, який живиться постійною стабільною напругою E . Напруга U_p розбалансу моста надходить на широтно-імпульсний модулятор (ШІМ), який керує роботою навантаженого на ЕН з опором 300 Ом ключового підсилювача потужності, що живиться від вторинного безтрансформаторного джерела (БДЖ). Індикатором роботи ССТ є світлодіод "НАГРІВАННЯ", світіння якого з безперервного в момент первинного вмикання ССТ переходить у переривчасте в режимі стабілізації температури корпусу ТБ.

Евакуування надмірної теплової енергії здійснюється конвективним потоком повітря в кільцевій щілині між корпусом 1 і захисним металевим кожухом 13 ТБ (див. рис.2).

СПП складається з трансформатора T_p , вторинна обмотка якого через світлодіод VD ("ЛАНЦЮГ ПІДПАЛЮВАННЯ") і струмообмежуючий резистор R , зашунтовані нормально розімкнутими контактами кнопки "ПІДПАЛ", з'єднана з розміщеним в КБ електрозапальним пристроєм ЕП – відрізком тонкого мідного дроту, який контактує з пробюю палива. Світіння світлодіода VD свідчить про те, що ланцюг підпалювання не порушено. При натисканні кнопки "ПІДПАЛ" VD і R шунтуються, дріт ЕП розігрівається і згоряє в атмосфері кисню, підпалюючи пробу палива.

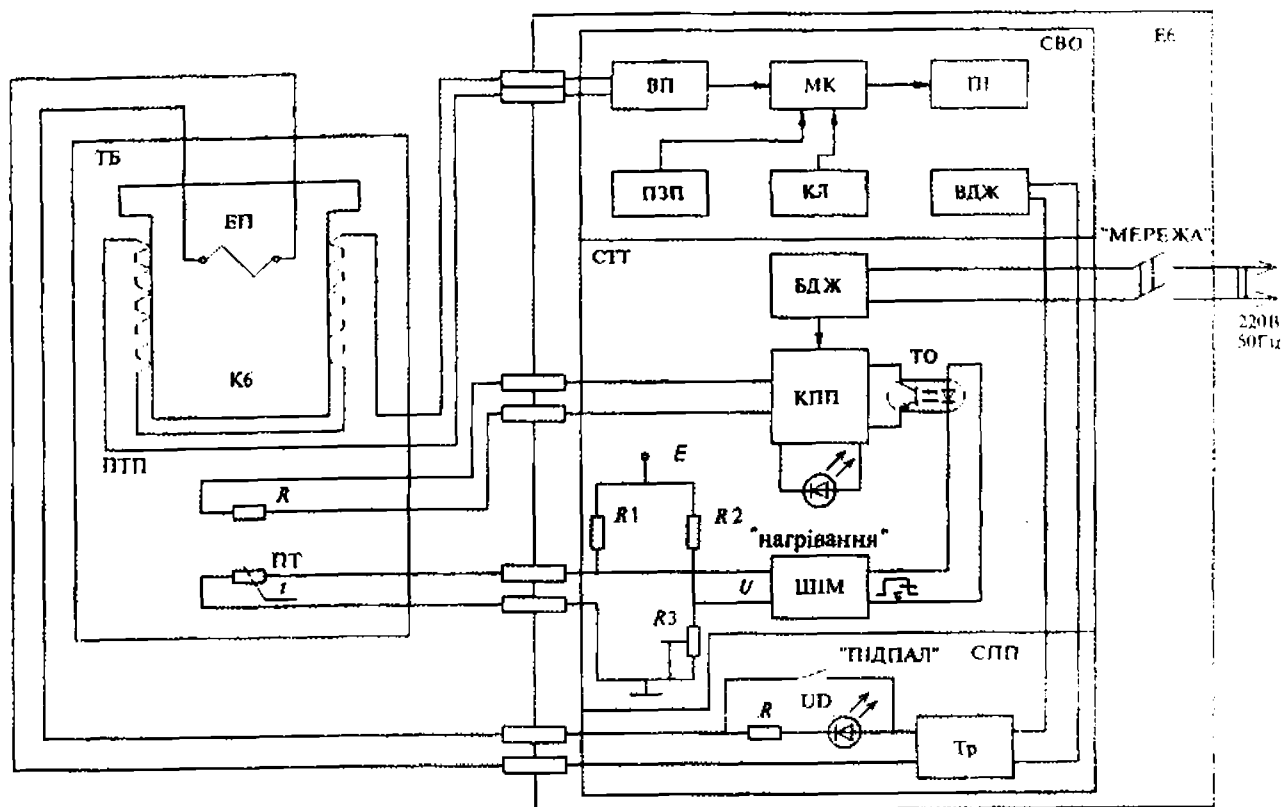


Рис. 3. Функціональна схема КТЗ-1

СВО – це мікроЕОМ, яка складається з однокристалного мікроконтролера МК і зв'язаних з ним вхідного пристрою ВП, клавіатури КЛ, пристрою індикації ПІ та постійного пристрою запам'ятовування ПЗП.

Сигнал ПТП надходить до ВП, де перетворюється в цифровий еквівалент і обробляється в МК інтегральним та балістичним способами за програмами, які зберігаються в ПЗП.

ПІ розміщений на передній панелі БЕ і складається з двох цифрових дисплеїв, побудованих на семисегментних світлодіодних індикаторах: чотирирозрядного, призначеного для індикації часу вимірювання в секундах, і п'ятирозрядного, на якому відображаються поточні значення потужності тепловиділення $W(\tau)$ у ватах і після завершення вимірювального циклу – кількості тепла $Q_{\text{вм}}$ у джоулях, яке виділилося в КБ.

Робота на калориметрі КТЗ-1

Робота на калориметрі КТЗ-1 зводиться до традиційних операцій приготування проби

палива (подрібнення, просіювання, брикетування проби твердого палива, приготування відрізка мідного запального дроту, зважування з похибкою $\pm 0,0002$ г), розміщення проби палива в КБ, заповнення КБ киснем під тиском. Для насичення внутрішнього об'єму КБ водяною парою з метою розчинення азотної і сірчаної кислот, що утворюються при спалюванні проби палива, в КБ наливають 1 мл дистильованої води. Маса проби палива вибирається згідно з рекомендаціями відповідних стандартів так, щоб енергія згоряння проби відповідала діапазону вимірювань приладу.

"Заряджену" пробою палива і киснем КБ встановлюють в калориметричну комірку попередньо розігрітого ТБ. Після відновлення стану теплової рівноваги ТБ, вихід на який контролюється за допомогою п'ятирозрядного цифрового дисплея ПІ (вихід на експериментальний нуль), пробу палива підпалюють. Характер зміни сигналу ПТП в часі показаний на рис.4. До моменту τ_0 відбувається вихід ТБ з розміщеною в його калориметричній комірці КБ на стаціонарний режим. В момент τ_0 оператор натискає кнопку "Підпал" і проба палива

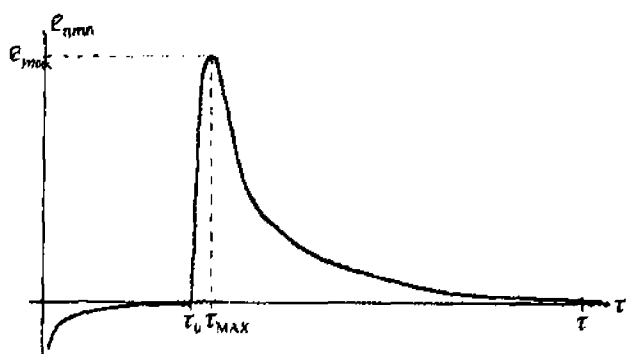


Рис. 4. Характер зміни сигналу ПТП

згоряє. Потужність тепловиділення швидко зростає і через 1,5 – 2 хв. в момент часу τ_{\max} сигнал ПТП досягає максимального значення e_{\max} . Потім потужність тепловиділення і, відповідно, сигнал ПТП поступово зменшуються і в момент часу τ_0 , приблизно через одну годину після підпалювання проби палива, сигнал ПТП не перевищує $0,01 e_{\max}$.

Розрахунок кількості тепла $Q_{\text{вим}}$, що виділилося внаслідок згоряння проби палива, виконується СВО автоматично двома способами: інтегральним і балістичним.

При інтегральному способі

$$Q_{\text{вим}} = \int_{\tau_0}^{\infty} W(\tau) d\tau = \int_{\tau_0}^{\infty} k e(\tau) d\tau \approx (1 + \Delta) k \int_{\tau_0}^{\tau_k} e(\tau) d\tau, [\text{Дж}]$$

де $e(\tau)$ і k – відповідно, сигнал і градувальний коефіцієнт ПТП; $W(\tau)$ – поточне значення потужності тепловиділення; Δ – поправка, яка враховує кінечність реального часу інтегрування сигналу.

При балістичному способі

$$Q_{\text{вим}} = \chi(e_{\max}) [\text{Дж}],$$

де $\chi(e_{\max})$ – функція у вигляді поліному, введена у програму СВО; e_{\max} – максимальне значення сигналу ПТП, зафіксоване після згоряння проби палива.

Результат вимірювання балістичним способом отримують через 3 – 4 хв. після підпалювання проби палива, а інтегральним способом – через 1 год.

Дослідження виду балістичної функції перетворення виконувалися на етапі градування приладу шляхом багаторазового спалювання проб бензойної кислоти масою 0,5 – 1,5 г.

Коефіцієнти поліному $\chi(e_{\max})$ вираховуються за методом найменших квадратів. Нелінійність балістичної функції перетворення у діапазоні вимірювань калориметра (10 – 40 кДж) склала 2 %.

Визначення величини тепловиділення балістичним способом менш точне, оскільки екзотермічні і ендотермічні реакції і фазові перетворення продуктів згоряння по-різному впливають на результат, залежно від вмісту води та інших домішок у пробі палива. Після закінчення випробувань, незалежно від способу вимірювань, на п'ятирозрядному дисплеї БЕ висвічується величина $Q_{\text{вим}}$, а теплоту згоряння аналітичної проби палива в КБ обчислюють за формулою

$$q_a = (Q_{\text{вим}} - q_{\text{др}} \cdot m_{\text{др}} - Q_{\text{ел}}) / m, [\text{Дж/г}],$$

де $q_{\text{др}}$ – питома теплота згоряння запального дроту (довідкові дані); m , $m_{\text{др}}$ – маса, відповідно, спалених проби палива і дроту; $Q_{\text{ел}}$ – теплота електричного підпалювання.

Експериментальні дослідження

Для проведення попереднього градування ТБ був використаний масо-габаритний і тепловий імітатор КБ із вмонтованим електричним нагрівачем в ньому, який живиться від стабілізованого джерела напруги. Величини напруги і струму вимірювали цифровими приладами Щ68003. Тривалість імпульсу електричної потужності, що подавалась на нагрівач, вимірюється електронним таймером Ф4842, а вихідний сигнал ПТП – цифровим вольтметром Щ68002 і реєструється за допомогою ПЕОМ з інтервалом 1 сек.

При цьому похибка вимірювання електричної потужності не перевищувала 0,2 %, а енергії імпульсного вмикання нагрівача – 0,25 %.

Було проведено дві серії експериментів. У першій з них на нагрівач імітатора КБ подавали сталі значення електричної потужності з діапазону від 10 до 60 Вт і після виходу ТБ на стаціонарний режим реєстрували усталене значення сигналу ПТП. За результатами цієї серії дослідів визначили величину коефіцієнта перетворення ПТП по підведеній потужності:

$$K_n = UI / e_{\text{пмп}} [\text{Вт/В}],$$

де $e_{птп}$ – сигнал ПТП в усталеному тепловому режимі; U, I – відповідно, напруга та струм нагрівача імітатора КБ.

У другому випадку енергію на нагрівач подавали у вигляді електричного імпульсу тривалістю від 50 до 300 с. Вихідний сигнал ПТП інтегрували протягом часу від моменту подавання імпульсу до моменту відновлення стаціонарного режиму. За результатами цих дослідів визначили коефіцієнт перетворення ПТП по підведеній енергії :

$$K_E = \frac{\int_0^{\Delta t_{имп}} UI dt}{\int_0^{\infty} e_{птп} dt} = UI \Delta t_{имп} / \sum e_{птп} \Delta t [Дж/(В \cdot с)],$$

де U, I – напруга і сила струму; $\Delta t_{имп}$ – тривалість імпульсу; $e_{птп}$ – поточне значення сигналу ПТП в серії зареєстрованих показань від 1 до n ; $\Delta t = 1$ с – інтервал між послідовними вимірюваннями сигналу ПТП.

Числові значення K_D і K_E у всіх вимірюваннях збіглися з похибкою, не більшою від похибки вимірювання (менше 0,25 %), що свідчить про лінійність перетворення ПТП у всьому динамічному діапазоні та відсутність неврахованих втрат тепла в калориметричній комірці.

Метрологічні характеристики КТЗ-1

Дослідження метрологічних характеристик експериментальних зразків калориметра моделі КТЗ-1 виконано методом безпосереднього зіставлення з компаратором, за який використано сертифіковану бензойну кислоту марки К-2, що є стандартним зразком при вимірюванні питомої теплоти згоряння [4,6]. Границі допустимих основних відносних похибок вимірювання теплоти згоряння на калориметрі КТЗ-1 становили 0,2 і 0,5 %, відповідно, для інтегрального і балістичного способів вимірювання. При цьому оцінки середньоквадратичних основних відносних систематичної і випадкової складових похибки для

інтегрального способу вимірювань, відповідно, дорівнюють, 0,038 % і 0,067 %. Слід зазначити, що в систематичну складову похибки найбільший внесок роблять похибки застосованих зразкових засобів – бензойної кислоти і аналітичних ваг марки ВЛР-20. При балістичному способі вимірювання оцінки систематичної і випадкової складових похибки дорівнюють, відповідно, 0,091 і 0,22 %.

Експериментальні зразки калориметра КТЗ-1 пройшли метрологічну атестацію в Українському центрі стандартизації, метрології і сертифікації (УкрЦСМ) і були допущені до застосування як робочі засоби вимірювання теплоти згоряння палива.

Основні технічні характеристики калориметра КТЗ-1 такі:

- діапазон вимірювання енергії згоряння проби палива – 10–40 кДж;
- границі допустимої основної відносної похибки, – $\pm 0,2$ %;
- індикація результату вимірювань – цифрова;
- повний час, необхідний для підготовки калориметра, проби палива, заправки КБ і проведення вимірювань – не більше чотирьох годин;
- потужність, що споживається від мережі змінного струму напругою 220 В – не більше 500 ВА;
- маса калориметра – не більше 30 кг.

Висновки

Новий калориметр КТЗ-1, на відміну від традиційного водяного калориметра, який імпортується в Україну, зручний в експлуатації, бо не потребує приміщення зі стабільним мікрокліматом, дистильованої води та визначення її маси, участі оператора в процесі вимірювань. Автоматизація процесу вимірювань виключає суб'єктивні похибки.

КТЗ-1 може стати робочим засобом в національній системі контролю за якістю палива.

Л.И. Воробьев, А.В. Гайдучек, Т.Г. Грищенко,
Л.В. Декуша, А.Г. Мазуренко, А.И. Самокиш,
Е.Д. Хаврюченко

НОВЫЙ КАЛОРИМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Рассмотрен прибор, предназначенный для замены традиционного водяного калориметра, который в Украине не производится.

Исследованы принципы работы и характеристики калориметра, в котором проба топлива сжигается при высоком давлении кислородной среды в калориметрической бомбе, расположенной в тепловом блоке калориметра. Теплота сгорания определяется интегрированием теплового потока, который измеряется термоэлектрическим преобразователем теплового потока.

L.Yo. Vorobiev, A.V. Gaiduchek, T.G. Grishchenko,
L.V. Dekusha, O. G. Mazurenko, A.I. Samokish,
P.D. Khavryuchenko

THE NEW CALORIMETER FOR FUEL CALORIFIC POWER MEASUREMENT

The calorimeter automates the measurement of solid and liquid fuel calorific power and complies with applicable standards.

The device consists of two units: a heat unit and an electronic one. Fuel sample prepared in a regular manner is burned in the combustor under constant volume, excess pressure and oxygenation. The bomb is placed in the heat unit. Heat unit temperature is stabilised by the built-in electric heater and in such a manner isoperibol working condition are maintained.

Calorific power is determined by means of integration of the heat flux brought about by fuel sample combustion. Heat flux is measured by a thermal converter.

Промисловість України: путь к энергетической эффективности / Изд. Энергетического центра ЕС. – Киев: 1995. – 199 с.

Андреев А.А., Белосельский Б.С., Криснов М.И. Контроль топлива на электростанциях. – М.: Энергия, 1973. – 384 с.

Калориметр В-08-МА / Сб.: Образцовые средства измерений и поверочные установки / Каталог. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – С.79–80.

ГОСТ 147-95 [ИСО 1928-76] Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 44 с.

5. *Грищенко Т., Декуша Л., Самокиш А., та ін. Калориметр для вимірювання теплоти згорання палива (КТЗ-1) / Експрес-новини: наука, техніка, виробництво. – Київ: УкрІНТБІ, 1996. – № 1-2. С.5.*
6. *ДСТУ 2614-94. Державна повірна схема для засобів вимірювань енергії згорання. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 5 с.*
7. *В.Хеммингер, Г.Хёне. Калориметрия: Теория и практика: пер. с англ. – М.: Химия, 1990. – 176 с.*
8. *Геращенко О.А. Основы теплотри. Киев: Наук. думка, 1971. – 192 с.*
9. *Приборы для теплофизических измерений / Каталог. Киев: Час, 1991. – 56 с.*

Рекомендована Радою КБ "Шторм"
при НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
29 січня 1998 року