

ФАКТОРИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ В ЯКОСТІ ПАЛИВА В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Частина 1. Дослідження процесів горіння ТПВ

А. Г. Колієнко, кандидат технічних наук, професор

Національний університет Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка

О. В. Шеліманова, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: shelemanova@ukr.net

Анотація. Приводом для неоднозначної оцінки доцільності використання котельних систем централізованого теплопостачання для спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) є специфічний склад ТПВ і особливості процесу їх горіння. Досвід роботи сміттєспалювальних заводів свідчить про необхідність використання з цією метою спеціального паливоспалювального обладнання і складних систем очищення продуктів згорання.

Мета дослідження – визначення умов впровадження систем спалювання ТПВ, які б відповідали вимогам екологічної та економічної ефективності.

У статті представлені результати експериментальних досліджень процесу спалювання ТПВ і рекомендації щодо безпечної і ефективної організації такого процесу.

Визначені основні чинники негативного впливу на довкілля, пов'язані як безпосередньо із організацією процесу горіння, так і зі складом продуктів згорання, зокрема, високим вмістом сірки та хлору в складі ТПВ.

Результати досліджень підтверджують, що використання відходів як палива вимагає специфічних умов організації процесу горіння, експлуатації паливоспалювальних установок і облаштування систем очищення продуктів згорання.

Показано, що склад ТПВ і їх горючі характеристики суттєво відрізняються від відомих видів твердого і альтернативного виду палива. Це призводить до необхідності реконструкції існуючих теплофікаційних котлів на твердому паливі

Ключові слова: *тверді побутові відходи, організація процесу горіння, очищення продуктів згорання*

Актуальність. Світова політика щодо відходів орієнтована на розвиток технологій замкненого циклу шляхом отримання із відходів вторинних ресурсів за умови екологічно безпечного поводження з відходами, підвищення рівня рекуперації та використання вторинної сировини. Вона передбачає обмеження

одноразового використання товару та протидію його передчасному старінню; підвищення ремонтоздатності продукції, підвищення ефективності використання енергії та ресурсів; збільшення вмісту вторинної сировини в продуктах, можливість повторного виробництва та високоякісної переробки відходів тощо.

Схвалення Кабінетом Міністрів України «Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 р.» [1] і затвердження «Національного плану управління відходами до 2030 р» [2] мають наблизити поводження з відходами в Україні до стандартів ЄС.

Закон України «Про управління відходами» [3] декларує принцип оброблення відходів на найближчій установці для їх оброблення, або в місці захоронення з урахуванням екологічної та економічної ефективності. За Додатком 11А Директиви Ради ЄС 75/442 [4] до переліку проектів, які належать до утилізації відходів, відноситься захід R9B "Використання відходів в якості палива або інші способи отримання енергії".

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З огляду на значну кількість ТПВ, що утворюються в Україні щорічно (до 10 млн. т), а також той факт, що близько 94 % їх потрапляє на сміттєзвалища, значна увага почала приділятися саме енерготехнологічному використанню ТПВ.

При цьому в роботах багатьох авторів створюється ілюзія простоти здійснення процесу спалювання ТПВ мало не в котлах районних котельних. Але це може призвести до значних негативних наслідків. У статті аналізується це питання.

Згідно даних [5] до складу невідсортованих відходів входять: деревина – 20 %, мотлох – 26 %, гума – 6 %, пінопласт – 8 %, харчові відходи – 40 %. Теплота згоряння не відсортованих залишків сміття сягає 3060 ккал/кг (12 800 кДж/кг) при вологості до 35 % та зольності до 5 % . Елементарний сухий склад сміття за [5] наведений в таблиці 1.

1. Елементарний склад ТПВ на суху масу, % мас.

Вид побутових відходів	C	H	O	N	S	Зола
Газети	49,14	6,16	43,03	0,05	0,16	1,52
Картон	43,73	5,7	44,93	0,09	0,21	5,34
Відходи рослинної їжі	49,06	6,62	37,55	1,68	0,2	4,89
Відходи обробки мяса	59,59	7,09	7,76	0,5	1,34	30,09

Але зазначені в таблиці дані наведені на сухий склад, в якому ТПВ в реальних умовах їх спалювання ніколи не будуть перебувати. Вологість ТПВ коливається від 40 до 60 %. А за такої вологості вміст усіх компонентів ТПВ суттєво зменшується, як і теплота згоряння відходів.

Мета дослідження – визначення умов впровадження систем спалювання ТПВ, які б відповідали вимогам екологічної та економічної ефективності.

Матеріали та методи дослідження. У таблиці 2 наведено дані, які були отримані авторами у ході досліджень зі спалювання відсортованої суміші ТПВ.

2. Характеристика і склад ТПВ

Найменування показників	Од. вимір.	Значення показників		Норматив.
		На сухий склад (паливо з урахування вологості)	На дійсний робочий склад палива	
Загальна вологість	% мас.	-	43,7	ISO 589-81
Зольність, А	% мас.	10,1	5,68	ISO 1171-97
Загальна сірка, S	% мас.	0,84	0,47	ISO 351-84
Загальний вуглець, С	% мас.	62	34,9	ISO 625-96
Загальний водень	% мас.	7,74	4,2	ISO 625-96
Загальний азот	% мас.	0,22	0,12	ISO 333-83
Загальний кисень	% мас.	19,13	10,77	ISO 1994-76
Загальний хлор	% мас.	1,487	0,81	ISO 587-97
Температура деформації	°С	1310	1310	ISO 540-81
Нижча теплота згоряння	ккал/кг	6002	3379	ISO 1928-6
Вища теплота згоряння	ккал/кг	7645	4304	ISO 1928-6
Вихід летких речовин	%	93,7	43,2	ISO 562-81

Аналіз даних таблиці свідчить про те, що спалювання ТПВ має низку викликів, які пов'язані як безпосередньо із організацією процесу горіння, так і зі складом продуктів згоряння, їх впливом на довкілля і вимогами до систем очищення продуктів згоряння від таких установок.

По перше – достатньо низька теплота згоряння і високий вміст води в ТПВ, що суттєво ускладнює процес горіння і зменшує кількість теплоти, котру можна отримати при горінні.

По друге – високий вміст сірки у ТПВ, що обов'язково призведе до утворення значної кількості шкідливого сірчистого ангідриду SO₂ у продуктах згоряння, який до того ж має сумуючий ефект для усіх компонентів продуктів згоряння в ході

розрахунку процесу розсіювання в атмосфері. Так, наприклад, концентрація SO₂ у продуктах згоряння ТПВ буде становити близько 2000 мг/м³, а годинні викиди SO₂ в атмосферу лише від одного котла теплопродуктивністю 10 МВт будуть становити 4,5 кг (або 108 кг за добу роботи котла). Гранично допустима концентрація SO₂ в атмосфері становить лише 0,5 мг/ м³ .

Третє – висока зольність ТПВ, що призводить до виносу летучої золи з продуктами згоряння в атмосферу, значного забруднення її дисперсною фазою і великого зольного залишку на колосниковій решітці і у підтопковому просторі. За умови достатньо низької температури плавкості золи (див. табл. 2) це призводить, в свою чергу, до утворення шлаку на колосниковій решітці.

Четверте – високий вміст хлору в складі ТПВ. Як відомо, в процесі згоряння хлормістких вуглеводнів утворюються ароматичні поліциклічні вуглеводні з вмістом хлору - в їх будові лежить багато разів повторене фенольне кільце до якого входить хлор, наприклад, 2,5-діхлортіофер, ПХДД і ПХДФ (поліхлордибензо-парадіоксин, поліхлор-дибензофуран) - останні дві речовини перераховуються при аналізі на вміст 2,3,7,8-тетрахлордибензо - парадіксина). Проблема полягає в тому, що ці речовини є канцерогенно активні і дуже токсичні. Ситуація погіршується тим, що хлор до відходів входить у виді сполук, які містять хлор, котрий уже з'єднаний із фенольним кільцем - так звані галогенфеноли. Саме вони утворюються в ході розкладу органічних відходів і саме завдяки цим сполукам ТПВ має характерний неприємний запах.

Ще одна характерна особливість ТПВ – високий вихід летючих речовин – 43,2 % мас. на робочий склад і 93,7% мас. - на сухий склад. Ця величина в % показує зменшення маси ТПВ відносно її первинної маси після того, як протягом 7 хв при температурі 850 °С навіску із ТПВ покинуть волога і летючі речовини. Таким чином, коксовий залишок на сухий склад палива після виходу летючих становить лише 6-7 % мас. Для порівняння – навіть для торфу вихід коксового залишку становить близько 40 % на суху масу палива. Цей факт обов'язково потрібно враховувати при організації процесу горіння.

Усі зазначені особливості потрібно враховувати при вирішенні питань про можливість використовувати ТПВ в якості палива.

Для унеможливлення спрощення питань про організацію процесу горіння і очищення продуктів згоряння при спалюванні ТПВ Директивою 2000/76/ЄС "Про спалювання відходів" [6] введено нормативи вмісту токсичних інгредієнтів у продуктах згоряння відходів у димових трубах. Деякі із них наведено в таблиці 3.

3. Граничні концентрації токсичних інгредієнтів у продуктах згоряння пристроїв для спалювання ТПВ¹.

Назва інгредієнту	Од. вимірю- вання	Величина	
		при $\alpha = 1,9$.	при $\alpha = 1,0$
Дисперсні частинки (зола і сажа)	мг/м ³	10	19
Хлористий водень HCl		10	19
Фторводень HF		1	1,9
Діоксид сірки		50	95
Оксиди азоту		400	760
Діоксини, фурани		0,1	0,19
Монооксид вуглецю CO		150	285
Органічні з'єднання вуглецю		10	19

За [6] аналіз продуктів згоряння при спалюванні відходів потрібно обов'язково виконувати на зазначені в таблиці інгредієнти

За прийнятого в Україні ДСТУ EN 15359:2018 Тверде відновлювальне паливо (SRF). Технічні характеристики та класи (EN 15359:2011, IDT), цей перелік також потрібно розширити за рахунок аналізу на вміст ртуті. Вимірювання вмісту HCl і HF дозволяється виконувати лише періодично, якщо використовуються системи очищення від цих газів і результатами експлуатації підтверджується незначна концентрація таких інгредієнтів.

Результати досліджень та їх обговорення. У ході досліджень з ефективності спалювання ТПВ було визначено основні характеристики процесу горіння ТПВ та їх суміші з іншим видом палива – біомасою. Частка біомаси змінювалась від 10 до 50 % (див. таблицю 4).

4. Основні розрахунки процесу горіння ТПВ

№	Найменування параметра процесу горіння	Од. вимір.	Величина
1	Теплота згоряння палива: - вологість 30 % мас. -- вологість 43 % мас.	ккал/кг	4201 3500
2	Витрата теплоти для зміни вологості 1 кг палива на 10 % : Теплоємність палива вологістю 50 % становить 2,77 кДж / кг град. Теплоємність сухого палива - 1,34 кДж / кг град. Ефективність роботи сушила – 30 %.	ккал/кг	370
3	Збільшення теплоти згоряння при зменшенні вологості палива на 10 %	ккал/кг	600
4	Витрати повітря на повне згоряння палива при $\alpha = 1$	м ³ /кг	3,86
5	Об'єм водяної пари у продуктах згорання	м ³ /кг	1,07
6	Об'єм азоту у продуктах згорання	м ³ /кг	3,04
7	Об'єм CO ₂ у продуктах згорання	м ³ /кг	0,65
8	Повний об'єм продуктів згоряння на 1 кг палива при $\alpha = 1$	м ³ /кг	4,76
9	Вміст триатомних газів у продуктах згоряння при $\alpha = 1$ - RO ₂ max	%	13,7
10	Абсолютна вологість продуктів згоряння	г/м ³	438,5
11	Кількість теплоти, яку можна отримати в конденсаційному теплообміннику за котлом за умови охолодження продуктів згоряння з 250 до 80 °С	ккал/кг	263 10% від теплоти згорання палива

Паливо надходило в систему паливоподачі, яка представляла собою бункер, що розміщувався нижче рівня землі, і транспортер, який доставляв паливо до гідравлічного подавача котла.

Основні результати випробування котла наведено в таблиці 5. У таблиці 6 наведено величини дійсних концентрації шкідливих інгредієнтів, зафіксованих в продуктах згоряння при спалюванні суміші ТПВ і додаткового виду палива.

Як видно із вищенаведеної таблиці, очищення продуктів згоряння є обов'язковим у відношенні до дисперсної фази (сажі і летучої золи), діоксиду сірки, з'єднань хлору.

Обмеження щодо забруднення довкілля при спалюванні відходів стосуються не лише газоподібних викидів в атмосферу, а й результатів оброблення продуктів згоряння і скидів у воду. Особливі вимоги щодо знешкодження таких органічних речовин, як діоксини за п. 18. Директиви діють лише у разі умісту хлору у відходах більше 1 % маси.

5. Результати обстеження роботи котла на ТПВ

№	Назва параметра роботи котла	Од. вимір.	Режим роботи котла		
			1	2	3
1	Витрата палива, В	кг /год	450	630	800
2	Теплова потужність котла	кВт	1500	2000	2500
3	Температура відхідних газів за котлом	°С	160	175	180
4	Температура на поверхні котла	°С	38	40	41
5	Концентрація кисню у продуктах згоряння	% об.	16,7	14,8	15,4
	Концентрація CO ₂ у продуктах згоряння		2,78	4,9	3,6
8	Коефіцієнт надлишку повітря в продуктах згоряння палива	α	4,8	2,72	3,75
9	Складові теплового балансу:	%			
	- втрати теплоти з відхідними газами, q ₂ ;		18,1	11,6	18,0
	- втрати з хімічним недопалом;		0,05	0,16	0,15
	- втрати у доквілля;		3,2	2,5	1,6
	- втрати з механічним недопалом;		0,5	0,4	0,45
-загальні втрати теплоти	21,8	14,7	20,2		
11	Коефіцієнт корисної дії котла	%	78,2	85,3	79,8

6. Концентрації забруднюючих інгредієнтів на виході із котла

Назва інгредієнту	Од. вимірювання	величина	
		при α =1,9.	при α =1,0
Дисперсні частинки (зола і сажа)	мг/м ³	320	608
Хлористий водень НСІ		9,43	18
Фторводень HF		0,8	1,5
Діоксид сірки		1200	2200
Оксиди азоту		210	400
Діоксини		0,08	0,15
Монооксид вуглецю СО		147	280
Органічні з'єднання вуглецю		7,9	15

Основними факторами, які мають негативний вплив на ефективність роботи паливоспалювального пристрою на біомасі, є таке:

- низька щільність (густина) палива (близько 180 кг/ м³) або великий питомий об'єм ТПВ, що не дає можливості забезпечити об'ємному пристрою для подачі палива номінальну величину масових витрат палива, необхідну для досягнення паспортної потужності котла. Таким чином, необхідно збільшувати продуктивність пристрою для подачі ТПВ до котла і забезпечити можливість подачі достатньої масової кількості палива для унеможливлення втрати теплопродуктивності котла;

- низька температура виходу летючих речовин та високий вихід летючих речовин із палива (до 93 % від сухої маси палива). У результаті вже на вході палива до котла відбувається інтенсивний вихід летючих речовин із палива.

Рекомендується спалювати суміш твердих горючих речовин, яка складається із ТПВ і тріски, або відходів сільськогосподарського виробництва, що забезпечить наявність у паливі твердих речовин із тривалим циклом горіння, у тому числі в гетерогенній (твердій) фазі. Наявність такого додаткового палива може забезпечити стійкість процесів горіння в топковому просторі, необхідну температуру в зоні горіння, достатню для догорання летких речовин і продуктів дисоціації ТПВ.

Величина RO_2^{\max} для спалюваного палива становить близько 13,6 % об. Тому використання значної частини газоаналізаторів для визначення коефіцієнта надлишку повітря за типовою програмою газоаналізатора, а також втрат теплоти з відхідними газами за типовою методикою є неможливим. Необхідно виконувати ручні розрахунки за зазначеною величиною RO_2^{\max} і заміряною концентрацією кисню у продуктах згорання.

Висновки та перспективи. У статті представлено результати досліджень спалювання ТПВ у топках паливоспалювальних агрегатів. Показано, що склад ТПВ і їх горючі характеристики суттєво відрізняються від відомих видів твердого і альтернативного виду палива. Це призводить до необхідності реконструкції існуючих теплофікаційних котлів на твердому паливі для спалювання ТПВ. Досвід роботи сміттєспалювальних заводів за кордоном і в Україні свідчить про те, що поверхневий і формальний розгляд цього питання, нехтування особливостями складу ТПВ, процесу горіння і вмісту специфічних компонентів у продуктах згорання може призвести до того, що установки зі спалювання відходів стануть небезпечними джерелами забруднення довкілля в місцях їх розташування. Особливо небезпечними є намагання використати ТПВ в якості палива котельних міських систем теплопостачання.

Список використаних джерел

1. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 р. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820 – р. Київ. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/250431699>.

2. Про затвердження Національного плану управління відходами до 2030 р. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 20 лютого 2019 р. № 117-р. Київ, URL:<https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnogo-planu-upravlinnya-vidhodami-do-2030-roku>

3. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/T222320?an=2>.

4. Williams, Paul T. Waste treatment and disposal. 2nd. 2005.

5. Council Directive 2006/12/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on waste. Official Journal of the European Union. 2006. L 114. 27.4.2006. P. 9–21.

6. Чмель В. М., Новікова І. П. Газифікація побутових відходів. Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: Збірник праць. Інститут промислової екології. К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. 161 с.

References

1. Pro skhvalennia Natsionalnoi stratehii upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 r. [On the approval of the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030]. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 8 lystopada 2017 r. № 820 –r. Kyiv. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/250431699>.

2. Pro zatverdzhennia Natsionalnoho planu upravlinnia vidkhodamy do 2030 r. [On the approval of the National Waste Management Plan until 2030]. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 20 liutoho 2019 r. № 117-r. Kyiv, Available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnogo-planu-upravlinnya-vidhodami-do-2030-roku>

3. Zakon Ukrainy «Pro upravlinnia vidkhodamy» vid 20.06.2022 № 2320-IX. [Law of Ukraine "On Waste Management" dated June 20, 2022 No. 2320-IX]. Available at: <https://ips.ligazakon.net/document/T222320?an=2>.

4. Williams, Paul T. (2005). Waste treatment and disposal 2nd 2005.

5. Council Directive 2006/12/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on waste). Official Journal of the European Union. 2006, L 114, 27.4.2006, 9–21.

6. Chmel, V. M., Novikova, I. P. (2022). Hazyfikatsiia pobutovykh vidkhodiv. Problemy ekolohii ta ekspluatatsii obiektiv enerhetyky: Zbirnyk prats [Gasification of Household Waste. Problems of ecology and operation of energy facilities]. Kyiv: IVTs ALKON NAN Ukrainy, 161.

FACTORS OF USING WASTE AS FUEL IN THERMAL ENERGY SYSTEMS OF

Part 1. Study of SHW combustion processes

A. Koliienko, O. Shelimanova

Abstract. *The reason for the ambiguous assessment of the feasibility of using boiler systems of centralized heat supply for burning solid household waste (SHW) is the specific composition of SHW and the peculiarities of their combustion process. The experience of waste incineration plants shows the need to use for this purpose special incineration equipment and complex systems for cleaning combustion products.*

The purpose of the study is to determine the conditions for the implementation of solid waste incineration systems that would meet the requirements of environmental and economic efficiency.

The article presents the results of experimental studies of the SHW burning process and recommendations for the safe and effective organization of such a process.

The main factors of negative impact on the environment are identified, which are directly related to the organization of the combustion process and the composition of combustion products, in particular, the high content of sulfur and chlorine in solid waste.

The research results confirm that the use of waste as fuel requires specific conditions for the organization of the combustion process, the operation of combustion plants and the arrangement of systems for cleaning combustion products.

It is shown that the composition of solid waste and their combustible characteristics differ significantly from known types of solid and alternative fuels. This leads to the need to reconstruct existing solid fuel heating boilers

Key words: *solid household waste, organization of the combustion process, cleaning of combustion products*