



УДК 62-665.3

APPLICATION OF SOLID WASTE IN THE ENERGY INDUSTRY

ЗАСТОСУВАННЯ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Sklyarenko E.V. / Скляренко Є.В.

Ph.d. / к.т.н.

ORCID : 0000-0003-3952-6520

Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й

d.s., s.s. / д.т.н., с.н.с.

ORCID : 0000-0001-7958-6996

SPIN: 6154-2069

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, M. Kapnist Str., Kyiv
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. М. Капніст, 2а, Київ

Анотація. В роботі розглянуто стан і тенденції розвитку технологій утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) та світовий досвід використання їх енергетичного потенціалу в енергетичних установках. Відмічено три основні методи енергетичного використання ТПВ: збагачення відходів із виробництвом паливних брикетів; газифікація ТПВ на різних стадіях їх переробки; пряме спалювання непідготовлених, або частково збагачених відходів в енергетичних установках. Зазначено, що ефективність застосованих технологій і установок для їх реалізації, в значній мір, залежить від морфологічного складу ТПВ і точності визначення їх теплотехнічних характеристик, зокрема, їх теплоти згоряння. Для підвищення релевантності результатів вимірювання запропоновано низку послідовних дій відбору досліджуваних проб для експериментального дослідження теплоти згоряння в бомбовому квазідиференціальному калориметрі теплового потоку.

Ключові слова: побутові відходи, утилізація, енергетика, калориметрія.

Вступ.

В умовах дефіциту традиційних вуглеводневих палив і постійного їх подорожчання енергозбереження стає пріоритетною задачею функціонування паливно-енергетичного комплексу країни і дієвим шляхом зниження техногенного впливу на навколишнє середовище.

Дієвим шляхом вирішення даної задачі є широке застосування в паливному балансі країни відновлюваних джерел енергії, де тверді побутові і промислові відходи (ТПВ) органічного походження займають пріоритетне місце. Це пов'язано із значними об'ємами утворення і необхідністю обов'язкового їх знешкодження та захоронення. Схема поводження з відходами в кожній країні визначається як власними факторами (наявність вільних земель під полігони для захоронення, стан економіки, щільність населення, об'єми, умови утворення і збирання відходів і ін.), так і міжнародними зобов'язаннями. Наприклад, для України, таким «дороговказом» є Угода про асоціацію з ЄС і розроблена на її основі «Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 р» [1]. Орієнтуючись на передовий світовий досвід, прийняті зобов'язання стимулюють до впровадження найбільш ефективні технології утилізації ТПВ, якіносять мінімальну екологічну шкоду довкіллю, мають низькі капітальні витрати та дозволяють отримати прибуток. Це робить вирішення зазначеної проблеми, доволі актуальною науковою та практичною задачею.



Метою даної роботи є оцінка енергетичного потенціалу твердих побутових відходів і вибір методів ефективної їх утилізації.

Ресурси твердих побутових відходів. Тверді побутові відходи – це відходи, які утворюються в процесі життєдіяльності людини, є непридатними до подальшого використання, а потребують знешкодження та захоронення.

Для оцінки енергетичних ресурсів ТПВ і правильного вибору методів їх утилізації необхідно досить достовірно знати реальну кількість і орієнтовні дані їх утворення в перспективі. Аналіз літературних даних по окремих країнам світу, щодо таких ресурсів, носить досить суперечливий характер. Наприклад, в таблиці 1 приведено дані по кількості твердих побутових відходів на душу населення ряду країн, в період 1974-1980рр,

Як видно з даних таблиці 1, діапазон об'ємів утворення ТПВ, навіть для окремої країни, коливається в широких межах, що може бути обумовлено, зокрема, різною методикою визначення їх об'ємів (кількість і вид застосованого транспорту, питома щільність відходів, загальний тоннаж перевезення і ін.).

Таблиця 1 - Орієнтовні ресурси ТПВ на душу населення (1974- 1980 рр.)

Країна, місто	Джерело	Кількість, кг/рік
США	[2]	800
" -	[3]	370
" -	[4]	560
ФРГ	[2]	500
Швейцарія	[2]	350
Італія	[5]	270
Великобританія	[6]	400
Швеція	[6]	300
Росія, Москва	[6]	300
Казань, Краснодар	[5]	180 -240
Україна, Київ	[7]	300

Морфологічний склад і теплотехнічні характеристики ТПВ. Мала прогнозованість реальних об'ємів ТПВ, також залежить від економічного розвитку країни, умов і життєвого рівня населення, пори року, погодних умов та інших факторів їх утворення та збору. Наприклад, в таблиці 2 наведено діапазони зміни морфологічного складу ТПВ в ряді країн, впродовж 10 років (1970 – 1980рр) [4,6,8,9].

Проблема ускладнюється ще й тим, що не тільки кількісні, але й якісні характеристики ТПВ не є сталими, а постійно змінюються. Наприклад, в таблиці 3 приведено дані заводу «Енергія» (м. Київ) зміни морфологічного складу ТПВ і їх теплоти згоряння, в період 1988 – 1996 рр.

За даними ж Шостого національного повідомлення з питань зміни клімату [10], діапазони коливань морфологічного складу ТПВ в Україні є такими: харчові відходи — від 35 до 50%, папір та картон — від 10 до 15%, вторинні полімери (пластмаса, ПЕТФ пляшки, полімерна плівка, Тетра Пак упаковка) —



від 9 до 13%, скло — від 8 до 10%, чорні та кольорові метали — 2%, текстильні матеріали — від 4 до 6%, деревина — 1%, будівельне сміття — 5%, інші відходи (листя, гігієнічні засоби, кістки, шкіра, гума, комбіновані відходи, небезпечні відходи тощо) — 10%. Частка відходів з органічною складовою — від 60 до 85%

Таблиця 2 - Приблизний склад твердих міських відходів (%)

Складові ТПВ	Країни*				
	1	2	3	4	5
Папір і паперові вироби	37,6-68	30-42	20-30	28-45	34-37
Деревина	2-4	До 6	-	2-7	2-3
Текстиль	2-4	2-3	1-2	2-4	2-3
Шкіра, гума	0,5-3	До 6	2	До 4	1-3
Скло	3	3	-	-	3-5
Метал	7-10	5-9	3-5	-	3-5
Харчові відходи	9-40	15-35	15-25	15-25	30-36
Інші відходи	5-7	5-14	До 25	16-21	1-5

*: 1 - США; 2 – Великобританія; 3 – Франція; 4 – ФРГ; 5 - Росія, м.Москва

Таблиця 3 - Морфологічний склад усереднених річних показників ТПВ (в %/тонна) в м. Києві

Склад відходів	Проектні показники	1988 р.	1989 р.	1996 р.
Текстиль	3,9	7,21	4,1	2 - 3
Деревина	1,7	3,7	1,3	1 - 2
Гума	4,4	4,41	4,0	4,0
Харчові відходи	37,2	33,0	36,7	20,0
Папір	22,0	22,0	24,3	15 - 20
Метали	4,3	4,0	3,7	10 - 15
Пісок (дворовий змет)	12,8	9,17	14,1	10
Скlobій	5,2	4,8	3,2	15 - 20
Пластик	3,2	2,8	4,5	2 – 5
Атмосферні опади	-	-	-	5 – 15
Вологість ТПВ після видалення води через дренаж бункеру	41,9	39,28	38,7	30 – 50
Нижча теплота згоряння робочої маси, МДж/кг	3,35– 10,05	5,15	5,07	3,35 – 6,7

Широкий діапазон морфологічного стану ТПВ, цілком закономірно, призводить до різної оцінки складу горючої маси, теплоти згоряння і їх енергетичних можливостей. Типовий склад горючих компонентів міських відходів низки країн приведений в таблиці 4 [11].


Таблиця 4 - Елементарний склад ТПВ на горючу масу ряду міст і країн*

Елемент	Елементарний склад ТПВ, %						
	1	2	3	4	5	6	7
Вуглець	53,24	58,58	58,15	49,26	53,64	50,36	51,94
Водень	6,65	5,56	6,2	6,36	5,74	6,6	6,65
Кисень	39,10	34,43	33,69	43,66	39,68	41,31	39,4
Азот	0,74	0,87	1,4	0,46	0,67	1,43	1,63
Сірка	0,27	0,56	0,56	0,26	0,47	0,31	0,38
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	20,0	21,9	21,7	19,2	19,7	19,35	20,2

*: 1 – США; 2 – Англія; 3 – Японія; 4 – Швеція; 5 – Швейцарія; 6 – Москва; 7 – Харків.

Аналіз літературних джерел [4,6,7,10,11] дає середню теплоту згоряння ТПВ на рівні 5, 5 – 11 МДж/кг, при вологості 35 – 20% .

При цьому, необхідно відзначити світову тенденцію зміни морфологічного стану ТПВ в напрямку збільшення кількості пластмас і відповідному підвищенні теплоти згоряння таких відходів.

Разом з тим, теплота згоряння суттєво залежить від вологості і зольності ТПВ, а також від попередньої їх обробки (повітряна і магнітна сепарація, грохочення та сушка). Наприклад, в таблиці 5 [4] приведено дані зміни теплоти згоряння ТПВ в процесі їх сушки.

Таблиця 5 - Зміна теплоти згоряння ТПВ при їх збагаченні

Паливо отримане з ТПВ	Волога, %	Теплота згоряння МДж/кг	
		До сушки	Після сушки
До збагачення	22,5	12,11	15,63
Після збагачення	16,3	15,54	18,57

Методи утилізації ТПВ.

Перші технічні рішення по утилізації ТПВ були пов'язані з проблемою їх захоронення, де основною ціллю було зменшення екологічної шкоди на довкілля при мінімальних витратах на їх захоронення. Тому, найбільш гостро проблеми з ТПВ, в першу чергу вирішувалися в країнах з обмеженими територіальними можливостями і відносно великою щільністю міського населення (Японія, Швеція, ФРГ, Австрія, Данія, Люксембург).

Наступні ж рішення, вже пов'язувалися з економікою переробки ТПВ, шляхом комплексного видалення вторинних ресурсів, а також частковим використанням органіки відходів для генерації тепла і електроенергії (Японія, Великобританія, Франція, ФРГ, США і ін.)

На сьогодні основними методами утилізації ТПВ є:

- повторне використання складових ТПВ, чи їх переробка з отриманням нових корисних продуктів і палив;
- термохімічна конверсія (спалювання, газифікація, піроліз), та інші методи утилізації (біологічні, хімічні, фізико-хімічні і ін.);



- захоронення на полігонах.

В зарубіжних країнах, при вирішенні проблеми управління відходами, чітко взяли курс від звалищ до сміттєпереробних заводів, оскільки полігонне складування сміття, потребуючи значних територій, призводить до погіршення ландшафту, забруднення ґрунту, поверхневих і ґрунтових вод та атмосфери.

Враховуючи недоліки полігонного захоронення ТПВ, а також дефіцит і постійне зростання цін на традиційні викопні палива, найбільш оптимальним методом утилізації ТПВ є комплексний підхід, що передбачає роздільний збір, сортування ТПВ та наступну термохімічну конверсію (переробку) лише тих відходів, які не можуть бути ефективно перероблені іншими методами.

За цією технологією, в країнах ЄС і в низці інших провідних країнах світу, обробляється основна маса ТПВ, а до 30% спалюється з генерацією теплової та електричної енергії. Наприклад, в Японії, взагалі спалюють більше 80% міського сміття, де 25 -30% спалюється з генерацією енергії і лише до 3% захоронюють, або використовують як добриво[12],

В Україні ж, за даними наведеними в [10], при щорічних обсягах збирання ТПВ в межах 11—12 млн. т., лише до 6% переробляється і утилізується, а всього до 2% спалюється з генерацією теплової та електричної енергії.

Тобто, основна маса ТПВ в Україні вивозиться на спеціально обладнані чи стихійні звалища, а це потребує значних земельних площ і транспортних витрат. Поряд з цим, екологічний і санітарний стан цих полігонів призводить до суттєвого забруднення довкілля.

Методи використання ТПВ в енергетиці.

Аналіз літературних джерел, вказує на три основні методи енергетичного використання ТПВ :

- збагачення відходів із виробництвом паливних брикетів та наступним їх спалюванням в спеціальних установках, або в суміші з вугіллям на існуючих ТЕС чи ТЕЦ;
- газифікація ТПВ на різних стадіях їх переробки і наступним використанням отриманих горючих компонентів в котлах існуючих енергетичних установок;
- пряме спалювання непідготовлених, або частково збагачених відходів в енергетичних установках, спеціально створених для їх утилізації.

Збагачення і виробництво паливних брикетів. На сьогодні, практично вирішена задача створення спеціальних технологій і енергетичних установок для утилізації ТПВ та отримані дані по ефективній заміні традиційних палив міськими відходами з різним ступенем їх підготовки до спалювання.

Організація спеціальних виробництв для отримання паливних брикетів чи гранул викликана, в першу чергу, організаційними міркуваннями безпосереднього їх використання в енергетичних цілях (при наявності кількох споживачів цих продуктів), а також необхідністю використання ТПВ в існуючих ТЕС і ТЕЦ які працюють на твердому паливі. Так, переробка у Великобританії ТПВ в паливні брикети дозволила поставляти їх на існуючі електростанції і котельні як паливо, за ціною 60 -70% від вартості природного газу [13].



Гранулювання ТПВ з попереднім відділенням негорючих і металевих матеріалів дозволяє суттєво підвищити теплоту згоряння такого палива (до 14 – 21 МДж/кг), що дає можливість його використовувати, в суміші з традиційним твердим паливом на існуючих ТЕС. Так, в США є досвід спалювання брикетів в суміші (1:5) з вугіллям [14], а у Великобританії в суміші 1:1 [15], при забезпеченні високої ефективності перетворення теплоти в роботу (ККД ТЕС-36%, ССУ – 15 - 20%). Поряд з цим спостерігається і зменшення кількості сірчаного газу та інших шкідливих компонентів в димових газах.

До переваг гранульованих палив необхідно віднести і відносно рівномірний, впродовж року, їх склад та теплотехнічні характеристики, а також універсальність використання в різних енергетичних установках.

Газифікація твердих відходів.

Присутність в ТПВ пластиків і збільшення їх кількості, викликає проблеми, що пов'язані з корозією і підвищенням токсичності продуктів згоряння.

Можливість нівелювання цих проблем вбачається в застосуванні процесів термохімічної конверсії ТПВ (піролізу та газифікації).

Піроліз - процес переробки відходів шляхом їх термічної деструкції при відсутності окисника. Продуктами піролізу є тверді, рідкі і газоподібні види палива із зменшеним вмістом токсичних і корозійних компонентів. При цьому, в силу більш повної переробки відходів, утворюється значно менша кількість шлаку.

Дослідження і відпрацювання процесів піролізу твердих відходів ведуться на протязі більше ніж 100 років. Проте, лише в останні десятиліття в провідних країнах світу, піролізні технології отримали належний розвиток [4,5,16]. Наприклад, в США було опрацьовано ряд технологічних процесів і створено установки для переробки твердих міських відходів.

Так, по технології Andco Torrax [4] ТПВ переробляються без попереднього сортування і подрібнення (за виключенням предметів більше одного метра). При цьому, органічні компоненти відходів піддаються термічній деструкції з утворенням горючих летких компонентів і вуглистою залишку. Негорюча ж частина відходів плавиться (при температурі 1200°C і вище) з утворенням скловидного шлаку, що видаляється з апарату у вигляді розплаву. Тепло необхідне для ведення процесу забезпечується за рахунок часткового спалювання вуглистою коксового залишку, в потоці попередньо підігрітого (приблизно до 1000°C) повітря. Рідкий шлак безперервно виводиться з апарату через гідравлічний затвор в накопичувач, де охолоджується. Склад і характеристики горючого газу, в значній мірі, залежить від складу вихідних відходів. Його основними компонентами є монооксид і діоксид вуглецю, конденсовані і газоподібні вуглеводні, водень, азот, водяна пара і ін. Теплота згоряння таких газів зазвичай коливається в межах 4,7 – 6,7 МДж/нм³.

Дефіцит рідкого палива для енергетики і транспорту визвав необхідність в створенні технологій переробки твердих міських відходів з отриманням рідкого палива. Одну з таких технологій розробила фірма Occidental Reserch (США). Технологія передбачала, видалення металів і скла з відходів, та перетворення



подрібненої (менше 1200 мкм) і висушеної органічної частини, шляхом ступінчатого випаровування в процесі піролізу, в рідке паливо. Тепло для процесу забезпечувалося нагрітими частинками золи (як твердий теплоносії). Процес протікав при температурі 510°C за відсутності повітря, кисню, водню і каталізатору. На виході утворюється чотири продукти: паливна рідина, горючий газ, вода і коксовий залишок. Твердий коксовий залишок відділяється від золи і спалюється в окремому котлі, а частина золи з температурою біля 760°C повертається в реактор. Вихід і склад продуктів піролізу, в значній мірі, залежить від температури та часу перебування в реакційній зоні.

З використанням даної технології, були збудовані напівпромислова установка продуктивністю 3,6т/добу і завод 181т/добу [4]. Проте, на заводській установці проектні показники не були досягнуті, по причині широкого діапазону зміни морфологічного складу ТПВ.

По цій же причині, в літературі також відзначається, складність масштабування процесу від лабораторної до промислової установки і в інших країнах, оскільки для ефективної роботи таких установок бажано щоб сировина була однорідною і по можливості передбачуваного складу.

Тому сьогодні, в більшості випадків, піроліз використовується як частина загального процесу термохімічної переробки ТПВ (газифікації) і наступним спалюванням горючого газу та коксового залишку в існуючій енергетичній установці, як наприклад, в технології компанії Lockheed Electronics (США), де піроліз ТПВ здійснюють при температурі 650°C, а допалювання продуктів піролізу – при 980 - 1090°C [16].

Газифікація твердих відходів

В зв'язку з тенденцією підвищення початкових параметрів теплоенергетичних процесів, а також проблем з традиційним паливом (дефіцит, постійне зростання ціни та зниження його якості), повсюдно зріс інтерес до прямого енергетичного використання ТПВ в теплоенергетиці. В цьому плані, інтенсивно ведуться роботи по пошуку найбільш ефективних рішень організації цих процесів і можливості використання отриманих палив в існуючих енергетичних установках різного профіля (ГТУ, ПТУ, ДВЗ). Зокрема, для ГТУ і ДВЗ такі проекти передбачають отримання досить «чистого» силового газу, що передбачається оберненими процесами газифікації міських відходів.

Суть процесу газифікації полягає в проведенні сукупності високотемпературних теплотехнічних процесів направлених на перетворення органічної частини твердого палива при його взаємодії з вільним чи зв'язаним (у вигляді H₂O, CO₂) киснем в горючий газ. Наприклад, за технологією компанії Lockheed Electronics (США) при температурі 790°C, отримується газоподібне паливо з високим вмістом метану, метанолу, аміаку і іншої цінної хімічної сировини [4].

Газифікація палива проходить в спеціальних апаратах – газогенераторах, де реалізуються термохімічні процеси, що базуються на двох найбільш суттєвих технологічних параметрах – швидкості газового потоку (шарові та поточні) і температурі (низько – та високотемпературні).



Конструкція газогенераторів визначається видом вихідного палива, окисником, принципом організації технологічного процесу (в щільному, зваженому чи киплячому шарі палива), температурою і тиском процесу, ступенем механізації процесів завантаження палива та видалення шлаку.

Пряме спалювання ТПВ.

Процеси прямого спалювання ТПВ є найбільш поширеними в промисловості і досить детально висвітлені в літературі. Хоча, тільки в кінці XIX ст. в Європі почали спалювати ТПВ в спеціальних пристроях – сміттєспалювальних установках (ССУ), що було викликано значними труднощами організації процесу, в силу поліфракційності відходів та широкого і нестабільного їх морфологічного складу, а також зміни їх теплотехнічних характеристик у часі. Все це потребує застосування, не тільки спеціальної техніки і технологій спалювання, але й відповідної підготовки палива для покращення теплотехнічних характеристик. З тим, в кінці XX ст. (по даним 1992р.) в Данії і Швейцарії вже спалювалось 80% сміття, в Швеції – 60, в Нідерландах – 40, в ФРГ – 35, в Італії – 20, в Австрії 12 – 15% [17].

Серед відомих технічних рішень прямого спалювання ТПВ, найбільшого поширення набули наступні схеми їх утилізації:

- без попередньої обробки ;
- з частковим збагаченням (сортування, підсушка);
- з попередньою підготовкою (подрібнення чи гранулювання відходів).

Вибір схеми, в значній мірі є визначальним для застосування тої чи іншої технології спалювання і вибору необхідного обладнання. Найбільшого поширення набули шарові процеси, які не потребують особливих витрат на переробку ТПВ і забезпечують достатній час їх перебування в високотемпературній зоні, що є важливим для знешкодження шкідливих компонентів, зокрема, знешкодження діоксинів.

Менш поширеними є процеси спалювання ТПВ в пиловидному стані та киплячому шарі, оскільки вони потребують глибокої сушки і суттєвого подрібнення ТПВ.

Найбільш поширеними технологіями є їх термічне знешкодження (пряме спалювання), при застосуванні спеціального енергетичного обладнання.

Зазвичай, при утилізації ТПВ в цих установках, воно розглядається як низькосортне паливо. Від його теплоти згоряння в значній мірі залежить ефективність процесу спалювання і застосовуваного обладнання.

Наприклад, в Україні при відсутності якої-небудь обробки ТПВ перед спалюванням. їх теплота згоряння становить, в середньому 4,2 – 5 МДж/кг. Це при тому, що проектним паливом для сміттєспалювальних котлів ЧКД «Дукла» є ТПВ з теплотою згоряння 9,6-10 МДж/кг. Це суттєво впливає як на економічні, так і екологічні показники переробки сміття. Так, наприклад, на Київському сміттєспалювальному заводі «Енергія», внаслідок використання непроектного палива, його потужність зменшена майже в 2 рази, а екологічна складова потребує особливої уваги і зусиль для зменшення її впливу на довкілля. А наявність хлору, фтору і сіркових компонентів в ТПВ потребує застосування спеціальних методів захисту теплообмінної апаратури від корозії.



Економічна ж ефективність прямого спалювання ТПВ в топках котлів може бути порівняна з процесом, що передбачає використання паливних брикетів, оскільки при відсутності витрат на брикетування, потребує спеціальних заходів по підготовці відходів і захисту обладнання від корозії, що зменшують ефективність використання тепла прямого спалювання. Тим не менш, враховуючи тенденцію постійного зростання теплоти згоряння ТПВ, можна прогнозувати, що міські відходи можуть бути альтернативним енергетичним паливом, особливо для густонаселених регіонів.

Контроль теплотехнічних характеристик відходів.

Ефективність використання такого палива і застосовуваного енергетичного обладнання, в значній мірі, залежить від його якості - його теплоти згоряння, що потребує, для отримання достатньо достовірних даних, проведення представницьких комплексних досліджень по складу і теплотехнічним характеристикам.

Вхідний контроль теплоти згоряння є обов'язковою процедурою на ТЕС, ТЕЦ, крупних опалювальних котельнях та енергетичних установках, які споживають значні об'єми органічного палива.

Часто в ході промислової утилізації ТПВ є потреба у визначенні орієнтовних значень їх теплоти згоряння. Для цього застосовують експрес методи аналітичного спрямування, з використанням емпіричних формул, які дещо нівелюють проблеми викликані морфологічним складом відходів. Так, ряд методик визначення теплоти згоряння, базується на основі лише даних технічного аналізу (вмісту вологи, золи, виходу коксу та летких продуктів в перерахунку на горючу масу палива) [18].

Перевагою таких методик є спрощення та скорочення експериментальних досліджень і отримання усереднених показників теплотехнічних характеристик відходів, без застосування вартісного високотехнологічного обладнання.

Але як показують результати розрахунків теплоти згоряння ТПВ такими методиками, їх значення є значно заниженими, що можна віднести, як на недостатню точність проведення технічного аналізу і визначення нижчої теплоти згоряння на суху масу, так і на недостатню визначеність реального морфологічного складу відходів.

В більшості випадків, теплоту згоряння ТПВ певного морфологічного складу та вологості даного регіону, визначають як суму теплоти згоряння горючих компонентів з ваговими коефіцієнтами пропорційними часткам цих компонентів у суміші [19]. Теплоту ж згоряння кожного з компонентів визначають, або за результатами окремих експериментів, або за літературними даними, з врахуванням морфологічного складу та вологості ТПВ даного населеного пункту і їх залежності від пори року та зміни з плином часу.

В переважній більшості експериментальні дослідження теплоти згоряння палив, базуються на калориметричних методах, які регламентуються відповідними стандартами. Послідовність дій з підготовки проб для проведення калориметричних вимірювань теплотехнічних характеристик ТПВ приведено в таблиці 6.



Експериментальні методи є більш точними методами, навіть не дивлячись на складність експерименту і значного впливу неоднорідності і змінності морфологічного складу ТПВ на його проведення.

Таблиця 6 - Послідовність дій з підготовки проб та калориметричних вимірювань ТПВ

№ з/п	Дії з підготовки проб та вимірювань	Нормативні документи
1	Відбір точкових проб палива з відходів	EN 15442:2011 EN ISO 21645:2021
2	Формування та перемішування об'єднаної проби	
3	Подрібнення проби за допомогою різних типів дробарок	
4	Зменшення проби за допомогою пристроїв-дільників або квартуванням	EN 15443:2011 EN ISO 21646:2022
5	Розмелювання проби до розміру частинок менше за 1 мм	
6	Кондиціювання аналітичної проби до повітряно-сухої вологості	
7	Вимірювання вологості методом сушіння	ДСТУ CEN/TS 15414-1:2021
8	Вимірювання зольності	EN 15403:2011 EN ISO 21656:2021
9	Вимірювання теплоти згоряння в калориметричній бомбі	EN 15400:2011 EN ISO 21654:2021
10	Оброблення результатів вимірювань	За відповідними стандартами

Зокрема, вимірювання теплоти згоряння у бомбових калориметрах ускладнюється тим, що маса проби палива, яка спалюється у бомбі під час вимірювань, складає приблизно 1 г. Для отримання ж релевантного результату вимірювань необхідно забезпечити властивості аналітичної проби такими, що відповідають усередненим значенням властивостей вихідної партії палива.

Навіть паливо, що виготовлене з ТПВ, яке є більш однорідним ніж необроблені відходи, також потребує проведення деяких заходів для отримання представницької аналітичної проби. Стандарт EN15442[20] регламентує відбір проб з партій палива, причому об'єднана проба складається з 24 точкових проб, відібраних з різних міст транспортного засобу, штабелю або з потоку палива. Мінімальні розміри точкових та об'єднаної проби визначаються в залежності від розмірів частинок палива, насипної густини та розмірів об'єкту, з якого відбирається проба.

Методи підготовки лабораторної проби розглянуті у EN 15443 [21]. Головною метою підготовки проби є її скорочення до однієї чи більше досліджуваних частин, які переважно менше, ніж вихідна проба. Головний принцип скорочення проби в тому, що склад відібраної проби не може бути



змінений у ході кожної стадії пробопідготовки. Кожна скорочена проба має характеризувати вихідну пробу. Для досягнення цієї мети кожна частка проби повинна мати рівну ймовірність потрапити до частини проби, що зберігається після зменшення маси під час скорочення. Подрібнення проби проводять за допомогою різних типів млинів та дробарок, а зменшення проби за допомогою пристроїв-дільників або вручну методом квартування. Розмір частинок палива для визначення теплоти згоряння повинен бути менше за 1 мм.

Для експериментального визначення теплоти згоряння різних палив в ІТТФ НАНУ створено низку калориметричних приладів [22]. На рис. 1 представлено вимірювальний комплекс, на базі бомбового квазидиференціального калориметра теплового потоку (КТС-4). До його складу входять: тепловий блок (1), електронно – обчислювальний блок (2), дві універсальні калориметричні бомби БКУ – 2 (3), підставка для бомб (4) та прес для виготовлення проб (5). Для термостатування теплового блоку (1), щодо стандартних умов проведення досліджень (температура 25°C), його розміщують в холодильній камері.

Основні технічні характеристики КТС – 4:

- калориметр дозволяє вимірювати вищу теплоту згоряння рідких, газоподібних та твердих палив;
- діапазон вимірювання кількості теплоти 10...40 кДж;
- границі допустимої основної відносної похибки $\pm 0,2\%$;
- час підготовки до вимірювань, не більше 1,5 год.;
- час проведення вимірювань 0,5 год.

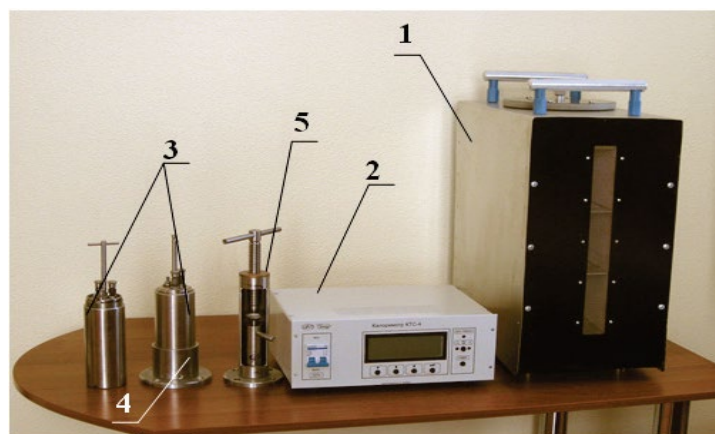


Рисунок 1 - Вимірювальний комплекс теплоти згоряння органічних палив КТС-4

Переваги приладу:

- не потребує приміщення зі спеціальними температурно-вологісними умовами;
- забезпечує автоматизацію процесів вимірювання й опрацювання результатів;
- не потребує дистильованої води;
- компактність конструкції, зручність експлуатації і обслуговування.



З використанням даного вимірювального комплексу проведено низку вимірювань теплоти згорання ТПВ, їх компонентів та інших композитних палив.

Для підвищення ефективності вимірювань була застосована методика, основні засади якої висвітлені авторами в попередній роботі [23]. Зокрема показано, що одним з дієвих способів підвищення точності вимірювань і зменшення похибки дослідження є збільшення кількості вимірювань, а значення вищої теплоти згорання визначати за середнім значенням вимірювань.

Аналогічний спосіб пропонується і для визначення теплоти згорання твердих побутових відходів.

Висновки.

1. Використання ТПВ в енергетичних установках є ефективним шляхом скорочення витрат традиційного органічного палива на ТЕС, ТЕЦ і котельнях при зменшенні витрат палива на транспортні перевезення.

2. З відомих, найбільш ефективних методів використання ТПВ в енергетиці, можна виділити три:

- пряме шарове спалювання відходів в спеціальних котельних агрегатах;
- попередня переробка ТПВ з видаленням негорючих компонентів, виробництвом паливних брикетів чи пилу і наступним їх спалюванням в топках котлоагрегатів;

- попередня переробка ТПВ з їх газифікацією – отриманням горючого газу, який можливо використовувати в існуючих енергетичних установках.

3. Часткова газифікація, як один з етапів глибокої переробки ТПВ, або їх повна газифікація з рідким шлаковидаленням і наступним використанням шлаків в будівельному виробництві. Така технологія є найбільш перспективною схемою, як по енергетичним характеристикам процесу, так із екологічних міркувань.

4. Вхідний контроль теплотехнічних характеристик ТПВ є важливою передумовою адекватного вибору технологій та енергетичного обладнання для ефективного використання відходів в енергетиці.

Література.

1. Закон України «Про внесення змін до Конституції України (щодо стратегічного курсу держави на набуття повноправного членства України в Європейському Союзі та в Організації Північноатлантичного договору)». Відомості Верховної Ради України. 2019. № 9. – 50 с.

URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2680-19>.

2. Energie aus Kehrlicht. Hubner Rjland «Elektrotechnik» 1984. 35, №4, p.55-56.

3. Municipal solid waste as a utility fuel. Me Gowin oharles R «Chem. Eng. Progr.», 1985, 81, №3, p.57 – 63.

4. Биомасса как источник энергии. Пер. с англ. /Под ред. С. Сауфера, О. Забродски. – М.: Мир, 1985. – 368 с.

5. Громов Б.В. и др. Безотходное промышленное производство. «Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов, т.9»(Итоги науки и техники



ВИНИТИ). – М.: 1981. – 218 с.

6. Левин Б.И. Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.

7. Меллер В.Я., Жуховицкий В.Б. Предложения по решению проблемы твердых бытовых отходов в Украине. / Сборник трудов XIII конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». – Киев: 2003. 152 – 165.

8. How to compute the energy content of solid waste. Hasselriis. Floyd. «Waste Age», 1985, 16, №4, 213. -p. 216 – 218.

9. Твердые отходы – возникновение, сбор, обработка и удаление. / Под ред. Ч. Мантелла. – Пер. с англ. – М.: «Стройиздат», 1979, - 518 с.

10. Буляндра О., Гапонович Л., Голенко І., Топал О. Перспективи використання палива з твердих побутових відходів на ТЕЦ цукрових заводів. Наукові праці НУХТ 2020. Том 26, №3.

11. Гольстрем В.А., Кузнецов Ю.Л. Справочник по экономии топливно-энергетических ресурсов. – К.: Техніка, 1985. – 383 с.

12. Japanese, Europeans lead in waste – to – energy incineration. Peterson Charles. «World Wastes», 1985, 28, №6, p.32 – 33.

13. Rubbish puts the heat on «Energy Rept». 1984, 11, №20, -5p

13. Bauer V. Сжигание вместо свалок // Pap. Osterr. 1992. – No.11. – P. 3 – 4.

14. Получение RDF (refuse derived fuel) из бытовых отходов в США. Иидзима Риндзо. «Хай – кибуцу», 1982, 8, №4, - С. 81-87.

15. Энергетическое использование мусора. Municipal waste derived fuels. Production, combustion and environmental aspects. Porteous . «Energy Econ. and Manag. Ind. Proc. Eur. Congr.», Algarve, 2-5 Apr., 1984 Vol.1 Oxford e. a., 1985, 103 - 111.

16. Energy recovery system provides fossil fuel alternative at Zockheol Electromics plant «Ind Heat.», 1981, 48, №11, - 33p.

17. Bauer V. Сжигание вместо свалок // Pap. Osterr. 1992. – No.11. – P. 3 – 4.

18. Rajca, P.; Skibinski, A.; Biniek-Poskart, A.; Zajemska, M. Review of Selected Determinants Affecting Use of Municipal Waste for Energy Purposes. Energies 2022, 15, 9057. – p. 17.

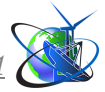
19. Склярєнко Є.В., Воробйов Л.Й. Методи аналізу енергетичного потенціалу твердих побутових відходів. The scientific heritage, №116.(2023). – p.44 – 50.

20. EN 15442:2011 Solid recovered fuels - Methods for sampling.

21. EN 15443:2011. Solid recovered fuels - Methods for the preparation of the laboratory sample.

22. Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлив. Инженерно – физический журнал. 1997, т.70, №5. – С. 828 – 839.

23. Склярєнко Є.В., Воробйов Л.Й. Калориметрична методика визначення теплоти згоряння палив з твердих побутових відходів. Modern Engineering and Innovative Technologies, 2023, № 29 – 01, - С.39 -54.



Abstract. *The paper examines the state and trends in the development of technologies for the utilization of solid municipal waste (SMW) and the world experience of using their energy potential in power plants. Three main methods of energy use of solid waste are noted: enrichment of waste with the production of fuel briquettes; gasification of solid waste at various stages of their processing; direct burning of unprepared or partially enriched waste in power plants. It is noted that the effectiveness of the applied technologies and installations for their implementation largely depends on the morphological composition of solid waste and the accuracy of determining their thermal characteristics, in particular, their heat of combustion. To increase the relevance of the measurement results, a number of sequential actions for selecting the investigated samples for the experimental study of the heat of combustion in the bomb quasi-differential heat flow calorimeter are proposed.*

Keywords: *municipal waste, utilization, energy, calorimetry.*

*Стаття підготовлена у рамках виконання науково – дослідної тематики
ІТТФ НАН України, тема «Розроблення технічних засад
нової високоефективної технології спалювання штучних палив з твердих
побутових відходів та біомаси у когенераційних енергоустановках з
використанням водню, кисню, синтетичного та біометану
для забезпечення енергетичної безпеки України»*

Стаття відправлена: 18.06.2024р
© Скляренко Є.В., Воробйов Л.Й.