

УДК 543.57: 620.92:628.4.04-405
DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v89i1.3229>

ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНОГО КОМПОЗИТНОГО ПАЛИВА

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

Анотація. Утилізація твердих побутових відходів є актуальною задачею сьогодення. Використання відходів як сировини для створення альтернативного палива є перспективним напрямом переробки, що дозволить частково замінити тверде традиційне паливо. Для зменшення небезпечних викидів під час спалювання палива з побутових відходів пропонується додавати біомасу. В той же час підбір складу композитного палива на основі твердих побутових відходів та біомаси, що задовольнятиме потреби споживача, потребує вивчення його термічних властивостей та кінетики процесу деструкції. Як сировину для створення експериментального палива використовували основні горючі компоненти твердих побутових відходів (картон, поліетилен, тканину) та відходи сільськогосподарської діяльності (пожнивні рештки кукурудзи). Дослідження термічних характеристик палив виконані методами термогравіметрії та диференційного термічного аналізу. Визначено характерні температури етапів деструкції: дегідратації, розкладання органічних та мінеральних речовин. Отримано дані про вміст води, органічних та мінеральних речовин та золи, обчислено швидкості термічної деструкції органічних речовин на різних фазах нагрівання, визначено теплоту згорання. Виконано порівняння кінетики розкладання та теплової генерації на різних стадіях термічної деструкції органічних речовин. Аналіз одержаних результатів показав, що досліджені зразки композитного палива мають подібний характер термічної деструкції, оскільки склад палива обмежується поліетиленом та лігноцелюлозною сировиною. Встановлено, що присутність поліетилену в паливі зумовлює високу теплотворну здатність. Отримані результати досліджень дозволили рекомендувати експериментальні склади палива до виробництва та використання з забезпеченням контролю технології спалювання, що гарантує нейтралізацію небезпечних продуктів згорання. Була запропонована технологія виготовлення альтернативного композитного палива на основі твердих побутових та сільськогосподарських відходів.

Ключові слова: термогравіметрія, диференційний термічний аналіз, альтернативне паливо, тверді побутові відходи, рештки кукурудзи, розкладання, теплота згорання.

Вступ. Внаслідок загального збільшення населення планети, покращення якості життя та широкого розвитку промисловості кількість твердих побутових відходів (ТПВ) постійно зростає. Неправильно утилізовані відходи є екологічно небезпечними, а також займають занадто багато земельних площ. Тому Європейська Комісія вимагає скорочення захоронення відходів для зменшення забруднення поверхневих і ґрунтових вод, ґрунту та повітря, а також зменшення парникового ефекту.

Традиційні методи утилізації та переробки ТПВ включають захоронення, спалювання та біологічну очистку. Проте ці методи мають певні недоліки [1]. Зокрема, існує багато проблем, пов'язаних зі зменшенням площ для звалищ, з суворими екологічними нормами та зростанням витрат на утилізацію [2]. Контроль над твердими відходами та пошук конструктивних способів поводження з ними може обмежити їх негативний екологічний вплив. Тому створення RDF (refuse derived fuel) стає одним з дієвих способів переробки відходів [3]. Його використовують як альтернативу викопному паливу переважно на цементних заводах та електростанціях, що працюють на вугіллі. RDF спалюють шляхом змішування з вугіллям або біомасою [4, 5]. При заміщенні вугілля на RDF, вологість якого менша 15%, скорочення викидів становить 0,4 тони CO₂/тону вугілля [6]. А спалювання разом з біомасою дозволяє зменшити загальну кількість зареєстрованих викидів CO₂ [7]. В той же час, біомаса має великий потенціал для збільшення виробництва електричної та теплової енергії [8, 9]. Біомасу можна віднести до вуглецевонейтральних джерел енергії, оскільки під час її спалювання в атмосферу надходить вуглекислий газ в кількості, приблизно рівній поглинутому рослинами на протязі їхнього циклу відтворення [10]. Внаслідок цього застосування біомаси в складі альтернативного палива дозволить покращити екологічний стан довкілля за рахунок збільшення частки CO₂, що утворюється при спалюванні вуглецевонейтральних компонентів палива.

Оскільки Україна — аграрна країна, то перспективним джерелом біомаси є пожнивні рештки сільськогосподарських культур, що залишаються після збору урожаю. Хоча важливо залишити певну кількість рослинних решток на полі, часто існує значна кількість цих залишків, які потрібно видалити, щоб зменшити проблеми зі шкідниками, хворобами тощо [11]. Розглядаючи відходи сільського господарства, ми зосередились на кукурудзі, одній з найпоширеніших сільськогосподарських культур. Поживні рештки кукурудзи є перспективним видом біомаси, що має значний ресурс в Україні, проте мають складні паливні властивості, які, однак, кращі, ніж у соломи зернових колосових [12].

Переробка ТПВ на паливо передбачає сортування відходів і відокремлення горючих складових. В складі горючих компонентів ТПВ найбільшу частку займають папір, картон, пластик та текстиль [13]. Пластик є одним з основних складових ТПВ, який потребує належного поводження з ним в якості палива, щоб зменшити вплив на навколишнє середовище. Загалом, попередні дослідження показали [14], що спалювання ТПВ з вмістом 20% пластикових відходів не показало значного збільшення викидів забруднюючих речовин порівняно зі спалюванням вугілля.

Для визначення раціонального складу альтернативного твердого композитного палива та вивчення кінетики термічного розкладання при спалюванні необхідно виконати термічний аналіз експериментальних зразків палива на основі горючих компонентів ТПВ та решток кукурудзи.

Матеріали та методи. Дослідження проведено в модернізованому дериватографі «Q-1000», в якому реалізуються методи термогравіметрії та диференційного термічного аналізу. Дані методи сприяють поглибленню знань з кінетики термічної деструкції та генерації теплоти. Термічну деструкцію палив досліджували в конічному платиновому тиглі без кришки при нагріванні від температури навколишнього середовища до 1000 °C зі швидкістю 7,4 К/хв. і роздільній здатності ваг 0,5 мг.

Таблиця 1

Склад композитного палива

Аналіз горючих компонентів ТПВ [15] та легкодоступної біомаси дав підставу сформуванню склад експериментального палива (табл. 1) з поліетилену, картону, тканини з 83% віскози та поживних решток кукурудзи.

Зразок	картон	поліетилен	тканина	поживні рештки кукурудзи
КП 1	20	40	10	30
КП 2	25	40	15	20
КП 3	30	40	10	20
КП 4	25	35	15	25
КП 5	35	30	10	25
КП 6	30	25	15	30

Можна відзначити, що всі компоненти, окрім поліетилену, відносять до лігноцелюлозної біомаси. За елементним складом вони мають схожість та містять достатньо високу кількість вуглецю. Це означає, що дані матеріали мають подібну теплотворну здатність. Поліетилен має найвищий вміст вуглецю і відповідно найвище значення теплоти згорання. В результаті досліджень методами термічного аналізу складових палива, запропоновано та виготовлено 6 варіантів складу експериментального композитного палива (КП) (табл. 1).

Результати досліджень. Отримані дериватограми термічного розкладання композитного палива представлені профілями зміни температури T і маси TG, швидкості зміни маси DTG та генерування теплоти DTA під час нагрівання зразка. Для всіх зразків (рис. 1–3) процес розкладання можна умовно поділити на 3 етапи, які супроводжуються виділенням або поглинанням теплоти. На першому етапі відбувається видалення води з матеріалу. Другий етап характеризується розкладанням органічних речовин, що входять в склад, а третій — мінеральних, що піддаються деструкції (табл. 2).

Таблиця 2

Термічні характеристики композитного палива

Зразок	Видалення води		Термічне розкладання				Зола, % СМ
			органічних речовин		мінеральних речовин		
	інтервал, °C	вологість, %	інтервал, °C	вміст, % СМ	інтервал, °C	вміст, % СМ	
КП 1	22–162	3,67	162–522	95,68	522–1000	1,21	3,11
КП 2	22–151	4,07	151–522	95,05	522–1000	2,30	2,65
КП 3	21–152	3,17	152–539	94,66	539–1000	2,24	3,10
КП 4	22–156	4,50	156–527	94,94	527–1000	1,74	3,32
КП 5	21–151	4,50	151–531	93,72	531–1000	2,09	4,19
КП 6	24–157	5,83	157–527	92,39	527–1000	3,72	3,89
СМ – сухий матеріал							

Оскільки у зразках композитного палива одною з основних складових є поліетилен (табл. 1), то на кривих DTA (рис. 1–3) реєструється склоперехід в межах 119–124 °C. Цей фазовий перехід відповідає перетворенню в процесі нагрівання поліетилену спочатку в еластичний, а згодом і в рідкий стан.

Зневоднення палива КП 1 (табл. 1) відбувається в інтервалі 22–162 °C (рис. 1 а). Визначена вологість зразка становить 3,67% (табл. 2). За рахунок багатокомпонентності термічне розкладання органічних речовин проходить у три стадії, які характеризуються різними швидкостями розкладання та тепловими ефектами (табл. 3). В інтервалі 162–363 °C відбувається розкладання 46,66% органічних речовин з середньою швидкістю 1,72% СМ/хв. і постійне наростання тепловиділення. Оскільки інтенсивність розкладання поліетилену в 5,2 рази більша на другій стадії [15], це накладає значний вплив на загальну кінетику розкладання палива.

На другій стадії (363–470 °С) швидкість розкладання за рахунок високого вмісту поліетилену зростає до 3,13% СМ/хв. При цьому реєструється максимум швидкості розкладання — 450 °С. За температур 273 та 458 °С на кривій DTA фіксуються максимуми ендотермічних піків, що відповідають процесу втрати теплоти під час викиду газоподібних продуктів розкладання за межі тигля. Розкладання органічних речовин закінчується третьою стадією в інтервалі 470–522 °С.

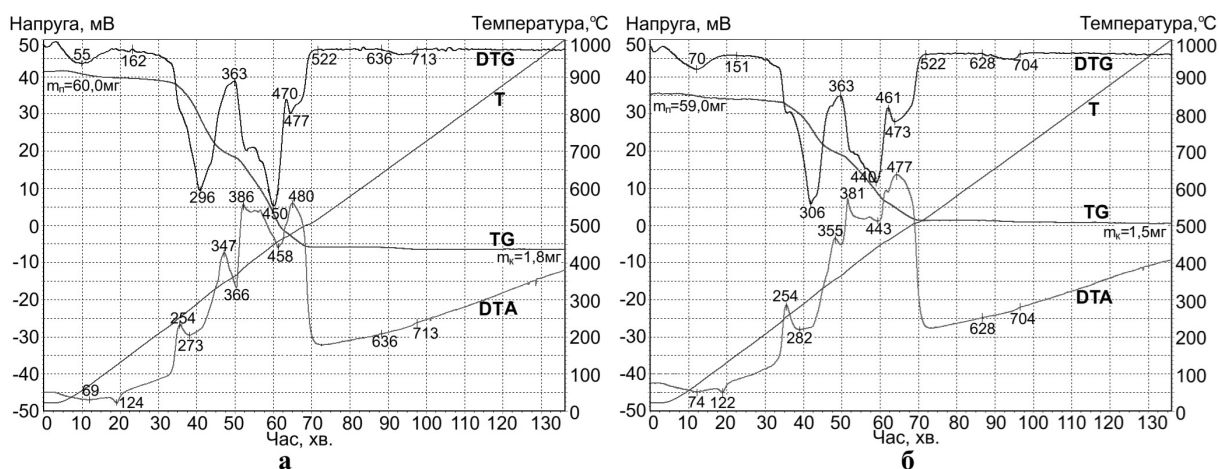


Рис. 1 – Дериватограма КП 1 (а) та КП 2 (б)

Подальше нагрівання палива супроводжується деструкцією мінеральних речовин. В межах 636–713 °С має місце зменшення маси зразка та поглинання теплоти, що є наслідком термічного розкладання карбонату кальцію в картоні. Зольність КП 1 становить 3,11% СМ, а визначена нижча теплота згорання — 26,92 МДж/кг.

Таблиця 3

Показники, що характеризують кінетику розкладання органічних речовин

Зразок	1 стадія			2 стадія			3 стадія			Загальна середня швидкість розкладання, % СМ/хв.
	інтервал, °С	частка, ОР %	швидкість розкладання, % СМ/хв.	інтервал, °С	частка, ОР %	швидкість розкладання, % СМ/хв.	інтервал, °С	частка, ОР %	швидкість розкладання, % СМ/хв.	
КП 1	162–363	46,66	1,72	363–470	44,85	3,13	470–522	8,49	0,94	1,98
КП 2	151–363	45,17	1,59	363–461	40,53	3,01	461–522	14,30	1,37	1,92
КП 3	152–364	46,73	1,63	364–467	42,91	3,10	467–539	10,36	0,85	1,83
КП 4	156–367	49,45	1,73	367–453	36,95	3,29	453–527	13,60	1,09	1,91
КП 5	151–351	48,42	1,79	351–470	41,89	2,53	470–531	9,69	0,93	1,85
КП 6	157–351	49,81	1,88	351–527	50,19	1,85	–	–	–	1,86

СМ – сухий матеріал
ОР – органічні речовини

За рахунок того, що кількість лігноцелюлозних компонентів палива не змінилася (табл. 1), характер розкладання палива КП 2 (рис. 1 б, табл. 2) подібний до зразка КП 1. Зневоднення КП 2 завершується за температури 151 °С, і зразу ж розпочинається етап розкладання органічних речовин. На першій стадії розкладання (151–363 °С) видалається 45,47% СМ зі швидкістю 1,59% СМ/хв (табл. 3). На другій стадії швидкість розкладання зростає в 1,9 рази внаслідок підвищеного вмісту поліетилену в паливі. На третій стадії (461–522 °С) інтенсивність розкладання органічних речовин знижується. Теплота згорання КП 2 становить 26,89 МДж/кг.

Паливо КП 3 має таке ж співвідношення лігноцелюлозних компонентів з поліетиленом, тому характер кривих TG, DTG та DTA (рис. 2 а) аналогічний попереднім двом зразкам палива. Видалення води відбувається в інтервалі 21 – 152 °С (табл. 2). На першій стадії розкладання органічних речовин (152–364 °С) спостерігається приріст тепловиділення (крива DTA). На цій стадії реєструється максимум швидкості розкладання за 316 °С. На другій стадії спостерігається інтенсивна деструкція – швидкість розкладання збільшується у 1,2 рази (табл. 3). В інтервалі 467–539 °С (третя стадія) швидкість розкладання зменшується і повністю припиняється при досягненні 539 °С (криві DTG та DTA). Деструкція органічних речовин супроводжується газоутворенням, яке призводить до втрати теплоти тиглем. На кривій DTA це відображається ендотермічними піками з максимумами 268 та 446 °С. В інтервалі 635–716 °С реєструється термічна дисоціація кар-

бонату кальцію в картоні (криві DTG та DTA). Величина теплоти згорання палива знаходиться на рівні двох попередніх зразків і становить 26,76 МДж/кг.

В КП 4 дещо зменшено вміст поліетилену до 35% (табл. 1). Проте це не вплинуло на характер кривих, що відображають процес деструкції палива (рис. 2 б).

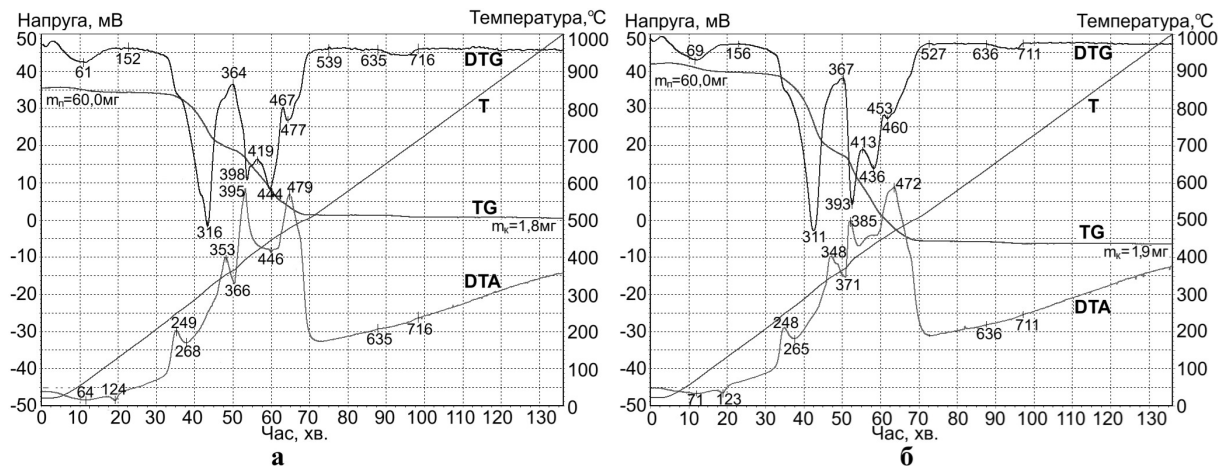


Рис. 2 – Дериватограма КП 3 (а) та КП 4 (б)

Видалення вологи (4,50%) відбувається в інтервалі 22–156 °С (табл. 2). Хоча на першій стадії розкладання органічних речовин зафіксовано максимум швидкості розкладання (311 °С), друга стадія за рахунок вмісту поліетилену є більш інтенсивною, як і у попередніх зразках (табл. 3). Розкладання органічних речовин супроводжується поступовим наростанням тепловиділення. Деструкція органічних речовин закінчується при 527 °С. Теплота згорання такого палива становить 25,61 МДж/кг.

Волога в КП 5 (табл. 1) повністю видаляється при досягненні 151 °С (рис. 3 а). Для даного палива також характерним є розкладання органічних речовин у три стадії. На першій стадії в інтервалі 151–351 °С реєструється максимум швидкості розкладання органічних речовин при 317 °С. Зменшення вмісту поліетилену призводить до збільшення інтенсивності розкладання органічних речовин у першій стадії та зменшення у другій стадії, а також зниження загальної швидкості розкладання (табл. 3). Під час розкладання органічних речовин тепловиділення наростає, досягаючи максимуму на третій стадії за 484 °С, після чого починає різко спадати, що свідчить про закінчення розкладання органічних речовин. В той же час через зменшення вмісту поліетилену на кривій DTA ярко виражених піків, що відображають активне газовиділення, не спостерігається. Через високий вміст картону (35 %) паливо КП 5 має значну зольність 4,19% СМ. За рахунок зменшення вмісту поліетилену нижча теплота згорання становить 24,11 МДж/кг.

КП 6 відрізняється низьким вмістом поліетилену — 25% (табл. 1). Відповідно до цього вологість такого палива найбільша і становить 5,83% (табл. 2). На відміну від зразків КП 1 – КП 5, розкладання органічних речовин в КП 6 відбувається у дві стадії (рис. 3 б). Причому інтенсивність розкладання на обох стадіях майже однакова (табл. 3). Проте на першій стадії за температури 303 °С фіксується максимум швидкості розкладання. Виділення теплоти поступово збільшується у другій стадії до досягнення 478 °С (крива DTA). Процес розкладання карбонату кальцію зареєстрований в інтервалі 645–716 °С. Вміст золи в паливі складає 3,89% СМ, теплота згорання визначена на рівні 22,96 МДж/кг.

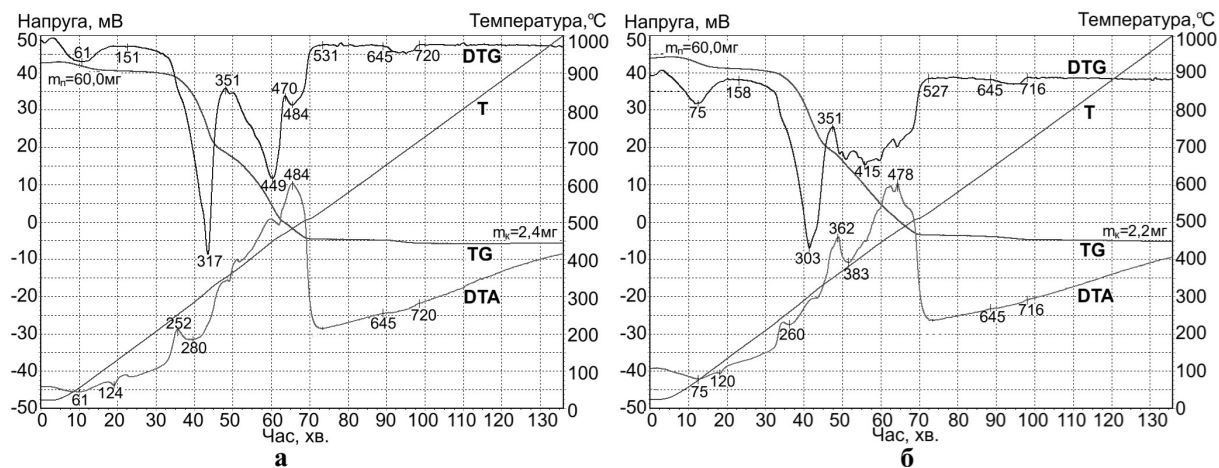


Рис. 3 – Дериватограма КП 5 (а) та КП 6 (б)

Аналіз отриманих даних дає можливість порівняти деструкційні процеси, що відбуваються в паливі при його нагріванні до 1000 °С. Усі зразки палива мають подібний характер термічної деструкції, оскільки, основними компонентами є поліетилен та лігноцелюлозна сировина. Варіювання вмістом компонентів (від 10 до 40 %) не дає суттєвих змін в характері процесів, що відбуваються в композитному паливі при термічному розкладанні.

Загалом у досліджених експериментальних зразках палив видалення води завершується за температур 151–162 °С. Вологість змінюється в межах 3,17–5,83% і залежить від вмісту картону та решток кукурудзи, які мають майже однакову вологість (~6 %). Розкладання органічних речовин завершується в межах 522–539 °С, причому найвужчий інтервал розкладання (360 К) має КП 1, а найширший (387 К) — КП 3. Кількість органічних речовин в паливі переважно залежить від вмісту поліетилену. При його зменшенні з 40 до 25% кількість розкладених органічних речовин зменшується на 3,29 % СМ. Середня швидкість розкладання знаходиться на рівні 1,83–1,98 % СМ/хв. Зольність усіх зразків палива невисока і становить 2,65–4,19 % СМ. Наявність у складі картону природних утворень з CaCO₃ та MgCO₃ призводить до їх термічної дисоціації за температур 628 – 727 °С, на що витрачається теплота термічної деструкції органічних речовин палива.

Визначення теплоти згорання показало, що найбільшу теплотворну здатність мають палива, що мають в своєму складі високий вміст поліетилену. Це є очевидним, оскільки його теплота згорання у 2,4–2,9 рази перевищує теплотворну здатність інших компонентів палива.

На основі аналізу отриманих результатів досліджень розроблена технологія виробництва композитного палива на основі горючих компонентів твердих побутових та сільськогосподарських відходів. За основу прийнято технологію виробництва RDF. Технологія включає послідовність основних етапів: приймання та сортування ТПВ та біомаси, де відбувається видалення негорючих складових; первинне подрібнення для покращення умов подальшої переробки; сушіння, яке сприяє підвищенню калорійності палива та здатності до тривалого зберігання; вторинне подрібнення для зменшення загального об'єму палива. Після цього суху суміш подають в накопичувач твердого палива, звідки спрямовують в топку когенераційної або котельної установи для спалювання [16].

Висновки. Аналіз проведених досліджень дозволив встановити температури, що визначають етапи термічного розкладання, вологість, зольність, теплоту згорання та швидкість термічного розкладання органічних речовин композитного палива. Виявлено, що деструкція органічних речовин в досліджених зразках палива характеризується багатостадійністю. Наявність 30–40 % поліетилену в складі композитного палива забезпечує більшу інтенсивність розкладання в високотемпературній стадії. При збільшенні вмісту лігноцелюлозних компонентів інтенсивність розкладання на першій стадії зростає, а на другій — зменшується.

Визначено, що досліджене паливо з підвищеним вмістом поліетилену має високу теплотворну здатність та відзначається інтенсивним утворенням летких продуктів термічного розкладання, що покращує кінетику згорання.

Варіювання вмістом біомаси у паливі в кількості від 20 до 30 % не викликає значних відмінностей у характері термічного розкладання.

На основі аналізу термічних характеристик представлені склади композитного палива можна рекомендувати для виробництва та спалювання. Проте в виробництві необхідно регулювати вміст поліетилену, щоб забезпечити мінімальні викиди шкідливих речовин в атмосферу.

Розроблена технологія виробництва альтернативного композитного палива на основі горючих компонентів твердих побутових та сільськогосподарських відходів забезпечує ефективну їх утилізацію, часткове заміщення викопних палив та поліпшує стан навколишнього середовища.

References

1. Daskalopoulos, E., Badr, O., & Probert, S. D. (1997). Economic and environmental evaluations of waste treatment and disposal technologies for municipal solid waste. *Applied Energy*, 58(4), 209–255. [https://doi.org/10.1016/s0306-2619\(97\)00053-6](https://doi.org/10.1016/s0306-2619(97)00053-6).
2. Reza, B., Soltani, A., Ruparathna, R., Sadiq, R., & Hewage, K. (2013). 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*, 81, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>.
3. Bhatt, A. K., Bhatia, R. K., Thakur, S., Rana, N., Sharma, V., & Rathour, R. K. (2017). Fuel from waste: A review on scientific solution for waste management and environment conservation. In *Prospects of alternative transportation fuels* (P. 205–233). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6_10.
4. Kara, M. (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>.
5. Mokrzycki, E., & Uliasz-Bocheńczyk, A. (2003). Alternative fuels for the cement industry. *Applied Energy*, 74(1-2), 95–100. [https://doi.org/10.1016/s0306-2619\(02\)00135-6](https://doi.org/10.1016/s0306-2619(02)00135-6).
6. Nakajima, Y., & Matsuyuki, M. (1981). Utilization of waste tires as fuel for cement production. *Conservation & Recycling*, 4(3), 145–152. [https://doi.org/10.1016/0361-3658\(81\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0361-3658(81)90018-7).

7. Zajemska, M., Magdziarz, A., Iwaszko, J., Skrzyniarz, M., & Poskart, A. (2022). 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>.
8. Malik, B., Pirzadah, T. B., Islam, S. T., Tahir, I., Kumar, M., & Rehman, R. U. (2015). Biomass pellet technology: A green approach for sustainable development. In *Agricultural biomass based potential materials* (с. 403–433). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3_19.
9. Parikka, M. (2004). Global biomass fuel resources. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 613–620. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.005>.
10. Ungureanu, N., Vladut, V., Voicu, G., Dinca, M.-N., & Zabava, B.-S. (2018). Influence of biomass moisture content on pellet properties - Review. In *17th international scientific conference engineering for rural development*. Latvia University of Agriculture. <https://doi.org/10.22616/erdev2018.17.n449>.
11. Easterly, J. L., & Burnham, M. (1996). Overview of biomass and waste fuel resources for power production. *Biomass and Bioenergy*, 10(2-3), 79–92. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00063-1).
12. Heletukha, H., Drahniev, S., Zheliezna, T., & Karampinis, M., (2022). *AgroBioHeat. Enerhiia z reshtok kukurudzy*. https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/04/Maize-residues-to-Energy_ukr-web.pdf
13. Haponych, L., Topal, O., Golenko, I., Kobzar, S. (2022). Estimation of potential of RDF production based on found technological and morfological properties of munisipal solid wastes of Ukraine. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 28(3), 44–59. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-3-6>.
14. Frankenhaeuser, M., Hiltunen, M., Manninen, H., Palonen, J., Ruuskanen, J., & Vartiainen, T. (1994). Emissions from co-combustion of used packaging with peat and coal. *Chemosphere*, 29(9-11), 2057–2066. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)90373-5](https://doi.org/10.1016/0045-6535(94)90373-5)
15. Snezhkin, Y., Mykhailik, V., & Korinchevska, T. (2024). Thermal analysis of combustible components of municipal solid waste. *Problems of the Regional Energetics*, (2(62)), 86–96. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.08>
16. Sniezkin, Yu., Mykhailik, V., Korinchevska, T. (2025). *Sposib vyhotovlennia tverdoho kompozytnoho palyva z pobutovykh vidkhodiv ta pozhnyvnykh reshtok kukurudzy* (Patent of Ukraine № U 158966).

THERMAL ANALYSIS OF ALTERNATIVE COMPOSITE FUEL

T. Korinchevska, Ph.D., V. Mykhailik, Ph.D., Senior Research Scientist,

Yu. Snezhkin, Doctor of Technical Sciences, Professor

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

Abstract. Disposal of solid municipal waste is a pressing issue of our time. Using waste as raw material to alternative fuels production is a promising area of recycling. This will allow partial replacement of traditional solid fuel. Biomass is proposed to be added during combustion of refuse derived fuels to reduce hazardous emissions. At the same time, the selection of a fuel composition based on solid municipal waste and biomass requires studying its thermal properties and the kinetics of the destruction process. The main combustible components of solid municipal waste (cardboard, polyethylene, fabric) and agricultural waste (corn harvest residues) were used as raw materials for creating experimental fuel. Studies of thermal characteristics of the fuel were carried out using thermogravimetry and differential thermal analysis methods. The characteristic temperatures of the stages of destruction (dehydration, decomposition of organic and mineral substances) were determined. Data on the content of water, organic and mineral substances and ash were obtained. The rates of thermal destruction of organic substances were calculated at different heating phases, as well as the heat of combustion was determined. The destruction kinetics and heat generation were compared at different stages of thermal decomposition of organic substances. Analysis of the obtained results showed that the studied samples of composite fuel have a similar nature of thermal destruction, since the composition of the fuel is limited to polyethylene and lignocellulosic raw materials. It has been established that the presence of polyethylene in fuel determines its high calorific value. The obtained research results made it possible to recommend experimental fuel compositions for production and use with control over combustion technology, which guarantees the neutralization of hazardous combustion products. A technology for producing alternative composite fuel based on solid municipal and agricultural waste was proposed.

Key words: thermogravimetry, differential thermal analysis, alternative fuels, municipal solid waste, corn residue, decomposition, heat of combustion.

Список використаної літератури

1. Daskalopoulos E., Badr O., Probert S. D. Economic and environmental evaluations of waste treatment and disposal technologies for municipal solid waste. *Applied energy*. 1997. Vol. 58, no. 4. P. 209–255. DOI: 10.1016/s0306-2619(97)00053-6.
2. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management / B. Reza et al. *Resources, conservation and recycling*.

2013. Vol. 81. P. 105–114. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.10.009.
3. Fuel from waste: A review on scientific solution for waste management and environment conservation / A. K. Bhatt et al. *Prospects of alternative transportation fuels*. Singapore, 2017. P. 205–233. DOI: 10.1007/978-981-10-7518-6_10.
 4. Kara M. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, conservation and recycling*. 2012. Vol. 68. P. 21–28. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.06.011.
 5. Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A. Alternative fuels for the cement industry. *Applied energy*. 2003. Vol. 74, no. 1-2. P. 95–100. DOI: 10.1016/s0306-2619(02)00135-6.
 6. Nakajima Y., Matsuyuki M. Utilization of waste tires as fuel for cement production. *Conservation & recycling*. 1981. Vol. 4, no. 3. P. 145–152. DOI: 10.1016/0361-3658(81)90018-7.
 7. 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.
 8. Biomass pellet technology: a green approach for sustainable development / B. Malik et al. *Agricultural biomass based potential materials*. Cham, 2015. P. 403–433. DOI: 10.1007/978-3-319-13847-3_19.
 9. Parikka M. Global biomass fuel resources. *Biomass and bioenergy*. 2004. Vol. 27, no. 6. P. 613–620. DOI: 10.1016/j.biombioe.2003.07.005.
 10. Influence of biomass moisture content on pellet properties - review / N. Ungureanu et al. *17th international scientific conference engineering for rural development*. 2018. DOI: 10.22616/erdev2018.17.n449.
 11. Easterly J. L., Burnham M. Overview of biomass and waste fuel resources for power production. *Biomass and bioenergy*. 1996. Vol. 10, no. 2-3. P. 79–92. DOI: 10.1016/0961-9534(95)00063-1.
 12. AgroBioHeat. Енергія з решток кукурудзи : посібник / Г. Гелетука та ін. 2022. 48 с. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/04/Maize-residues-to-Energy_ukr-web.pdf (дата звернення: 17.06.2025).
 13. Оцінка потенціалу виробництва RDF на основі визначених технологічних і морфологічних властивостей твердих побутових відходів України / Л. С. Гапонич та ін. *Наукові праці НУХТ*. 2022. Vol. 28, no. 3. P. 44–59. DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-6.
 14. Emissions from co-combustion of used packaging with peat and coal / M. Frankenhaeuser et al. *Chemosphere*. 1994. Vol. 29, no. 9-11. P. 2057–2066. DOI: 10.1016/0045-6535(94)90373-5.
 15. Snezhkin Y., Mykhailik V., Korinchevska T. Thermal analysis of combustible components of municipal solid waste. *Problems of the regional energetics*. 2024. No. 2(62). P. 86–96. DOI: 10.52254/1857-0070.2024.2-62.08.
 16. Спосіб виготовлення твердого композитного палива з побутових відходів та пожнивних решток кукурудзи : пат. У 158966 Україна : С10L5/40. № u202401596 ; заявл. 01.04.2024 ; опубл. 16.04.2025, Бюл. № 16/2025. 5 с.

Отримано в редакцію 12.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 12.06.2025
Approved 02.09.2025