

ТЕРМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЛИВА З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Корінчевська Т.В., к.т.н., Михайлик В.А., к.т.н., с.н.с., Снежкін Ю.Ф., д.т.н., професор
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. Критична ситуація з твердими побутовими відходами в Україні потребує невідкладних заходів з вирішення цієї проблеми. Затвердженні нормативні документи передбачають зростання рівня перероблення відходів, в тому числі, за рахунок створення об'єктів з виробництва палива з твердих побутових відходів (RDF). Відповідно до морфологічного складу твердих побутових відходів основними компонентами RDF палива є такі горючі компоненти як папір і картон, текстиль, шкіра і гума, полімерні матеріали, деревина. Спалювання палива на основі таких відходів потребує вивчення його фізико-хімічних властивостей, кінетики термічного розкладання компонентів та генерування теплоти. В статті представлені результати термічного аналізу запропонованого RDF палива та його компонентів (пакувальний картон, текстильна тканина, натуральна шкіра, поліетиленова плівка та деревина сосни). Методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу визначено температурні інтервали зневоднення, термічного розкладання органічних і мінеральних речовин, питомий тепловий ефект та середні швидкості термічного розкладання органічних речовин, вологість і зольність зразків. Встановлено, що термічне розкладання органічних речовин в RDF паливі та його компонентах має стабільний характер. Стадії відрізняються за температурними інтервалами і швидкістю розкладання. Найвища загальна середня швидкість розкладання органічних речовин спостерігалась у зразка поліетиленової плівки, а найнижча – у натуральної шкіри. Виявлено, що наявність поліетиленової плівки в складі RDF палива покращує кінетику розкладання. Були обчислені умовні питомі теплові ефекти термічного розкладання зразків палива та його компонентів. Встановлено, що найбільше значення питомого теплового ефекту має шкіра, а найменше – картон. Аналіз отриманих результатів вказує на те, що збільшення вмісту деревини, натуральної шкіри, текстильних і полімерних матеріалів може підвищити теплотворну здатність палива. Показано, що величини умовного питомого теплового ефекту розкладання RDF палива та деревини сосни мають близькі значення. Це свідчить про хороші теплові показники запропонованого складу палива.

Ключові слова: тверді побутові відходи, RDF паливо, термічний аналіз, розкладання, теплота розкладання органічних речовин.

Вступ. В Україні гостро стоїть проблема поводження з твердими побутовими відходами, які щорічно накопичуються у розмірі 10–15 млн тон. Лише 4–5 % з цього обсягу відправляється на переробку, 1–2 % — на спалювання, а більше 90% спрямовується на полігони та звалища [1]. Більша частина полігонів та звалищ перенавантажені та не відповідають екологічним вимогам.

Таблиця 1

Середній морфологічний склад ТПВ

№ з/п	Тверді побутові відходи	Обсяг, %
1	Харчові відходи	30 – 45
2	Папір та картон	5 – 15
3	Полімерні матеріали	8 – 17
4	Скло	9 – 14
5	Чорні та кольорові метали	0,5 – 2,5
6	Текстильні матеріали	2 – 5
7	Деревина	0,1 – 2
8	Гума, шкіра	0,5 – 1,5
9	Дрібні будівельні відходи	0,3 – 3,5
10	Вуличний зміт, листя	0 – 6
11	Гігієнічні засоби	2,3 – 3,5
12	Комбіновані відходи	0,4 – 1
13	Небезпечні відходи	0,1 – 0,5
14	Інше	2 – 22

Відповідно до Угоди про асоціацію з ЄС, були ухвалені нормативні документи, що мають забезпечити дотримання вимог рамкової Директиви 2008/98/ЄС про відходи. Зокрема, Національна стратегія управління відходами в Україні [2] та Закон України «Про управління відходами» [3] передбачають перехід від видалення відходів на полігони до системи комплексного поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ). Однією з задач Стратегії є зростання рівня перероблення ТПВ, а саме введення в експлуатацію сміттєпереробних заводів та створення об'єктів з виробництва палива з твердих побутових відходів (RDF). RDF (refuse derived fuel) складається з горючих компонентів ТПВ (полімерні матеріали, пластик, папір, картон, етикетки тощо). Це дає можливість отримання додаткового джерела енергії, що заміщує викопні види палива.

Властивості та обсяг ТПВ непостійні і залежать від декількох параметрів, зокрема пори року, місця утворення тощо. Середньорічний морфологічний склад, характерний для великих міст України представлено в табл. 1 [4]. Найбільша частка — це харчові відходи, які важко використати в якості RDF палива. Якщо

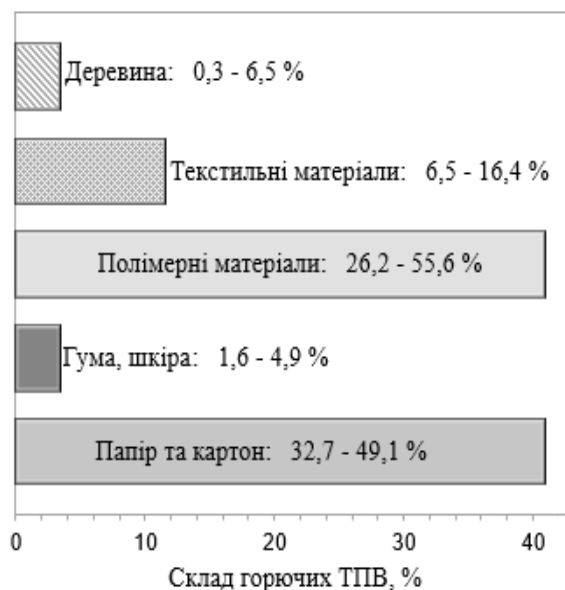


Рис. 1 – Усереднений морфологічний склад горючих ТПВ

виділити горючі складові, то виходячи з табл. 1 отримаємо усереднений морфологічний склад твердих побутових відходів, які можуть використовуватися як сировина для RDF палива (рис. 1).

Національною стратегією управління відходами також передбачено створення умов для належного поводження з відходами сільського господарства рослинного походження, а саме використання відходів біомаси для виробництва енергії. Сировиною для виробництва біопалива є переважно відходи лісової та деревообробної промисловості та сільськогосподарські відходи.

Одним з основних показників, яке обмежує використання RDF є викиди парникових газів. Тому прийнято спалювати RDF паливо разом з біомасою для зменшення загальної кількості зареєстрованих викидів CO₂, оскільки біомаса вважається вуглецево нейтральною [5, 6].

Дослідження характеристик RDF палива активно проводяться у світі [6–8, тощо], проте існують проблеми, пов'язані із забезпеченням якості та точним визначенням термічних характеристик палива через його неоднорідний склад. Спалювання RDF також потребує всебічного вивчення його теплотехнічних характеристик, зокрема дослідження фізико-хімічних властивостей.

кінетики термічного розкладання компонентів та генерування теплоти.

Матеріали та методи. Визначення температурних інтервалів, дослідження кінетики зневоднення, термічного розкладання органічних та мінеральних речовин та оцінювання теплових ефектів проводили за допомогою методів термогравіметричного та диференціального термічного аналізу в дериватографі «Q-1000».

Нагрівання зразків від кімнатної температури до 1000 °C виконували зі швидкістю 7,4 К/хв. Зразки розміщували в відкритий конічний платиновий тигель. В тиглі порівняння знаходилась інертна речовина — Al₂O₃. Збір та обробку інформації здійснювали за допомогою прикладної комп'ютерної програми «Derivatograph» та програмних пакетів «Origin» та «Microsoft Excel».

Виходячи з середнього морфологічного складу ТПВ (табл. 1) термічному аналізу були піддані горючі ТПВ, а саме: картон, текстильна тканина (80% віскози та 20% еластану), натуральна шкіра, деревина сосни, як полімерний матеріал було взято поліетиленову плівку. Зразок картону вилучений з упаковки для харчових продуктів, зразки тканини та шкіри — з одягу та взуття, що були у вжитку, зразок поліетиленової плівки — з поліетиленового пакету, зразок деревини був виготовлений з щепи сосни. Всі матеріали перед дослідженням подрібнені до лінійного розміру ≤0,5 мм. На основі попередньої оцінки та аналізу літературних даних, як варіант, запропоновано для дослідження експериментальне RDF паливо наступного складу: 29% пакувального картону, 13% текстильної тканини, 4% натуральної шкіри, 31% поліетиленової плівки та 23% деревини сосни.

Вологість матеріалів компонентів RDF палива була рівноважна за відносної вологості повітря 40% та температури 20 °C.

Результати досліджень. Процес термічного розкладання представлений кривими на дериватограмах (рис. 2–4), що відображають зміну маси зразків (ТГ), швидкість зміни маси (ДТГ) та різницю між температурами зразка та інертної речовини (ДТА) в процесі нагрівання.

Термічна деструкція картону (рис. 2а) проходить в три етапи (табл. 2), які супроводжуються тепловими ефектами (крива ДТА). В інтервалі 20–169 °C спостерігається ендотермічний пік видалення води.

Розкладання органічних речовин починається одразу після зневоднення і має дві стадії, які відрізняються швидкостями розкладання (табл. 3). На першій стадії зі швидкістю 2,80% сухого матеріалу/хв. (СМ/хв.) і постійним наростанням тепловиділення (крива ДТА) розкладається 58,56% СМ. Швидкість розкладання досягає свого максимуму при 324 °C. На другій стадії (344–493 °C) спостерігається зниження середньої швидкості розкладання до 1,29% СМ/хв., деградує 29,08% СМ. Незважаючи на зниження швидкості розкладання інтенсивність тепловиділення при цьому зростає через деструкцію компонентів з більш високою теплотворною здатністю. Завершується розкладання органічних речовин при 493 °C.

На третьому етапі (493–1000 °C) зростання температури викликає розкладання мінеральних речовин, що входять до складу картону (4,89% СМ). В інтервалі 645–753 °C розкладається більша частина мінеральних речовин (4,08% СМ). Процес супроводжується ендотермічним ефектом (крива ДТА) і співпадає з інтервалом температур термічної дисоціації карбонату кальцію (крейда), який використовується при виробництві паперу та картону. Вміст золи в картоні склав 7,47% СМ.

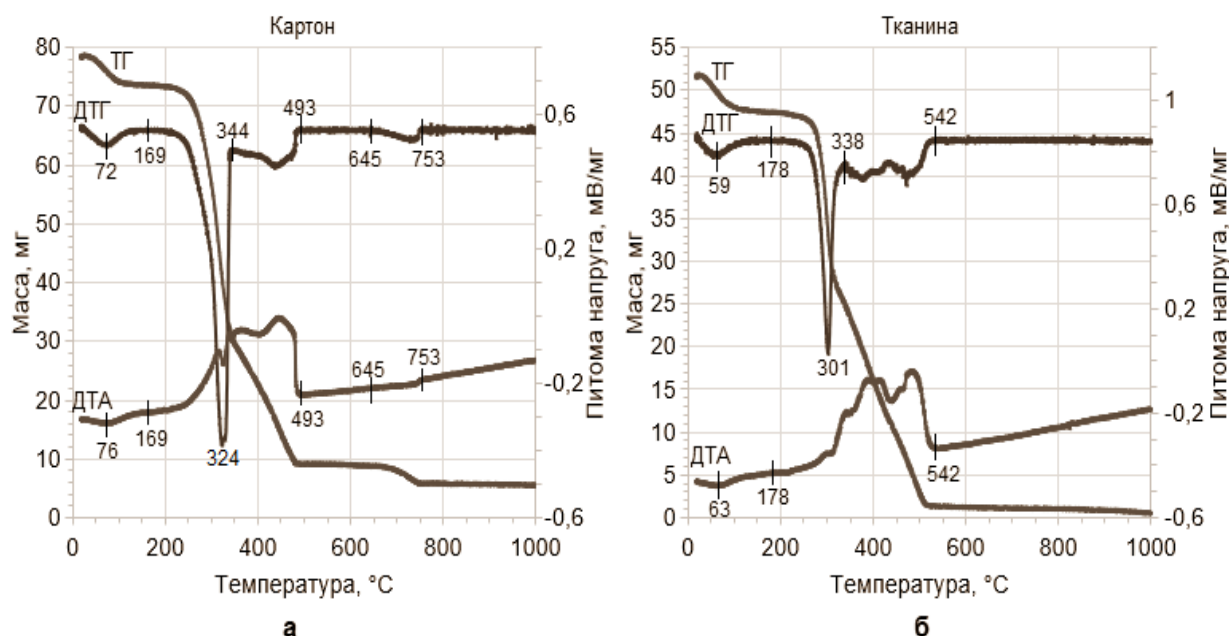


Рис. 2 – Дериватограми картону (а) та текстильної тканини (б)

Аналіз дериватограми зразка текстильної тканини (рис. 2б) показує, що зневоднення матеріалу проходить в інтервалі 20–178 °С з максимумом швидкості при 59 °С. Термічне розкладання органічних речовин відбувається у дві стадії (табл. 2) і має характер кривих подібний картону (рис. 2а). На першій стадії розкладається менше органічних речовин (47,26% СМ) ніж у другій (49,79% СМ), хоча швидкість зменшується з 2,33 до 1,74% СМ/хв. (табл. 3). Часка мінеральних речовин, що розкладаються, та вміст золи в тканині значно менша, ніж у картоні (табл. 2).

Таблиця 2

Результати аналізу термічного розкладання

Матеріал	Видалення води		Термічне розкладання						Зола, % СМ
			органічних речовин				мінеральних речовин		
	інтервал, °С	вологість, %	1 стадія		2 стадія		інтервал, °С	вміст, % СМ	
			інтервал, °С	вміст, % СМ	інтервал, °С	вміст, % СМ			
Картон	20–169	6,0	169–344	58,56	344–493	29,08	493–1000	4,89	7,47
Текстильна тканина	20–178	7,96	178–338	47,26	338–542	49,79	542–1000	1,90	1,05
Натуральна шкіра	20–156	10,08	156–367	41,42	367–595	53,90	595–1000	1,42	3,26
Поліетилена плівка	–	0	211–402	20,36	402–516	75,50	516–1000	2,16	1,98
Деревина сосни	20–171	6,94	171–346	58,64	346–525	39,83	525–1000	0,68	0,85
RDF паливо	20–165	5,17	165–357	41,47	357–534	51,32	534–1000	3,69	3,52

Дериватографічні криві термічного розкладання шкіри (рис. 3а) мають характер, подібний до кривих картону та тканини. В інтервалі 20–156 °С видалається вода (табл. 2). Через гідрофільність натуральна шкіра має досить високу рівноважну вологість (10,08%) та порівняно низьку термічну стійкість (156 °С).

Органічні речовини шкіри також розкладаються в дві стадії. На відміну від зразків картону та тканини, на другій стадії розкладається більше половини органічних речовин (табл. 2, 3). В інтервалі 595–1000 °С відмічається розкладання невеликої кількості мінеральних речовин (1,42% СМ). Вміст золи в шкірі порівняно високий і становить 3,26% СМ.

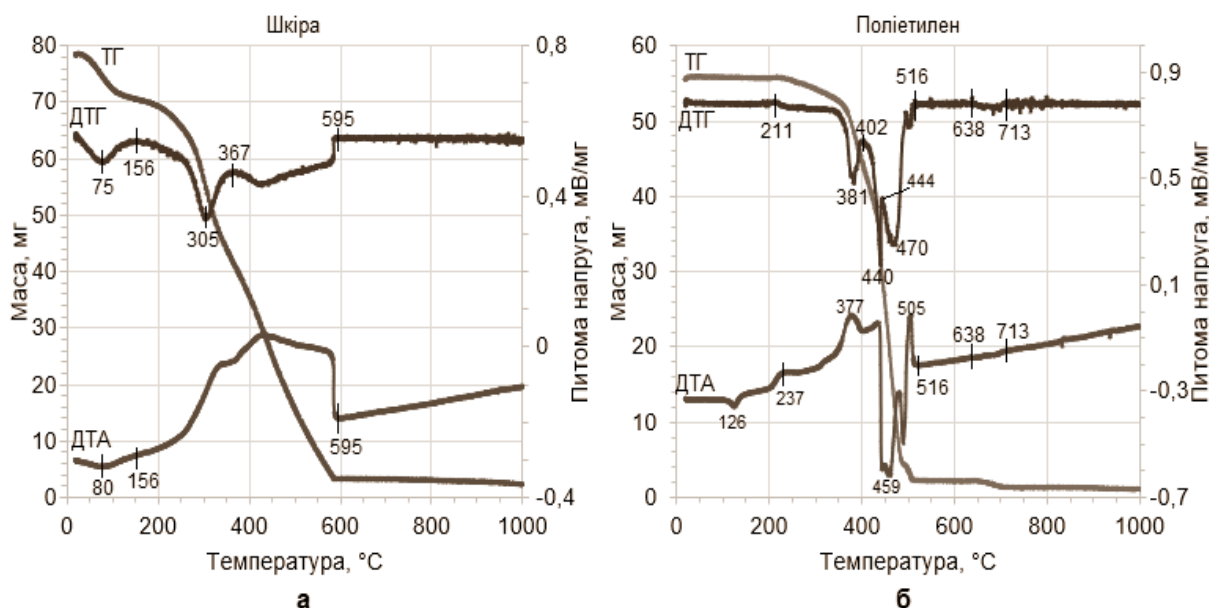


Рис. 3 – Дериватограми натуральної шкіри (а) та поліетиленової плівки (б)

Дериватограма поліетиленової плівки (рис. 3б) суттєво відрізняється. Горизонтальні ділянки на кривих ТГ та ДТГ до 211 °С свідчать, що в матеріалі відсутня вода. На кривій ДТА в точці при 126 °С реєструється стрибок теплоємності (склоперехід), поліетиленова плівка набуває еластичного стану.

Термічна деструкція поліетилену починається з 211 °С і теж має стадійний характер (табл. 2 та 3). Перша стадія — з максимумом швидкості розкладання при 381 °С, завершується при 402 °С. На цій стадії з порівняно невеликою швидкістю (0,85% СМ/хв.) розкладається всього 20,36% СМ. Подальше підвищення температури викликає інтенсивне утворення газоподібних речовин, які в певний момент (~438 °С) виходять за межі тигля. Це призводить до різкої втрати теплоти тиглем, що відображається на кривій ДТА в вигляді хибного ендотермічного піка з максимумом при 459 °С. Друга стадія відзначається значно більшою середньою швидкістю (4,42% СМ/хв.) та глибиною розкладання — 75,50% СМ.

В поліетиленовій плівці виявлені мінеральні речовини, розклад яких спостерігається в межах 516–1000 °С (табл. 2). Більша частина з них (1,62% СМ) розкладається в інтервалі 638–713 °С і має виражений ендотермічний характер (крива ДТА), що найбільш вірогідно пов'язано дисоціацією карбонату кальцію. Вміст золи в плівці становить 1,98% СМ.

Таблиця 3

Кінетика та умовний питомий тепловий ефект термічного розкладання органічних речовин компонентів та RDF палива

Матеріал	Середня швидкість розкладання, % СМ/хв.		Загальна середня швидкість розкладання, % СМ/хв.	Умовний питомий тепловий ефект термічного розкладання, мВ·с·мг ⁻¹ СМ
	1 стадія	2 стадія		
Картон	2,80	1,29	2,01	395,6
Текстильна тканина	2,33	1,74	1,98	467,0
Натупальна шкіра	1,56	1,67	1,62	622,9
Поліетиленова плівка	0,85	4,42	2,33	456,9
Деревина сосни	2,75	1,52	2,07	488,6
RDF паливо	1,71	2,04	1,88	434,1

На рис. 4а представлена дериватограма деревини сосни, яка є класичним зразком термічної деструкції природного рослинного матеріалу, де основними компонентами є геміцелюлоза, целюлоза та лігнін [9]. Дегідратація деревини відбувається в інтервалі 20–171 °С, з максимумом швидкості зневоднення при 77 °С.

На другому етапі відбувається розпад органічних речовин у дві стадії — низькотемпературну (171–346 °С) та високотемпературну (346–525 °С), які супроводжується інтенсивним тепловиділенням. Максимальна середня швидкість розкладання 2,75% СМ/хв. реєструється на першій стадії, коли деструктивних змін зазнає 58,64% СМ (табл. 3). Пік швидкості розкладання спостерігається в низькотемпературній стадії при 331 °С. Подальше нагрівання деревини викликає в інтервалі 525–1000 °С розкладання незначної кількості мінеральних речовин (0,68% СМ). Вміст золи в зразку деревини сосни визначений на рівні 0,85% СМ.

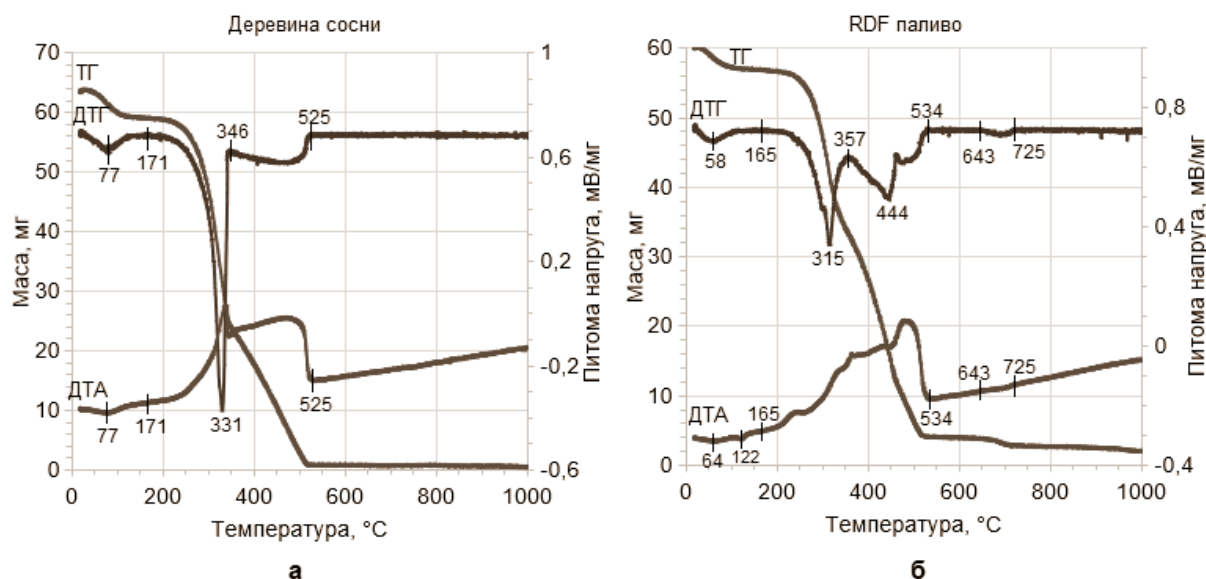


Рис. 4 – Деривитограми деревини сосни (а) та RDF палива (б)

Термічне розкладання RDF палива представлено деривитограмою на рис. 4б. Бачимо, що видалення води з RDF палива відбувається в інтервалі температур 20–165 °С, близькому до тих, що були визначені в окремих компонентах. На кривих деривитограми палива відображаються процеси, що властиві компонентам палива. Так, на кривій ДТА при 122 °С спостерігається скачок теплоємності, що відповідає температурі склування в поліетиленовій плівці. Зниження температури склування з 126 до 122 °С пов'язане з присутністю в зразку інших компонентів палива. Процес дисоціації карбонату кальцію відмічений в інтервалі 643–725 °С, практично в тих же межах температур як в картоні та поліетиленовій плівці.

Розкладання органічних речовин RDF палива відбувається також у дві стадії. На першій стадії спостерігається дещо нижча швидкість розкладання, ніж у другій (табл. 2 та 3), що є наслідком більш глибоких процесів деструкції у другій стадії та впливу кінетики розкладання поліетиленової плівки.

Генерування теплоти наростає у другій стадії і досягає свого максимуму при 482 °С (крива ДТА). Термічно нестійкі мінеральні речовини в компонентах палива в інтервалі 534–1000 °С деградують з утворенням більш простих молекул. Вміст золи в RDF паливі визначений на рівні 3,52 % СМ.

Аналіз кінетики термічного розкладання органічних речовин компонентів RDF палива показав (табл. 3), що на першій стадії, за нижчих температур, вищу швидкість розкладання мають картон, текстильна тканина та деревина сосни. Для шкіри та поліетиленової плівки характерне більш активне розкладання у другій стадії. Найвищу швидкість розкладання в першій стадії має картон, а в другій — поліетиленова плівка.

Найвища загальна середня швидкість розкладання органічних речовин 2,33 % СМ/хв. виявилась у зразка поліетиленової плівки, а найнижча — у натуральної шкіри. Незважаючи на те, що у 65 % компонентів палива реєструється більша швидкість розкладання органічних речовин в першій стадії, через інтенсивну кінетику розкладання поліетиленової плівки у другій стадії розкладання RDF палива в другій стадії зростає.

Для оцінки теплових характеристик палива та його компонентів за допомогою прикладної програми «Derivatograph» були визначені умовні теплові ефекти термічного розкладання за методикою, викладеною в [10], і представлені в табл. 3. Бачимо, що найбільше значення питомого теплового ефекту має шкіра, а найменше — картон, що є наслідком порівняно високої його зольності та вмісту крейди, на термічну дисоціацію якої витрачається енергія.

Знаючи умовні питомі теплові ефекти термічного розкладання компонентів RDF палива та їх вміст в паливі було розраховано умовний тепловий ефект термічного розкладання самого палива, який склав 453,6 мВ·с·мг⁻¹ СМ. Порівнюючи його із значенням отриманим експериментально (434,1 мВ·с·мг⁻¹ СМ), бачимо їх хороший збіг, абсолютні величини відрізняються лише на 4,3 % (табл. 3).

Висновки. Методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу в інтервалі 20–1000 °С досліджено RDF паливо та його компоненти: пакувальний картон, текстильну тканину, натуральну шкіру, поліетиленову плівку та деревину сосни. Визначено температурні інтервали зневоднення, термічного розкладання органічних і мінеральних речовин, вологість та вміст золи.

Показано, що термічне розкладання органічних речовин в компонентах та RDF паливі має стадійний характер. Стадії відрізняються як температурними інтервалами, так і швидкістю розкладання. Поліетиленова плівка в складі RDF палива покращує його кінетику розкладання.

Оцінено теплові ефекти термічного розкладання органічних речовин RDF палива і його компонентів. Отримані результати вказують на те, що для підвищення теплотворної здатності палива бажано збільшувати вміст в ньому таких компонентів як деревина, текстильні і полімерні (поліетиленова плівка) матеріали та

натуральна шкіра. Збільшення в складі RDF палива картону буде зменшувати теплотворну здатність палива через наявність в складі картону (паперу) крейди та високий вміст золи.

Виконано порівняння розрахункового та експериментального умовних питомих теплових ефектів розкладання органічних речовин RDF палива. Результатами порівняння доведено, що методика визначення питомого теплового ефекту термічного розкладання органічних речовин в дериватографі заслуговує того, щоб її використовувати для орієнтовної оцінки теплотворної здатності твердих палив органічного походження.

Величина умовного питомого теплового ефекту розкладання використаного RDF палива близька до величини умовного питомого теплового ефекту розкладання деревини сосни, що свідчить про хороші теплові показники запропонованого складу палива.

References

1. *Ekspert rozpoviv, yak vyrishyty problemu tverdykh pobutovykh vidkhodiv v Ukraini.* (2021). EcoPolitic. <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ekspert-rozpoviv-yak-virishiti-problemu-tverdih-pobutovih-vidhodiv-v-ukraini/>
2. Pro skhvalennia Natsionalnoi stratehii upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 roku, Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 820-p (2020) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p#Text>
3. Pro upravlinnia vidkhodamy, Law of Ukraine; Specification 2320-IX, comes into force (2022) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
4. Buliandra, O., Haponych, L., Holenko, I., & Topal, O. (2018). Perspektyvy vykorystannia palyva z tverdykh pobutovykh vidkhodiv na TETs tsukrovyykh zavodiv. *Naukovi pratsi NUKhT*, 26(3), 138–146. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2020_26_3_16
5. 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. (2021). Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2127–2140. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01177-5>
6. Zajemska, M., Magdziarz, A., Iwaszko, J., Skrzyniarz, M., & Poskart, A. (2022b). Numerical and experimental analysis of pyrolysis process of RDF containing a high percentage of plastic waste. *Fuel*, 320, 123981. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123981>
7. Kaniowski, W., Taler, J., Wang, X., Kalembe-Rec, I., Gajek, M., Mlonka-Mędrala, A., Nowak-Woźny, D., & Magdziarz, A. (2022). Investigation of biomass, RDF and coal ash-related problems: Impact on metallic heat exchanger surfaces of boilers. *Fuel*, 326, 125122. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125122>
8. Sever Akdağ, A., Atımtay, A., & Sanin, F. D. (2016). Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste Management*, 47, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.037>
9. Korinchevska, T., & Mykhailyk, V. (2020). Thermal decomposition of granulated fuel from miscanthus. *Scientific Works*, 84(1), 10–15. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1862>
10. Mykhailyk, V.A. Snezhkin, Yu.F., Korinchuk, D.M. (2014). Termichne rozkladannia hranul palyva na osnovi torfu ta derevyiny. *Promyslova teplotekhnika*, 36(2), 13-21

THERMAL CHARACTERISTICS OF FUEL FROM MUNICIPAL SOLID WASTE

Korinchevska T., Ph.D., Mykhailyk V., Ph.D., Senior Research Scientist,
Snezhkin Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. The critical situation with municipal solid waste in Ukraine requires urgent measures to solve this problem. The approved regulatory documents provide for an increase in the level of waste processing, including through the creation of facilities for the production of refuse derived fuel (RDF) from municipal solid waste. According to the morphological composition of municipal solid waste, the main components of RDF are such combustible components as paper and cardboard, textiles, leather and rubber, polymer materials, and wood. Combustion of fuel based on such wastes requires the study of its physicochemical properties, the kinetics of thermal decomposition of components and heat generation. The article presents the results of the thermal analysis of the proposed RDF and its components (packaging cardboard, textile fabric, natural leather, polyethylene film and pine wood). The temperature intervals of dehydration and thermal decomposition of organic and mineral substances, specific thermal effect and average rates of thermal decomposition of organic substances, moisture and ash content of the samples were determined by thermogravimetry and differential thermal analysis. It was established that the thermal decomposition of organic substances in RDF and its components has a staged nature. The stages differ in temperature intervals and the rate of decomposition. The highest average rate of decomposition of organic substances was observed for polyethylene film, and the lowest for natural leather. It was found that the presence of a polyethylene film in the composition of RDF improves the decomposition kinetics. The conditional specific thermal effects of thermal de-

composition of fuel samples and its components were calculated. It was established that leather has the highest value of the specific thermal effect, and cardboard has the lowest value. Analysis of the obtained results indicates that increasing the content of wood, natural leather, textile and polymer materials can increase the calorific value of the fuel. It is shown that the values of the conditional thermal specific effect of the decomposition of RDF and pine wood have close values. This indicates good thermal performance of the proposed fuel composition.

Key words: municipal solid waste, refuse derived fuel (RDF), thermal analysis, decomposition, heat of decomposition of organic substances.

Список використаної літератури

1. Експерт розповів, як вирішити проблему твердих побутових відходів в Україні. *ЕкоПолітика*. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/ekspert-rozpoviv-yak-virishiti-problemu-tverdih-pobutovih-vidhodiv-v-ukraini/> (дата звернення: 15.05.2023).
2. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 08.11.2017 р. № 820-р : станом на 17 верес. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p#Text> (дата звернення: 15.05.2023).
3. Про управління відходами : Закон України; Перелік від 20.06.2022 № 2320-IX, набирає чинності. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 16.05.2023).
4. Перспективи використання палива з твердих побутових відходів на ТЕЦ цукрових заводів / О. Буляндра та ін. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Т. 26, № 3. С. 138–146. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npukht_2020_26_3_16. (дата звернення: 10.05.2023).
5. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review / Y. Yang et al. *Environmental chemistry letters*. 2021. Vol. 19, no. 3. P. 2127–2140. DOI: 10.1007/s10311-020-01177-5.
6. Numerical and experimental analysis of pyrolysis process of RDF containing a high percentage of plastic waste / M. Zajemska et al. *Fuel*. 2022. Vol. 320. P. 123981. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123981.
7. Investigation of biomass, RDF and coal ash-related problems: impact on metallic heat exchanger surfaces of boilers / W. Kaniowski et al. *Fuel*. 2022. Vol. 326. P. 125122. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125122.
8. Sever Akdağ A., Atımtay A., Sanin F. D. Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste management*. 2016. Vol. 47. P. 217–224. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.08.037.
9. Корінчевська Г. В., Михайлик В. А. Термічна деструкція гранульованого палива з міскантуса. *Scientific Works*. 2020. Т. 84, № 1. С. 10–15. DOI: 10.15673/swonaft.v84i1.1862.
10. Михайлик В. А., Снежкін Ю. Ф., Корінчук Д. М. Термічне розкладання гранул палива на основі торфу та деревини. *Промислова теплотехніка*. 2014. Т. 36, № 2. С. 13–21.

Отримано в редакцію 15.06.2023
Прийнято до друку 26.09.2023

Received 15.06.2023
Approved 26.09.2023