

УДК: 543.57:662.6/.9:628.4.04-405

ВПЛИВ ГОРЮЧИХ СКЛАДОВИХ ТПВ НА ТЕРМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ RDF

Корінчевська Т.В.¹, канд. техн. наук., Михайлик В.А.², канд. техн. наук.,
Воробйов Л.Й.³, докт. техн. наук, Снєжкін Ю.Ф.⁴, академік НАН України

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

¹старший наук. співр., tvkorin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6638-4743>

²пров. наук. співр., старший науковий співробітник, mhlk45@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2712-1382>

³пров. наук. співр., старший науковий співробітник, teplomer@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7958-6996>

⁴директор, професор, Isnezhkin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7871-8774>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2023.3>

В статті наведено результати термічного аналізу найбільш вірогідних горючих складових твердих побутових відходів та палива з них. Визначено температури етапів деструкції, швидкість термічного розкладання органічних речовин, вологість, вміст золи та теплоту згорання. Показано вплив окремих складових на кінетику термічної деструкції та властивості палива.

The article presents the results of thermal analysis of the most likely combustible components of municipal solid waste and fuel from them. The temperatures of the stages of destruction, the rate of thermal decomposition of organic substances, moisture and ash content and heat of combustion are determined. The influence of individual components on the kinetics of thermal destruction and properties of fuel is shown.

Бібл. 20, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: тверді побутові відходи, RDF паливо, термічний аналіз, деструкція, розкладання, теплота згорання.

ТПВ – тверді побутові відходи;

СМ – сухий матеріал;

ПЕТ – поліетилентерефталат;

RDF – паливо з відходів (англ. refuse derived fuel);

SRF – тверде відновлене паливо (англ. solid recovered fuels);

T – крива температури;

TG – крива термогравіметрії;

DTA – крива диференціального термічного аналізу;

DTG – крива диференціальної термогравіметрії.

Вступ

Питання накопичення твердих побутових відходів (ТПВ) є актуальним для всього суспільства. В розвинених країнах (зокрема в Німеччині, Італії, США та Великобританії) ця проблема вирішується завдяки спалюванню ТПВ або їхньому переробленню на паливо [1]. В Україні ж ситуація є критичною, оскільки застосовується застарілий метод, а саме захоронення відходів на полігонах та звалищах з подальшим забрудненням повітря, ґрунту, поверхневих та ґрунтових вод. Відповідно до звіту Мінінфраструктури [2] в населених пунктах України (без урахування відомостей щодо тимчасово окупованих територій, а також більшості східних та південних регіонів України, де неможливо зібрати дані через бойові дії) за 2022 рік утворилось понад 7 млн. тон побутових відходів, які були захороненні на сміттєзвалищах і полігонах загальною площею майже 8 тис. га. В той же час лише 1,66% побутових відходів спалено, а 8,24% – потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні лінії.

З іншого боку існує гостра необхідність заміщення традиційного палива альтернативними джерелами енергії. Одним з перспективних та важливих шляхів вирішення цієї проблеми є залучення до енергетичного балансу України твердих побутових відходів в якості палива. ТПВ є різновидом сталого енергетичного ресурсу з високим потенціалом.

Паливо з відходів (RDF, англ. refuse derived fuel)— це альтернативне тверде паливо, яке містить горючу частину побутових або промислових нешкідливих відходів, що залишилися після відділення вторинної сировини [3]. Це переважно полімерні матеріали, що не підлягають переробці, папір, картон, текстильні вироби тощо. На відміну від безпосереднього спалювання ТПВ, спалювання RDF має вищу ефективність за рахунок вищої теплотворної здатності та менш негативного впливу на навколишнє середовище. Таке паливо як правило використовують в цементних печах, котлах і для виробництва електроенергії [2]. Електростанції та цементні заводи спалюють RDF переважно шляхом

змішування з вугіллям або біомасою [4, 5]. Якщо паливо проходить випробування і відповідає вимогам, викладеним в [6], його класифікують як тверде відновлене паливо (SRF, англ. solid recovered fuels). Система класифікації базується на трьох основних характеристиках – економічній (нижча теплотворна здатність), технічній (вміст хлору) та екологічній (вміст ртуті).

Технології перетворення твердих побутових відходів на RDF/SRF включають в себе такі основні стадії: сортування, подрібнення, розділення, змішування, сушіння, гранулювання та пакування [7, 8]. Вибір технології переробки ТПВ безпосередньо залежить від характеристик відходів. Визначальними характеристиками є морфологічний, фракційний та хімічний склад, густина, теплота згорання та вологість ТПВ [9]. Ці характеристики залежать від місця і часу утворення відходів. Усереднений морфологічний склад для великих міст України представлено на рис. 1 [5]. Найбільша частка – це харчові відходи, які мають високу вологість та низьку теплоту згорання, тому їх не рекомендовано використовувати для виготовлення RDF.

Якщо відокремити негорючі компоненти ТПВ, то RDF паливо в великих містах України може містити 26,2...55,5% полімерних матеріалів, 32,7...49,1% паперу та картону, 6,5...16,4% текстилю, 0,3...6,5% деревини та 1,6...4,9% шкіри та гуми.

Ефективність використання RDF остаточно визначається в процесі згорання. Проте передбачити характеристики палива можливо маючи результати термічного аналізу його компонентів. Термогравіметрія та диференціальний термічний аналіз сприяють розширенню знань з кінетики термічної деструкції та генерації теплоти [10].

Паливо з відходів різного складу має відмінну кінетику термічної деструкції [11–14], тому кожний вид RDF потребує дослідження термічних характеристик для прогнозування його якості.

Матеріали та методи

З метою створення RDF на основі горючих складових ТПВ досліджені зразки паперу та картону, полімерних і текстильних матеріалів, а також шкіра та деревина. Враховуючи можливий склад RDF, характерний для великих міст України, та результати дослідження складових ТПВ запропоновано та виготовлено чотири варіанти експериментального RDF (А, В, С та D). Точний склад палива не розголошується з умов конфіденційності.

Оскільки деревина, текстиль та шкіра серед горючих складових ТПВ присутні в незначній кількості, то їхню частку в усіх чотирьох варіантах RDF практично не змінювали. Їх вміст в паливі був в межах процентного складу горючих складових твердих побутових відходів (характерних для великих міст України). З метою визначення перспективного складу палива варіювали вмістом (основних компонентів) картону та полімерних матеріалів – поліетиленової плівки та фрагментами пляшки з поліетилентерефталату (ПЕТ). В складі RDF А картон та поліетиленова плівка знаходились у співвідношенні близькому як 2:1. В RDF В картон та поліетиленова плівка присутні в майже однаковій кількості. Склад RDF С відрізняється від RDF В тим, що в ньому поліетиленова плівка заміщена фрагментами з пляшки ПЕТ практично в рівній кількості. В RDF D три основні компоненти палива присутні в однаковій кількості.

Всі матеріали зберігали на протязі тривалого часу в приміщенні лабораторії при відносній вологості повітря

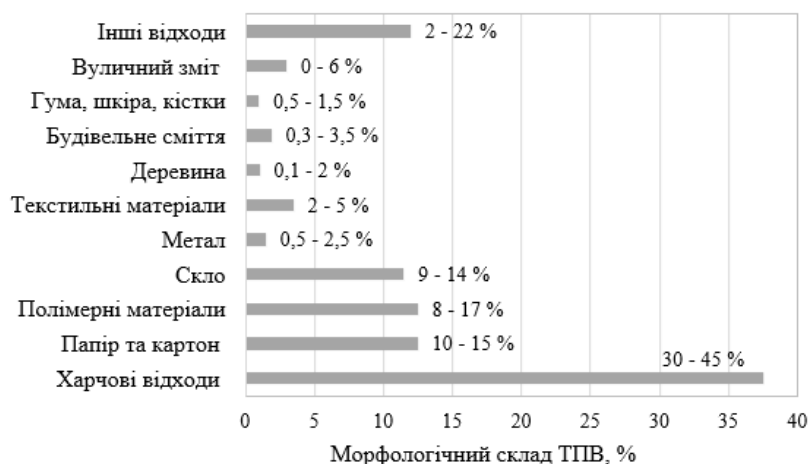


Рис. 1. Усереднений склад ТПВ в великих містах України

40% за температури 20 °С. Перед дослідженням їх подрібнювали до розміру частинок $\leq 0,5$ мм. Практично всі зразки мали рівноважну вологість.

Методами термогравіметричного та диференціального термічного аналізу досліджена термічна деструкція горючих складових ТПВ та палива з них. Дослідження виконували в модернізованому в ІТТФ НАН України дериватографі Q-1000 (фірма «МОМ», Угорщина). Збір даних здійснювали за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph». Процес термічної деструкції спостерігали при нагріванні зразків (50...70 мг) у відкритому платиновому тиглі зі сталою швидкістю (7,4 К/хв) від 20 до 1000 °С при роздільній здатності ваг 0,5 мг. Інертною речовиною в тиглі порівняння слугував Al_2O_3 . В процесі досліджень отримані профілі температури зразка (Т), його маси (TG), швидкості зміни маси (DTG) та генерації теплоти (DTA). Це дозволило визначити температурні інтервали зневоднення, термічного розкладання органічних та мінеральних речовин, вологість і зольність зразків, а також оцінити кінетику деструкції.

Теплоту згорання визначали за стандартною методикою для твердих видів палива [15, 16].

Результати досліджень та їх аналіз

Дослідження різних видів паперу та картону (зразки № 1–5, табл. 1) свідчать про подібність характеру деструкції. Видалення води відбувається в близькому для всіх зразків інтервалі (20...176 °С). Найвужчий інтервал дегідратації спостерігається в зразку № 4, а найширший – в зразку № 3. Термічне розкладання органічних речовин має однотипний характер і проходить у дві стадії в інтервалі 163...545 °С. Окрім картону з тарілки, зразки мають однакову середню швидкість розкладання органічних речовин ~2% сухого матеріалу за хвилину (СМ/хв). Часка мінеральних речовин, що розкладаються, найменша в картоні зі стаканчику (1,59% СМ) і найбільша в картоні з тарілки (5,16% СМ). При цьому в зразках картону та паперу, крім зразка №4, спостерігається ендотермічний ефект при температурах, що співпадають з температурою термічної дисоціації карбонату кальцію (крейди), яка використовується в технології виготовлення паперових виробів. Вміст золи в зразках картону варіює від 1,76 (зі стаканчику) до 16,08% СМ (з тарілки).

Серед синтетичних полімерних матеріалів досліджені найбільш поширені в ТПВ. Це вироби із поліетилену (плівка) та з поліетилентерефталату (ПЕТ) (пляшки). Термічний аналіз показав в межах

застосованої чутливості ваг відсутність в полімерних зразках води (зразки № 6 та 7, табл. 1). Термічна деструкція поліетиленової плівки починається зі склопереходу за 124 °С, в результаті якого поліетилен спочатку переходить в еластичний, а згодом і в рідкий стан [17]. Розкладання органічних речовин плівки реєструється з 211 °С, в зразку з пляшки ПЕТ з 247 °С. В інтервалі 336–505 °С в відбувається інтенсивне утворення та видалення за межі тигля газоподібних речовин.

Цей процес відображається глибокими піками на кривих DTG та DTA з мінімумами при 446 °С та 459 °С відповідно, що добре видно на дериватограмі зразка RDF В з високим вмістом поліетиленової плівки (рис.3). Викид газоподібних речовин з високою температурою призводить до втрати теплоти термічного розкладання, що реєструється на кривій DTA в вигляді ендотермічного піка. Інтенсивне газоутворення в межах 387...457 °С відбувається також при розкладанні матеріалу зразка з ПЕТ. Максимум швидкості розкладання спостерігається при 407 °С. Вміст мінеральних речовин (1,06...2,16% СМ) та золи (0,18...1,98% СМ) в досліджених зразках полімерів незначні. При цьому нижча теплота згорання в сухому стані у поліетиленової плівки в 1,9 разів вища ніж у зразках пляшки з ПЕТ.

Термічна деструкція текстильних виробів досліджувалась на зразках бавовняної, шерстяної та синтетичної тканин (зразки № 8–10, табл. 1). Найвужчий інтервал видалення води має шерстяна тканина (19...149 °С), а найширший – синтетична (20...178 °С). Найтриваліше розкладання зареєстровано для шерстяної тканини. У зразку бавовняної тканини зафіксовано потужне газоутворення в інтервалі 280...357 °С з максимумом швидкості при 331 °С. Вміст золи у зразках знаходиться в межах 1,05...1,32% СМ. Нижча теплота згорання у сухому стані визначена в межах 15...22 МДж/кг і залежить від виду текстилю.

Характер термічного розкладання натуральної шкіри подібний до картону та тканини. Вода видаляється до 156 °С. Розкладання органічних речовин завершується при досягненні 595 °С. Вміст золи порівняно високий і становить 3,26% СМ.

Термічна деструкція деревини сосни має характер, що відповідає закономірностям розкладання природного рослинного матеріалу, де основними компонентами є геміцелюлоза, целюлоза та лігнін [19].

Нижча теплота згорання у сухому стані досліджених зразків, окрім поліетилену, знаходиться в межах 15...20 МДж/кг, що задовольняє вимогам щодо термічних властивостей палив з відходів. Результати

Таблиця 1. Термічні характеристики горючих компонентів ТПВ

№ з/п	Зразок	Видалення води		Термічне розкладання					Зола, % СМ	Нижча теплота згорання у сухому стані, МДж/кг
				органічних речовин			мінер. речовин			
		інтервал, °С	вологість, %	інтервал, °С	вміст, % СМ	середня швидкість розкладання % СМ/хв	інтервал, °С	вміст, % СМ		
1	Папір	20–166	6,02	166–495	90,05	2,04	495–1000	3,68	6,27	16,62 [18]
2	Картон тонкий пакувальний	20–169	6,0	169–493	87,64	2,01	493–1000	4,89	7,47	15,21
3	Картон гофрований з пакувальних коробок	20–176	6,81	176–488	86,82	2,08	488–1000	4,58	8,60	-
4	Картон з стаканчику	20–163	6,73	163–517	96,65	2,04	517–1000	1,59	1,76	-
5	Картон з тарілки	20–169	5,83	169–545	78,76	1,55	545–1000	5,16	16,08	-
6	Поліетиленова плівка	—	0	211–516	95,86	2,33	516–1000	2,16	1,98	42,56
7	Матеріал пляшки з ПЕТ	—	0	247–572	98,76	2,26	572–1000	1,06	0,18	22,07
8	Тканина бавовняна	19–162	4,30	162–513	97,53	2,07	513–1000	1,35	1,12	15,57
9	Тканина шерстяна	19–149	8,62	149–646	96,93	1,45	646–1000	1,75	1,32	21,95
10	Тканина синтетична	20–178	7,96	178–542	97,05	1,98	542–1000	1,90	1,05	17,91
11	Шкіра натуральна	20–156	10,08	156–595	95,32	1,62	595–1000	1,42	3,26	22,35
12	Деревина сосни	20–171	6,94	171–525	98,47	2,07	525–1000	0,68	0,85	18,64

визначення термічних характеристик зразків (табл. 2) свідчать про можливість використання досліджених горючих складових ТПВ в якості компонентів RDF.

Оскільки, відповідно умовам експерименту, наважки були в межах ~70 мг, то при компонуванні зразків RDF складно комбінувати компонентами з малим вмістом в ТПВ. З огляду на це варіювали складовими, що мали найбільший вміст в ТПВ, залишаючи практично незмінним вміст в RDF тканини синтетичної, шкіри натуральної та деревини сосни. Зразки RDF виготов-

ляли шляхом змішування компонентів в необхідному співвідношенні.

Отримані дериватограми термічного розкладання RDF відображають профілі T, TG, DTG та DTA в ході нагрівання зразка. Для всіх зразків (рис. 2–4) характерна трьохетапна деструкція, що супроводжується ендо- та екзотермічними ефектами. На першому етапі відбувається дегідратація компонентів RDF, на другому – термічне розкладання органічних речовин, а на третьому – мінеральних (табл. 2).

Зневоднення RDF А палива відбувається в інтервалі 23...166 °С (рис. 2). За рахунок високого вмісту картону вологість зразка найвища серед усіх зразків палив (табл. 2). Термічне розкладання органічних речовин відбувається у три стадії, які відрізняються швидкістю розкладання та тепловими ефектами. В інтервалі 166...352 °С відбувається розкладання 43,99% СМ зі швидкістю 1,87% СМ/хв (табл. 3) і постійне наростання тепловиділення. На цій стадії зафіксовано максимум швидкості розкладання за температури 313 °С. На другій стадії (352...470 °С) швидкість розкладання за рахунок поліетилену зростає до 2,41% СМ/хв. Інтенсивний викид газів за межі тигля призводить до втрати теплоти, що реєструється на кривій DTA в вигляді ендотермічного піка з максимумом при 463 °С. На третій стадії в інтервалі 470–530 °С розкладання органічних речовин завершується, про що свідчить хід кривих DTG та DTA. Подальше зростання температури викликає розкладання мінеральних речовин. За температур 648...733 °С спостерігається втрата маси зразка

(криві TG та DTG) та поглинання теплоти (крива DTA), що є наслідком термічної дисоціації карбонату кальцію в картоні. Зольність RDF А становить 4,87% СМ, а визначена нижча теплота згорання 23,03 МДж/кг.

Як і для зразка RDF А, зневоднення RDF В закінчується при 166 °С, після чого починається етап розкладання органічних речовин (рис. 3, табл. 2). Цьому етапу теж характерні три стадії розкладання (табл. 3). На першій (166...353 °С) видаляється 35,67% СМ зі швидкістю 1,52% СМ/хв. На другій стадії (353...476 °С) через високий вміст поліетиленової плівки в паливі інтенсивність розкладання зростає в 1,9 рази. В інтервалі 419...501 °С на кривій DTA реєструється потужний ендотермічний пік (рис. 3), що спостерігався при розкладанні зразку поліетилену. На третій стадії (476–538 °С) інтенсивність розкладання органічних речовин знижується.

Збільшення вмісту поліетиленової плівки та зменшення картону в RDF В викликає зміни в характері деструкції органічних речовин. Вплив поліетилену, як

Таблиця 2. Термічні характеристики експериментального палива

Зразок	Видалення води		Термічне розкладання				Зола, % СМ	Нижча теплота згорання у сухому стані, МДж/кг
			органічних речовин		мінеральних речовин			
	інтервал, °С	вологість, %	інтервал, °С	вміст, % СМ	інтервал, °С	вміст, % СМ		
RDF A	23–166	6,28	166–530	91,32	530–1000	3,81	4,87	23,03
RDF B	20–166	4,69	166–538	92,69	538–1000	3,58	3,73	27,01
RDF C	20–165	5,31	165–573	93,66	573–1000	2,95	3,39	18,85
RDF D	23–164	4,13	164–560	92,73	560–1000	2,37	4,90	24,60

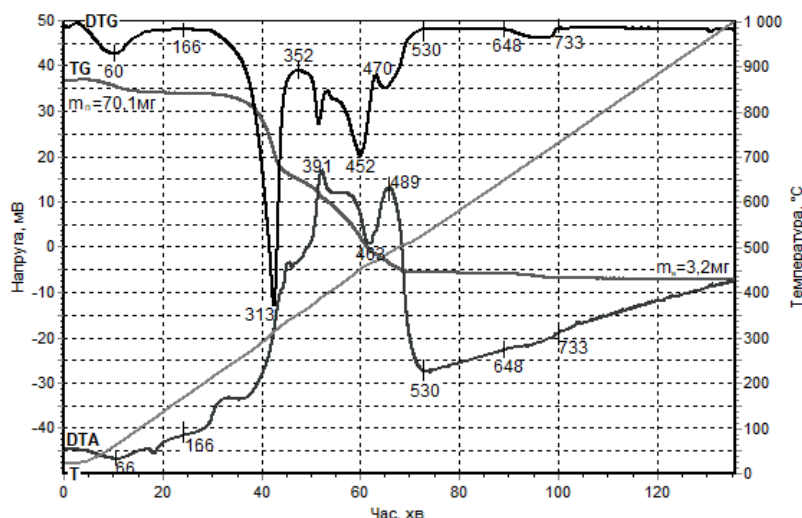


Рис. 2. Дериватограма RDF А

складової палива, стає більш відчутним та спричиняє потужний викид екологічно небезпечних [20] продуктів розкладання. В той же час теплота згорання RDF B, порівняно з RDF A, зростає на 17% за рахунок вкладу теплоти згорання поліетиленової плівки (42,56 МДж/кг).

Термічне розкладання RDF C (рис. 4), в якому замість поліетиленової плівки додали матеріал з пляшки ПЕТ, за загальним характером подібне RDF B. Видалення води відбувається в інтервалі 20...165 °C (табл. 3). На першій стадії розкладання органічних речовин (165...351 °C) спостерігається незначний приріст тепловиділення (крива DTA). На другій стадії спостерігається інтенсивна деструкція – швидкість розкладання збільшується у 2,4 рази (табл. 4) і досягає максимуму при 410 °C. Невеликий ендотермічний пік на фоні загальної генерації теплоти свідчить про незначний викид газоподібних продуктів розкладання за межі тигля. В інтервалі 457...573 °C (третя стадія) швидкість розкладання зменшується і повністю припиняється при досягненні 573 °C (криві DTG та DTA). В інтервалі

655...726 °C реєструється термічна дисоціація карбонату кальцію в картоні (криві DTG та DTA). Через заміну полімеру в складі RDF C теплота згорання палива зменшується до 18,85 МДж/кг.

Термічне розкладання зразка RDF D (рис. 5), в складі якого в однаковому співвідношенні присутні картон, поліетиленова плівка і фрагменти пляшки з ПЕТ, відбувається за закономірностями розкладання RDF C (рис. 4). Через низький вміст картону вологість RDF D є найнижчою серед всіх варіантів палив (табл. 2). Стадії розкладання органічних речовин суттєво відрізняються швидкостями розкладання (табл. 3), Оскільки сумарний вміст полімерних матеріалів у складі RDF D найбільший серед усіх зразків експериментальних палив, це викликає підвищення швидкості розкладання у другій стадії (351...455 °C) і утворення значної кількості газоподібних продуктів, які покидають межі розміщення зразка та викликають потужну втрату теплоти, що відображається в вигляді ендотермічного піка на кривій DTA з максимумом при 417 °C. Деструкція органічних

Таблиця 3. Інтервали температур, частки розкладених органічних речовин та середні швидкості розкладання палива

Зразок	1 стадія			2 стадія			3 стадія			Загальна середня швидкість розкладання, % CM/хв.
	інтервал, °C	частка, % CM	швидкість розкладання, % CM/хв.	інтервал, °C	частка, % CM	швидкість розкладання, % CM/хв.	інтервал, °C	частка, % CM	швидкість розкладання, % CM/хв.	
RDF A	166–352	43,99	1,87	352–470	38,05	2,41	470–530	9,28	0,96	1,86
RDF B	166–353	35,67	1,52	353–476	46,27	2,87	476–538	10,75	1,06	1,86
RDF C	165–351	31,56	1,30	351–457	41,45	3,06	457–573	20,65	1,22	1,71
RDF D	164–351	27,45	1,12	351–455	45,25	3,54	455–560	20,03	1,27	1,75

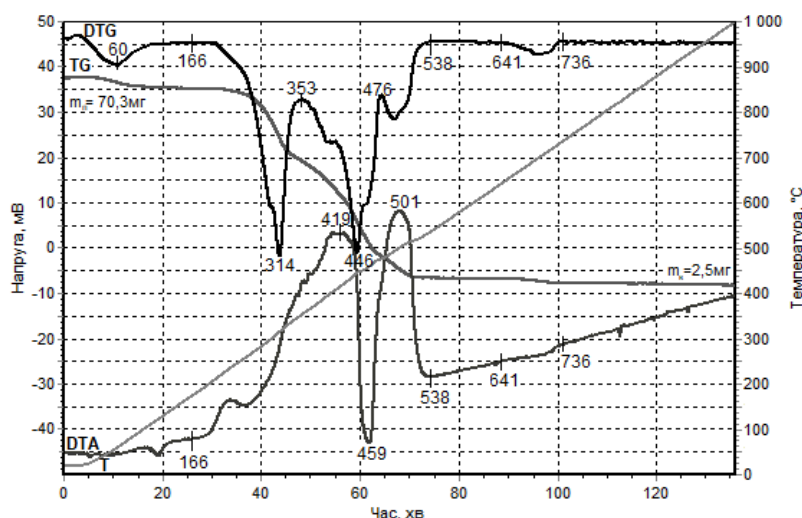


Рис. 3. Дериватограма RDF B

речовин закінчується при 560°C і супроводжується спадом тепловиділення. Теплота згорання такого палива становить $24,60 \text{ МДж/кг}$.

Суміщення кривих DTG та DTA зразків RDF (рис. 6) дає можливість наочно оцінити подібність та відмінність профілів цих кривих та порівняти деструкційні процеси, що відбуваються в паливі при його нагріванні до 1000°C .

Зневоднення всіх зразків RDF завершується приблизно за однакової температури (рис. 6а). Найвужчий інтервал розкладання органічних сполук (364 K) має RDF А. Це пояснюється наявністю в складі значної кількості картону, розкладання якого завершується раніше на 23 K ніж поліетилену і на 79 K ніж ПЕТ. Найширший інтервал (408 K) має RDF С, що відрізняється

найбільшим вмістом ПЕТ. Найвищі показники середньої швидкості розкладання мають RDF А та RDF В, в яких відсутній ПЕТ. З цього випливає, що збільшення вмісту ПЕТ в паливі викликає розширення температурного інтервалу розкладання та зменшення загальної швидкості розкладання органічних речовин.

Профілі DTA (рис. 6б) свідчать, що для RDF палив в складі яких із полімерів лише поліетилен (RDF А та RDF В), викид газоподібних речовин відбувається з ендотермічним піком за 460°C . Така ж поведінка і аналогічні максимуми ендотермічного піку спостерігались при розкладанні поліетиленової плівки. Наявність в паливі ПЕТ пришвидшує викид газоподібних речовин. Максимум ендотермічного піку реєструється при 410°C (RDF С) та 417°C (RDF D). В ПЕТ цей максимум реєструвався при 418°C .

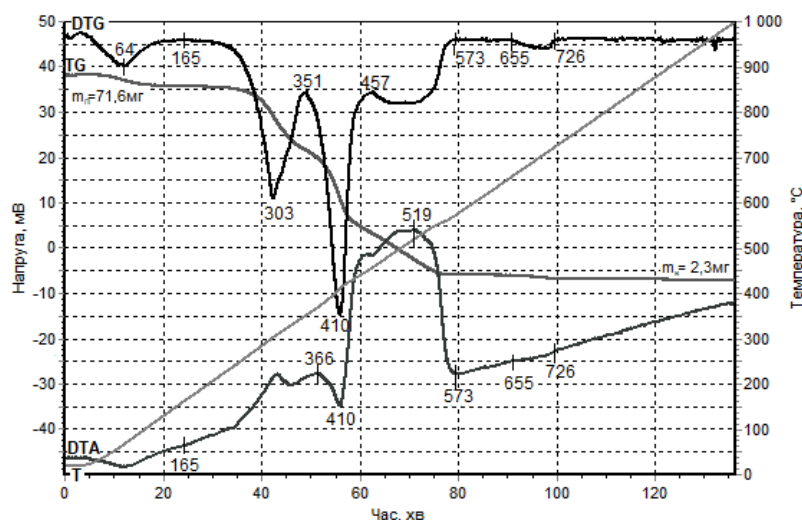


Рис. 4. Дериватограма RDF С

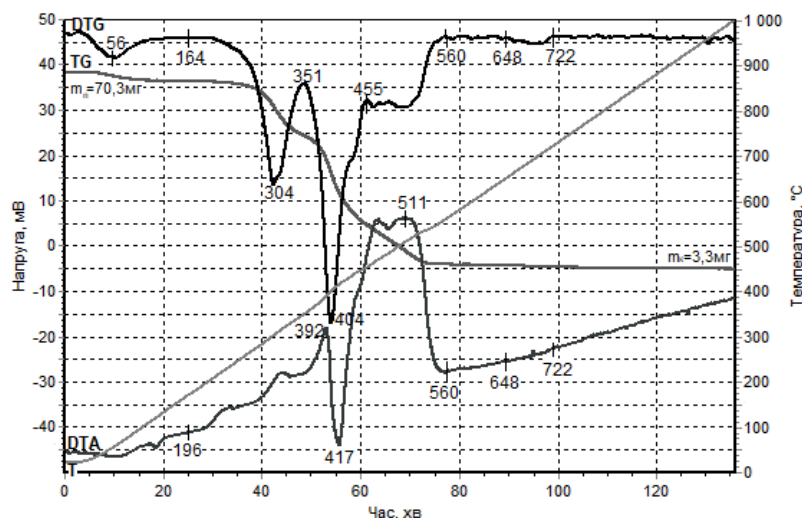


Рис. 5. Дериватограма RDF D

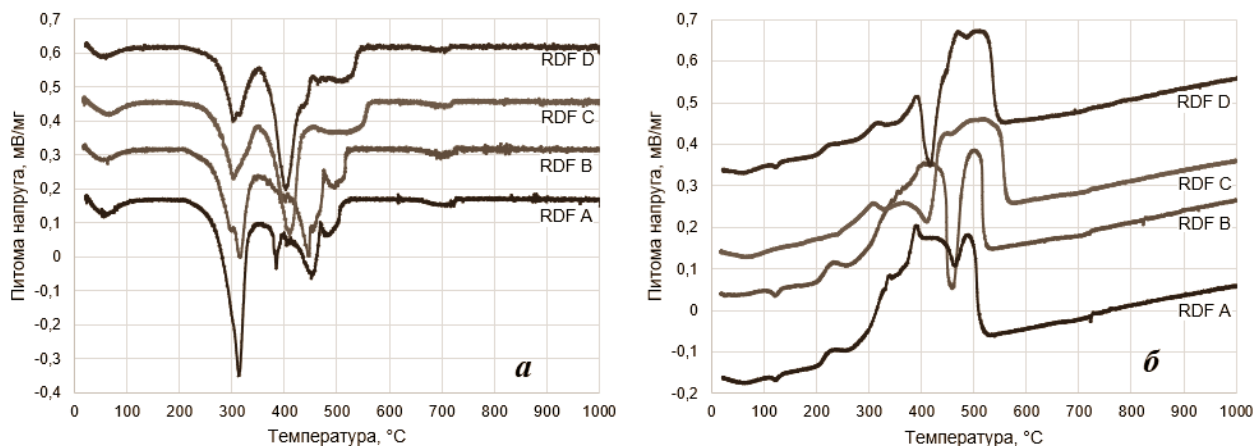


Рис. 6. Суміщення кривих DTG (а) та DTA (б)

Визначення теплоти згорання експериментальних складів палив показало (табл. 2), що найбільшу теплотворну здатність має RDF B, в якому основними компонентами у складі є поліетилен та картон, а найменшу – RDF C, де в такому ж співвідношенні знаходяться ПЕТ та картон.

Висновки

Дослідження, проведені методами термічного аналізу, дозволили визначити термічні характеристики палив з горючих складових твердих побутових відходів, а саме температури, що характеризують різні етапи деструкції, вологість та зольність зразків, теплоту згорання та швидкість термічного розкладання органічних речовин.

Аналіз отриманих результатів показав, що високий вміст поліетилену в RDF зумовлює не тільки високу теплотворну здатність палива, а й потужне виділення легких продуктів термічного розкладання, що покращує кінетику згорання. Поліетилентерефталат при термічному розкладанні також інтенсивно виділяє газоподібні продукти. Проте, збільшення вмісту поліетилентерефталату, через його значно меншу теплоту згорання в порівнянні з поліетиленом, знижує теплотворну здатність палива. Тому на етапі сортування сміття бажано виробити з нього максимально направляти на переробку.

Деструкція картону не викликає викидів шкідливих сполук, але потрібно враховувати, що високий вміст картону спричиняє підвищену зольність палива. Було встановлено, що для різних зразків паперу та картону зольність може змінюватись у межах 1,8...16 % СМ. Крім того необхідно також враховувати присутність в них крейди, яка для розкладання потребує додаткової енергії за доволі високих температур.

Грунтуючись на отриманих даних можна рекомендувати склад RDF A, який задовольняє умовам висунутим для палива, а також RDF B та RDF D при забезпеченні нейтралізації шкідливих викидів.

Виходячи з теплоти згорання та кінетики термічного розкладання експериментальних RDF раціональним було б мати в паливі максимальну кількість полімерів, особливо поліетилену. Однак на практиці вміст полімерів в паливі буде визначатись системою очищення викидів в атмосферу конкретного енергетичного підприємства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sarquah K., Narra S., Beck G., Bassey U., Antwi E., Hartmann M., Derkyi N.S.A., Awafo E.A., Nelles M. Characterization of municipal solid waste and assessment of its potential for refuse-derived fuel (RDF) valorization // *Energies*. – 2022. – V. 16, No. 1. – P. 200. <https://doi.org/10.3390/en16010200>.
2. Аналіз стану сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2022 рік [Електронний ресурс] // Міністерство інфраструктури України. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/news/34323.html>.
3. Haykiri-Acma H., Kurt G., Yaman S. Properties of biochars obtained from RDF by carbonization: Influences of devolatilization severity // *Waste and Biomass Valorization*. – 2016. – V. 8, No. 3. – P. 539–547. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9610-5>.
4. Kara M. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns // *Resources. Conservation and Recycling*. – 2012. – V. 68. – P. 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>.

5. Буляндра О., Гапонич Л., Голенко І., Топал О. Перспективи використання палива з твердих побутових відходів на ТЕЦ цукрових заводів // Наукові праці НУХТ. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 137–146. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2020_26_3_16.
6. ДСТУ EN 15359:2018. Тверде відновлювальне паливо. Технічні характеристики та класи (EN 15359:2011, IDT). Чинний від 2019-01-01. Вид. офіц.
7. Reza B., Soltani A., Ruparathna R., Sadiq R., Hewage K. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management // Resources, Conservation and Recycling. – 2013. – V. 81. – P. 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>.
8. Yang Y., Liew R.K., Tamothran A.M., Foong S.Y., Yek P.N.Y., Chia P.W., Van Tran T., Peng W., Lam S.S. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review // Environmental Chemistry Letters. – 2021. – V. 19, No. 3. – P. 2127–2140. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01177-5>.
9. Kobzar S.H., Topal O.I., Haponych L.S., Holenko I.L. Investigation of co-firing for fuel derived from municipal solid waste in a model combustion chamber // Elektronnoe modelirovanie. – 2020. – V. 42, No. 6. – P. 72–90. <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>.
10. Li X.-g., Ma B.-g., Xu L., Hu Z.-w., Wang X.-g. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres // Thermochimica Acta. – 2006. – V. 441, No. 1. – P. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.11.044>.
11. Sever Akdağ A., Atımtay A., Sanin F.D. Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples // Waste Management. – 2016. – V. 47. – P. 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.037>.
12. Kaniowski W., Taler J., Wang X., Kalemba-Rec I., Gajek M., Mlonka-Mędrala A., Nowak-Woźny D., Magdziarz A. Investigation of biomass, RDF and coal ash-related problems: Impact on metallic heat exchanger surfaces of boilers // Fuel. – 2022. – V. 326. – P. 125122. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125122>.
13. Zajemska M., Magdziarz A., Iwaszko J., Skrzyniarz M., Poskart A. Numerical and experimental analysis of pyrolysis process of RDF containing a high percentage of plastic waste // Fuel. – 2022. – V. 320. – P. 123981. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123981>.
14. Gug J., Cacciola D., Sobkowicz M. J. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics // Waste Management. – 2015. – V. 35. – P. 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.031>.
15. ДСТУ ISO 1928:2006. Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згоряння методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згоряння (ISO 1928:1995, IDT). На заміну ГОСТ 147-95 (ИСО 1928-76) ; чинний від 2008-07-01. Вид. офіц. К. : Держспоживстандарт України, 2008. 40 с.
16. EN ISO 21654:2021. Solid recovered fuels – Determination of calorific value. Replaces EN 15400:2011 ; effective from 2021-07-07. Official edition. 2021.
17. Aboulkas A., El harfi K., El Bouadili A. Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms // Energy Conversion and Management. – 2010. – V. 51, No. 7. – P. 1363–1369. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.017>.
18. Теплотворність різних видів палива: порівняння палива з теплою згоряння + таблиця теплотворності [Електронний ресурс] // Teplolife. – Режим доступу: <http://teplolife.com.ua/teplotvornist-riznih-vidiv-paliva-porivnyannya-paliva-z-teplotoyu-zgoryannya-tablitsya-teplotvornosti/>.
19. Корінчевська Т.В., Михайлик В.А., Корінчук Д.М. Термічне розкладання гранульованої деревини в умовах змінної газової атмосфери // Scientific Works. – 2019. – V. 83., No. 1. – P. 45–50. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1416>.
20. Jannelli E., Minutillo M. Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant // Waste Management. – 2007. – V. 27, No. 5. – P. 684–690. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.017>.

THE INFLUENCE OF COMBUSTIBLE COMPONENTS OF MUNICIPAL SOLID WASTE ON THE THERMAL CHARACTERISTICS OF RDF

Korinchevska T.V.¹, Mykhailyk, V.A.²,
Vorobiov L.Y³, Snezhkin Yu.F.⁴

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine

¹PhD (Engin.), Senior Researcher, tvkorin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6638-4743>

²PhD (Engin.), Leading Researcher, Senior Research Scientist, mhlk45@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2712-1382>

³Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, Senior Research Scientist, teplomer@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7958-6996>

⁴Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Institute, Professor, <http://orcid.org/0000-0001-7871-8774>, lsnezhkin@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2023.3>

One of the ways to solve the problem of accumulation of municipal solid waste is the use of its combustible components in the form of fuel. Refuse derived fuel (RDF) is an alternative solid fuel. It contains the combustible part of non-hazardous municipal or industrial waste left after the separation of secondary raw materials. The efficiency of using of RDF is determined by experimental research of its characteristics in the process of thermal decomposition. The kinetics of thermal destruction of samples of fuel and its components were investigated by methods of thermogravimetric and differential thermal analysis. The heat of combustion is determined by the standard method for solid fuels. Combustible components of municipal solid waste were investigated. These are various types of paper and cardboard, polymer and textile materials, leather and wood. Four RDF compositions were developed and investigated based on these components. As a result, the thermal characteristics of the fuels were determined, namely the temperatures characterizing the stages of destruction, the moisture and ash content of the samples, the heat of combustion and the rate of thermal decomposition of organic substances. It was found that all RDF samples are characterized by a three-stage destruction: dehydration and thermal decomposition of organic and mineral substances. It was determined that the thermal decomposition of

organic substances in fuel samples has a staged nature. The decomposition of organic matter occurs in three stages, which differ in rate and value of thermal effects. It was found that polyethylene in the RDF composition determines the high calorific value of the fuel and the powerful release of volatile products of thermal decomposition. This improves combustion kinetics. Polyethylene terephthalate has a similar effect on the decomposition kinetics of RDF, but has a significantly lower heat of combustion compared to polyethylene. It was established that a high content of cardboard causes an increased ash content of the fuel. The analysis of the conducted research made it possible to propose variants of the composition of RDF with satisfactory thermal characteristics.

Key words: municipal solid waste, RDF, thermal analysis, destruction, decomposition, heat of combustion.

References 20, tables 3, figures 6.

1. Sarquah K., Narra S., Beck G., Bassey U., Antwi E., Hartmann M., Derkyi N.S.A., Awafo E.A., Nelles M. Characterization of municipal solid waste and assessment of its potential for refuse-derived fuel (RDF) valorization. *Energies*, 2022. V. 16. No. 1. P. 200. <https://doi.org/10.3390/en16010200>.

2. [Analysis of the state of municipal waste management in Ukraine for 2022], [Ministry of Infrastructure of Ukraine]. URL: <https://mtu.gov.ua/news/34323.html>. (in Ukr.)

3. Haykiri-Acma H., Kurt G., Yaman S. Properties of biochars obtained from RDF by carbonization: Influences of devolatilization severity. *Waste and Biomass Valorization*, 2016. V. 8. No. 3. P. 539–547. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9610-5>.

4. Kara M. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources. Conservation and Recycling*, 2012. V. 68. P. 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>.

5. Buliandra O., Haponych L., Holenko I., Topal O. [Prospects of the use of fuel from municipal solid waste at tpp of sugar factories], [Scientific Works of NUFT], 2020. V. 26. No 3. P. 137–146. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2020_26_3_16. (in Ukr.)

6. DSTU EN 15359:2011. Solid recovered fuels – Specifications and classes (EN 15359:2011, IDT). Effective from 2019-01-01. Official edition.

7. Reza B., Soltani A., Ruparathna R., Sadiq R., Hewage K. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013. V. 81. P.105–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>.

8. Yang Y., Liew R.K., Tamothran A.M., Foong S.Y., Yek P.N.Y., Chia P.W., Van Tran T., Peng W., Lam S.S. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021. V. 19. No. 3. P. 2127–2140. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01177-5>.
9. Kobzar S.H., Topal O.I., Haponych L.S., Holenko I.L. Investigation of co-firing for fuel derived from municipal solid waste in a model combustion chamber. *Elektronnoe modelirovanie*, 2020. V. 42. No. 6. P. 72–90. <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>. (in Ukr.)
10. Li X.-g., Ma B.-g., Xu L., Hu Z.-w., Wang X.-g. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. *Thermochimica Acta*, 2006. V. 441. No. 1. P. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.11.044>.
11. Sever Akdağ A., Atımtay A., Sanin F.D. Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste Management*, 2016. V. 47. P. 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.037>.
12. Kaniowski W., Taler J., Wang X., Kalembe-Rec I., Gajek M., Mlonka-Mędrala A., Nowak-Woźny D., Magdziarz A. Investigation of biomass, RDF and coal ash-related problems: Impact on metallic heat exchanger surfaces of boilers. *Fuel*, 2022. V. 326. P. 125122. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125122>.
13. Zajemska M., Magdziarz A., Iwaszko J., Skrzyniarz M., Poskart A. Numerical and experimental analysis of pyrolysis process of RDF containing a high percentage of plastic waste. *Fuel*, 2022. V. 320. P. 123981. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123981>.
14. Gug J., Cacciola D., Sobkowicz M. J. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. *Waste Management*, 2015. V. 35. P. 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.031>.
15. DSTU ISO 1928:2006. [Solid mineral fuels. Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method, and calculation of net calorific value] (ISO 1928:1995, IDT). Replaces GOST 147-95 (ISO 1928-76) ; effective from 2008-07-01. Official edition. K., 2008. 40 p. (in Ukr.)
16. EN ISO 21654:2021. Solid recovered fuels – Determination of calorific value. Replaces EN 15400:2011 ; effective from 2021-07-07. Official edition. 2021.
17. Aboulkas A., El harfi K., El Bouadili A. Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 2010. V. 51, No. 7. P. 1363–1369. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.017>.
18. [Calorific value of different types of fuel: comparison of fuel with heat of combustion + calorific value table], *Teplotlife*. URL: <http://teplotlife.com.ua/teplotvornist-riznih-vidiv-paliva-porivnyannya-paliva-z-teplotoyu-zgoryannya-tablitsya-teplotvornosti/> (in Ukr.)
19. Korinchevska T., Mykhailik V., Korinchuk D. [Thermal decomposition of granulated wood in the conditions of variable gaseous atmosphere], *Scientific Works*, 2019. V. 83. No. 1. P. 45–50. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1416>. (in Ukr.)
20. Jannelli E., Minutillo M. Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant. *Waste Management*, 2007. V. 27. No. 5. P. 684–690. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.017>.

Отримано 04.10.2023
Received 04.10.2023

Прийнято до друку 23.11.2023
Accepted for publication 23.11.2023