[Vessels and high pressure pipelines]. Moscow, Mashinostrojenie, 384 p.

8. Coffin L. F. A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metals / L. F. Coffin // Trans. ASME. – 1954. – Vol. 76. – P. 931–950.

Coffin L. F. (1954). A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metals. Trans. ASME. Vol. 76, pp. 931-950.

Purpose. *Investigation of the thermal state of the eccentric bottom tapping (EBT) lid of the electric arc furnace (EAF) and thermal stress using copper and steel water-cooled elements.*

Methodology*. Mathematical modeling, numerical simulation.*

Findings. *The conditions for replacing copper water-cooled element with less expensive steel one are determined without reducing the performance characteristics, taking into account the temperature dependences of the permissible stress and the carbonate depositions factor on the cooled surface.*

Originality. *The maximum value of the density of heat flux to water in the EBT panel is determined, which constitutes about 600 kW/m^2. The influence of thermal load and thermo-physical characteristics of the pipe material on the value of equivalent thermal stress is established, taking into account the significant influence of carbonate depositions on the heat transfer.*

Practical value. *It is shown that in the operation conditions of EBT panel, the replacement of a copper pipe with steel one is possible with a reduction in the wall thickness from 10 to 6 mm for steel 20K and up to 8 mm for steel 09Г2С (Russian grades) with a thermal stress margin of 1.17–1.20.*

Key words: *electric arc furnace, water-cooled EBT panel, thermal load, thermal stress.*

Рекомендована к публикации
д. т. н. М. В. Губинским

Поступила 17.03.2017

УДК 33.013.6

Наука

Ю. М. Магера
Н. Ю. Павлюк /к. т. н./

ПАТ «КИЇВЕНЕРГО», м. Київ, Україна
Інститут технічної теплофізики національної академії наук України, м. Київ, Україна
e-mail: nonna.ipe@gmail.com

Створення методики експериментального визначення теплоти згоряння твердих побутових відходів

Y. M. Magera
N. Y. Pavlyuk /Cand. Sci. (Tech.)/

PJSC “Kyivenergo”, Kyiv, Ukraine
Institute of engineering thermophysics of Ukraine national academy of sciences, Kyiv, Ukraine
e-mail: nonna.ipe@gmail.com

Creation of method for experimental determining of msw heating value

Мета. *Створення методики для експериментального визначення теплоти згоряння твердих побутових відходів.*

Методика. *Сутність створеної методики полягає в спаленні наважки в лабораторному котлі-утилізаторі та визначенні теплоти, що відповідає згорянню 1 кг ТПВ, в результаті розрахункової обробки показань вимірювальних приладів.*

Результат. *Отримані за допомогою створеної методики для наважки з відомим морфологічним складом значення теплоти згоряння добре кореспондуються з прогнозними значеннями.*

Наукова новизна. *Теплота згоряння за допомогою створеної методики може бути визначена для довільної наважки шляхом її прямого спалювання, в той час як існуючі методики базуються на визначенні вмісту основних компонентів ТПВ і подальшому розрахунку теплоти згоряння ТПВ.*

Практична значущість. *На основі розробки на підприємствах, що спалюють ТПВ, можуть бути створені власні лабораторні установки для визначення теплоти згоряння ТПВ. (Іл. 1. Табл. 2. Бібліогр.: 5 назв.)*

Ключові слова: *тверді побутові відходи, теплота згоряння, модельна наважка, котел-утилізатор, прогнозне значення.*

© Ю. М. Магера, Н. Ю. Павлюк /к. т. н./, 2017 г.

Постановка завдання у загальному вигляді. Одна із серйозних проблем охорони навколишнього середовища – проблема ліквідації (поховання) твердих побутових відходів (ТПВ). Одним з напрямів утилізації ТПВ є їх спалювання. Завдяки істотному вдосконаленню цієї технології в цей час при спалюванні ТПВ в рамках ТЕС вирішується не тільки завдання утилізації, а й виробництва енергоносіїв [1]. Поряд зі спалюванням ТПВ в енергетичних агрегатах набувають поширення технології їх утилізації у високотемпературних теплотехнологічних агрегатах, як у металургійному виробництві.

У праці [2] наведено схему утилізації ТПВ, розроблену фахівцями МИСиС. Сутність розробки полягає в тому, що відходи потрапляють до киплячої шлакової ванни, що продувається повітрям, збагаченим киснем. Додатково в піч подаються вугілля або природний газ. При цьому температурний рівень розплаву шлаку становить 1400–1500 °С, що забезпечує піроліз і газифікацію відходів.

Також відома технологія переробки ТПВ в печах Ванюкова [3]. Її сутність полягає в тому, що у високотемпературному шлаковому розплаві, що барботується, відбувається розкладання робочої маси ТПВ. Температура розплаву становить 1350–1400 °С, а час перебування кожної конкретної порції ТПВ в розплаві складає 2–3 с. При цьому відбувається повний розрив зв'язків у структурі складних органічних сполук, що запобігає появі діоксинів і фуранів. Барботаж здійснюється за рахунок подачі через стаціонарні дуттьові пристрої дуття, збагаченого киснем до рівня 50–70 %. В агрегаті переробляється ТПВ з теплотою згоряння 1500–1800 ккал/кг. Плавка здійснюється автогенно без додавання будь-якого додаткового палива. Шлаки, отримані після переробки ТПВ в шлакових розплавах, безпечні і придатні для промислового і житлового будівництва.

Також відомі технічні рішення з використання ТПВ як додаткового енергоносія для опалення обертових печей випалу вапняку.

Однак для всіх технологій переробки ТПВ, як класичних (в рамках ТЕС на ТПВ), так і з використанням іншого промислового обладнання, теплота згоряння ТПВ є одним з найважливіших параметрів технології їх термічної переробки. Її значення змінюється для різних регіонів, а також протягом року. Залежно від теплоти згоряння ТПВ вирішується питання про необхідність спалювання додаткового палива, вибору технологічних параметрів процесу. Отже, на кожному підприємстві, що утилізує ТПВ, доцільно мати комплекс для визначення їх теплоти згоряння [4; 5].

Аналіз публікацій за темою дослідження. В більшості випадків визначення теплоти згоряння відбувається таким чином: для основних можливих компонентів ТПВ встановлюється теплота згоряння у сухому стані, для конкретної наважки ТПВ експериментально визначається частка кожного компонента, а далі теплота згоряння наважки, що досліджується, розраховується. Відмінність різних методик полягає у дещо різних способах ідентифікації вмісту компонентів ТПВ [4].

На наш погляд, доцільно мати альтернативний метод, який би дозволяв напряму визначити теплоту згоряння ТПВ шляхом спалення відповідної наважки, як це робиться для звичайних твердих палив. Але визначити теплотворну здатність змішаних ТПВ за існуючою затвердженою методикою визначення теплотворної здатності палив у калориметричній бомбі не виявляється можливим. Наважка проби для калориметричної бомби має бути до 5 г, а фракційність – в діапазоні 3–5 мм у той же час ТПВ характеризується наявністю фрагментів різної морфології та дисперсності, а характерні розміри окремих фрагментів можуть сягати кількох десятків міліметрів.

Постановка завдання дослідження. Метою цієї роботи є створення методики визначення теплоти згоряння довільної наважки ТПВ через встановлення кількості теплоти, що виділяється при спалюванні в котлі-калориметрі.

Викладення основних матеріалів. Для визначення теплоти згоряння ТПВ розроблено експериментальний стенд, до складу якого входять:

− котел-калориметр з водоохолоджуваним контуром, обладнаний колосниковою решіткою та системою газового підсвічування;

− пункт підготовки наважки ТПВ заданого морфологічного складу, обладнаний вагами та засобами подрібнення та змішування ТПВ;

− балон зі зрідженим газом (пропан-бутан), обладнаний системою регульованої подачі газу;

− пункт визначення зольності наважки, обладнаний вагами.

Додатково використовуються: калориметр для визначення теплотворної здатності газу та муфельна піч для попереднього просушування наважки.

Основним елементом експериментального стенду є спеціально підготовлений для спалювання ТПВ водогрійний опалювальний котел КСТГ-12,5 номінальною потужністю 12,5 кВт виробництва Мінського заводу (Білорусь), який надає можливість спалювати наважку вагою 5–8 кг заданого морфологічного складу. Загальний вигляд котла показано на рис. 1.

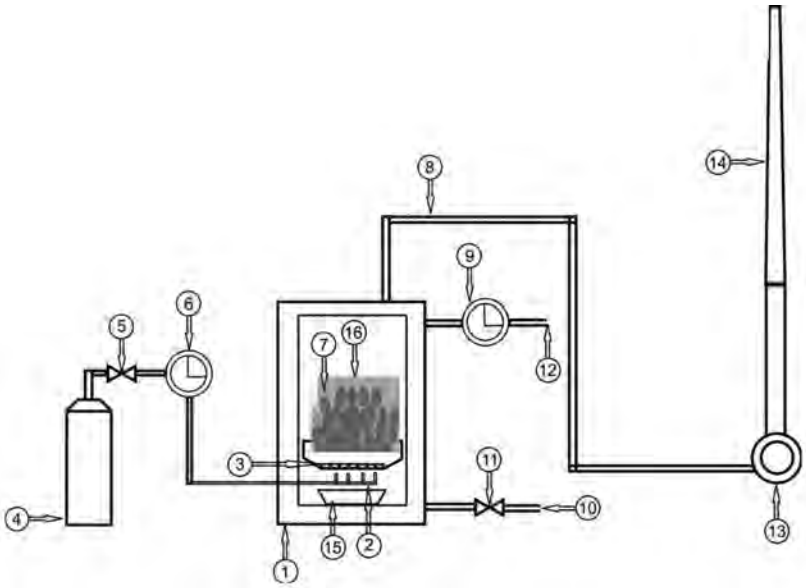

Рис. 1. Технологічна схема пункту спалювання наважки ТПВ:
1 – котел водогрійний; 2 – пальник газовий подовий; 3 – решітка колосникова; 4 – балон з пропан-бутановою сумішшю; 5 – редуктор-регулятор подачі пропан-бутанової суміші; 6 – лічильник газовий мембранний Gross MGM-UA G4; 7 – термопара контролю температури в камері згоряння котла (ТХА-1489) та модуль реєстрації сигналів «Triton 6004TC»; 8 – точка контролю температури, витрати та складу продуктів згоряння; 9 – ультразвуковий лічильник теплоти Sharky 775 DN 20 Qn 2,5; 10 – патрубок подачі води в котел; 11 – регулятор подачі води в котел; 12 – патрубок відводу води з котла; 13 – димосос, шибер – регулятор відхідних газів; 14 – димова труба; 15 – ємність з водою для зволоження наважки ТПВ; 16 – наважка ТПВ

Котел обладнаний подовим пальником (2), який працює без дуттьового вентилятора. Газ (пропан-бутанова суміш) для розпалювання та підсвічування подається з газового балону (4) крізь редуктор-регулятор подачі газу (5) на калібровані сопла газового колектора пальника (2) безпосередньо до шару наважки ТПВ (16).

Вода подається від водопровідної мережі до блоку теплоз'єму котла через патрубок підводу води (10). Відводиться вода від водоохолоджувального контуру котла до системи імітації користувача теплової енергії через патрубок (12). Продукти згоряння відводяться від котла через димосос (13) та димову трубу (14) до атмосфери.

В табл. 1 наведено параметри, що вимірюються в процесі експерименту.

Для перевірки адекватності методики передбачено можливість підготовки модельних наважок із заданим вмістом основних компонентів (харчові відходи, папір та картон, полімери, скло та кераміка, метали, текстиль, деревина, гума та шкіра, залишок відходів після вилучення компонентів). Теплоту згоряння такої наважки можна визначити експериментально на створеному стенді, а можна отримати розрахунковим шляхом [5].

Послідовність підготовки модельної наважки:

– Усі компоненти ТПВ подрібнюються до розміру фракцій не більше 1/20 L (де L – лінійн-

Таблиця 1

Параметри, що вимірюються в процесі експерименту

№ точки	Параметри, що вимірюються
1	Вага наважки ТПВ $P_{ТВП}$, кг
2	Витрата газу B, м^3/год
3	Витрата води G, м^3/год
4	Температура теплоносія на вході $t_{вх}$, °С
5	Температура теплоносія на виході $t_{вых}$, °С
6	Вага зольного залишку $P_{золи,}$ кг
7	Кількість води, що залишилася у ємності з водою, яка розміщена під пальником $P_{води}$, кг
8	Концентрація основних компонентів у продуктах згоряння, %
9	Витрата продуктів згорання, м^3/с
10	Температура продуктів згоряння, °С

ний розмір колосникової решітки топки котла лабораторного стенду).

− Моделюється наважка ТПВ визначеного морфологічного складу.

− Наважка ТПВ підсушується у сушарці (муфельній пічці) до повного видалення незв'язаної вологи з метою забезпечення її контрольованої вологості. Готовність наважки до спалювання визначається шляхом зважування та подальшого підсушування до отримання незмінної ваги.

Після зважування сухої підготовленої наважки, вона обприскується необхідною кількістю води для здобуття визначеної потрібної вологості (у діапазоні до 30 % від заданої вологості). Зволожена наважка завантажується до топки котла і спалюється з підсвічуванням горючим газом або без нього. Додаткова волога вводиться в ємності під колосникову решітку.

При досягненні стабільної температури води на виході охолоджувального контуру котла подача газу відключається. Вважається, що тепловий режим топки котла стабілізовано, і котел готовий до проведення експерименту.

Визначення витрати та температури води охолоджувального контуру котла на вході та виході розпочинається за 5 хвилин після розпалювання незалежно від того, проводили спалювання ТПВ з газом для підсвічування або без нього. Виміри повторюються до початку зниження температури води, що свідчить про закінчення горіння ТПВ.

Після закінчення експерименту зола та негорючі матеріали, що були у складі наважки, охолоджуються, збираються та зважуються. Таким чином визначається недопалена частина наважки.

З метою визначення обсягу механічного недопалу проводиться термічна обробка зольного залишку в муфельній пічці для забезпечення повного вигорання органічних складових зольного залишку.

Вологовміст наважки ТПВ вимірюється як різниця між кількістю доданої штучно води (обприскуванням та у ємності) та залишком води у ємності під колосниковою решіткою, що не випарилась у процесі експерименту.

На основі отриманих результатів розраховується кількість теплоти, що утворюється при згорянні наважки ТПВ (або ТПВ та горючого газу), за формулою:

$$Q_{вид} = (Q_1 + Q_2 + Q^{пари} + Q_3 + Q_5 + Q_6) \cdot \frac{100}{100 - q_4} \quad (1)$$

де Q_1 – кількість теплоти, що сприймається охолоджувальним контуром у процесі експерименту, кДж; Q_2 – втрати теплоти з димовими газами, що відходять від котла, кДж; $Q^{пари}$ – втрати теплоти на випаровування вологи наважки ТПВ, кДж; Q_3 – втрати теплоти з хімічним недопалом, кДж; q_4 – відносні втрати теплоти від механічного недопалу, %; Q_5 – втрати теплоти від охолодження поверхні котла, кДж; Q_6 – втрати теплоти з фізичною теплотою шлаку, кДж.

При використанні газу як палива для підсвічування теплота від його спалювання $Q_г$, яка розраховується з його обсягу, що вимірюється газовим лічильником, з урахуванням теплотворної здатності, віднімається від величини отриманої в експерименті кількості теплоти.

Оціночна теплота згоряння ТПВ розраховується як відношення кількості теплоти, що виділяється при згорянні наважки ТПВ, до ваги наважки ТПВ:

$$Q_{нр}^{ТПВ} = \frac{Q_{вид} - Q_г}{P} \quad (2)$$

де P – вага наважки, кг.

Використання створеної методики. Створену методику протестовано при визначенні теплоти згоряння ТПВ для довільно заданих параметрів модельної наважки (табл. 2).

Загальна кількість теплоти, що виділилася від згоряння ТПВ, становить 21263 кДж. Вста-

Таблиця 2

Модельна наважка ТПВ

№ з/п	Найменування компонента ТПВ	Моделювання компонентів наважки ТПВ	Вага сухої наважки ТПВ, кг
1	Харчові відходи	Картопля	1
2	Папір та картон	Шматки офісного паперу, періодичних газет, картону	0,3
3	Полімери (пластик, пластмаси)	ПЕТ пляшки, одноразові поліетиленові пакети	0,3
4	Скло та кераміка	Скло скляних пляшок, черепки керамічних виробів	0,3
5	Метали	Дріт сталевий	0,05
6	Текстиль	Бавовняне та шерстяне ганчір'я	0,06
7	Деревина	Гілки дерев (верба, тополя), соснові тріски	0,03
8	Гума та шкіра	Обрізки шкіряних виробів (взуття, паски, гаманці, сумки)	0,02
9	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів	Дрібне будівельне сміття, каміння	0,13
10	Разом		2,2

новлена теплотворна здатність ТПВ становить 4253 кДж/кг. Зольність ТПВ складає 32,9 %. Отримані результати достатньою мірою співвідносяться з даними праці [5] та прогнозною розрахунковою мінімальною теплотою згоряння для умов дослідження 4427 кДж/кг.

Висновки. Розроблено методологію та визначено технічні засоби проведення експериментальних досліджень з визначення кількості теплоти, що виділяється при спалюванні довільних наважок твердих побутових відходів.

На етапі попереднього тестування показано достатній рівень збіжності експериментальних та розрахункових значень теплоти згоряння для одного варіанта складу ТПВ.

Розроблена методика може бути використана на підприємствах, де є утилізація побутових відходів, для оптимізації технологічних процесів.

Бібліографічний список / References

1. Тугов А. Н. Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС на ТБО: автореф. дис. … д-ра техн. наук / А. Н. Тугов. – Москва, 2012. – 43 с.

Tugov A. N. *Issledovanie protsessov i tekhnologiy energeticheskoy utilizatsii bytovykh otkhodov dlya razrabotki otechestvennoy TES na TBO*. Dr. dis. Moscow, 2012, 43 p.

2. Переработка бытовых отходов в металлургических агрегатах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://emchezgia.ru/ekologiya/18_Pererabotka_bytovykh_otkhodov.php

Pererabotka bytovykh otkhodov v metallurgicheskikh agregatakh. Available at: http://emchezgia.ru/ekologiya/18_Pererabotka_bytovykh_otkhodov.php

3. Сжигание отходов (ТБО) в слое шлакового расплава [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ztbo.ru/o-tbo/lit/texnologii-otxodov/szhiganie-otxodov-tbo-v-sloe-shlakovogo-rasplava.

Szhiganie otkhodov (TBO) v sloe shlakovogo rasplava. Available at: http://ztbo.ru/o-tbo/lit/texnologii-otxodov/szhiganie-otxodov-tbo-v-sloe-shlakovogo-rasplava.

4. Ильиных Г.В. Оценка теплотехнических свойств твердых бытовых отходов исходя из их морфологического состава / Г. В. Ильиных // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2013. – №3. – С. 125–136.

Il'inykh G. V. *Otsenka teplotekhnicheskikh svoystv tverdykh bytovykh otkhodov iskhodya iz ikh morfologicheskogo sostava*. Vestnik PNIPU. Urbanistika. 2013, no. 3, pp. 125-136.

5. Серикбаев Н. С. Элементарный состав и низшая теплота сгорания ТБО г. Астана и продуктов его переработки методом пиролиза / Н. С. Серикбаев, А. К. Махамбетова, С. Т. Жакупаева // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. – 2013. – № 6. – С. 228–232.

Serikbaev N. S., Makhambetova A. K., Zhakupaeva S. T. *Elementarnyy sostav i nizshaya teplota sgoraniya TBO g. Astana i produktov ego pererabotki metodom piroliza.* Vestnik ENU im. L.N. Gumileva, 2013, no. 6, pp. 228-232.

Purpose. *Creation of method for experimental determining of municipal solid wastes (MSW) heating value.*

Methodology. *The proposed method bases on burning down MSW pile in laboratory boiler-utilizer and finding heat corresponding to burning of MSW 1 kg by calculation processing of measuring gauges data.*

Findings. *Results obtained with the created method for the pile with known morphological state correspond well with predicted values.*

Originality. *The scientific novelty of the method is presented by its ability for determining of arbitrary MSW pile heating value on its direct burning down while other methods assume determining of MSW components yield and further calculation of heating value.*

Practical value. *The practical importance of development is that with its use at enterprises that burn down MSW laboratory sets for MSW heating value determining can be created.*

Key words*: municipal solid wastes, heating value, model pile, boiler-utilizer, predicted value.*

Рекомендована к публикации д. т. н. М. В. Губинским

Поступила 30.03.2017

Metallurgical and Mining Industry

www.metaljournal.com.ua