

УДК 628.47

СНІГУР О. В.¹, МАРЧУК Ю. В.¹, СЕЗОНЕНКО О. Б.¹, КОВБАСЮК В. І.¹,
ІВАНЕНКО О. І.^{2*}, НОСАЧОВ К. О.²

¹Інститут газу Національної академії наук України

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМОХІМІЧНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ КОМПОНЕНТІВ МОРФОЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ТА МОДЕЛЬНИХ АНАЛОГІВ ТПВ

У статті представлено розробку дослідної термогравітаційної установки для дослідження процесів термохімічної переробки вуглецевмісних альтернативних видів палив з широкими можливостями, що дозволяє досліджувати вплив технологічних параметрів на процес спалювання. Наведено опис основних вузлів та системи вимірювання, методики проведення експерименту та аналізу отриманих даних. Проведено серію експериментів з усіма основними компонентами ТПВ: деревина, харчові відходи (картопля, м'ясо), папір офісний та діаграмний, шкіра, відходи саду, тетрапак, пластик. Показано, що характер кривих зміни маси різних компонентів практично не залежить від їхнього хімічного складу та визначається головним чином стадійністю перебігу процесу згоряння, а останній, в свою чергу, — темпом нагрівання наважки, виключенням є тільки згоряння пластику. Час окислення усіх, крім пластику, компонентів після досягнення температури початку горіння (~ 200–50, іноді 300 °С) складає від 5–7 до 40–50 хв, тоді як інтенсивне згоряння пластику закінчується за 1 хв. Визначено, що склад та теплофізичні властивості золи відіграють важливу роль у процесах термохімічної утилізації ТПВ, впливаючи на величину питомої теплотворної здатності ТПВ як палива та на величину адиабатичної температури газоподібних продуктів процесу.

Ключові слова: тверді побутові відходи, ТПВ, термічне знешкодження, кінетика спалювання, зола

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2023.294326

* Corresponding author: olenka.vasaynovich@gmail.com

Received 24 October 2023; Accepted 30 November 2023

Постановка проблеми. У всьому світі переробка та утилізація побутових відходів стають дедалі більшою проблемою. Головним чином це стосується великих густонаселених міст, де щорічно накопичуються мільйони кубометрів твердих побутових відходів (ТПВ). В залежності від методів збору та утилізації відходів залежить ступінь впливу на якість повітряного басейну, водних об'єктів, ґрунтів, на загальний рівень санітарно-епідеміологічної ситуації.

При всьому різноманітті причин, що впливають на вибір методів переробки сміття, а також способів переробки побутових відходів світ поки що обмежився двома основними технологіями у справі переробки ТПВ:

- поховання ТПВ на полігонах з метою компостування органіки, що вимагає наявності значних площ земель недалеко від міста;
- переробка ТПВ термічними методами з використанням зовнішнього джерела теплової енергії, з подальшим використанням цієї енергії.

Термічні методи утилізації твердих промислових відходів та ТПВ є одними із досконалих методів їх переробки. Перевага цих методів полягає у значному зменшенні об'єму оброблюваного матеріалу. При спалюванні відходів їх маса зменшується на 85–90 %.

При переробці, утилізації та ліквідації твердих відходів використовують різні методи термохімічної та термічної обробки вихідних твердих матеріалів і отриманих продуктів: це різні прийоми піролізу, газифікації, переплаву, випалу та вогневого знешкодження (спалювання) багатьох видів твердих відходів на органічній основі.

Аналіз попередніх досліджень. Спалювання є розповсюдженим способом утилізації та переробки відходів. Спалювання побутового сміття, крім зменшення об'єму і маси відходів, дозволяє отримувати додаткові енергетичні ресурси. Показники кількості теплоти згорання ТПВ аналогічні показникам бурого вугілля — від 1000 до 3000 ккал/кг. Проте до числа недоліків даного методу відносять виділення в атмосферу шкідливих речовин, знищення цінних органічних компонентів. В процесі горіння відходів виділяються гази, пари та неорганічні сполуки: водяний пар, оксиди, діоксиди вуглецю, сірки, азоту, аерозольні частинки [1]. Важкі частинки спаленого продукту утворюють золу в нижньому відсіку обладнання, яка або направляється на захоронення або використовується в складі будівельних матеріалів [2]. При спалюванні ТПВ, в залежності від складу, отримують 28–44 % золи від сухої маси та газоподібні продукти у вигляді діоксиду вуглецю, парів води та інших домішок. Запиленість відхідних газів складає 5–10 г/м³.

На сьогоднішній день існуючі сміттєспалювальні установки мають цілий ряд недоліків, головним з яких є низька економічність. Показник корисного використання теплової енергії не перевищує 65 %, навіть із застосуванням більш вдосконаленого обладнання.

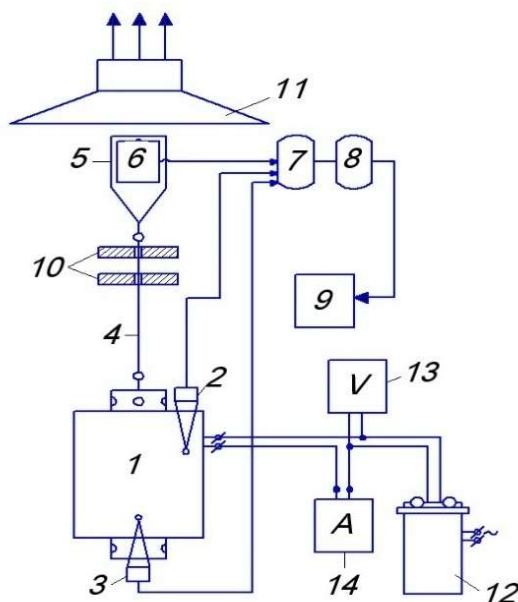
На самі процеси спалювання, утворення та склад зольних залишків впливає велика кількість факторів, починаючи з властивостей та характеристик палива, фізичних та хімічних властивостей вихідної сировини, параметрів процесу спалювання, дисперсного розміру палива, типу реактора, рівня кисню в робочій зоні [3–5].

Таким чином, вибір діапазону температур і тисків, швидкості нагріву газового середовища для термогравіметричного способу утилізації вуглецьвмісних відходів відіграє вирішальну роль в подоланні недоліків даного методу.

Метою статті є розробка термогравітаційної установки для вивчення особливостей протікання кінетичних процесів при спалюванні зразків ТПВ.

Виклад основного матеріалу.

Для проведення досліджень була розроблена та створена модельна термогравітаційна установка з істотно підвищеними можливостями проведення експерименту та обробки результатів за допомогою методів комп'ютерного програмування. Схема установки приведена на рис. 1.

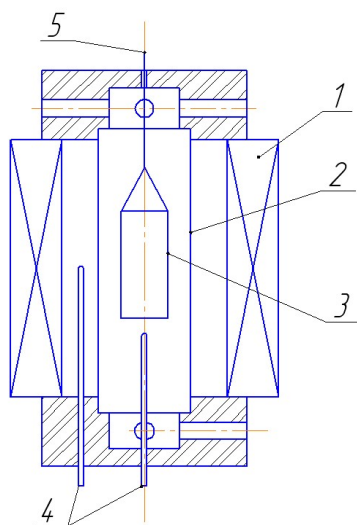


1 – реактор; 2, 3 – термопары; 4 – тяга; 5 – коромисло; 6 – тензодатчик; 7 – АЦП; 8 – модуль ICPCON; 9 – комп'ютер; 10 – екрани; 11 – парасоль; 12 – автотрансформатор; 13 – вольтметр; 14 – амперметр

Рис. 1 – Принципова схема установки спалення зразків ТПВ

Основним апаратом установки є реактор 1, в якому розміщені термопари: 2 – для вимірювання температури нагрівальних елементів, 3 – для вимірювання температури під корзиною з наважкою досліджуваного зразка. Корзина з наважкою через тягу 4 та «коромисло» 5 встановлені на тензодатчику 6 для передачі вагового навантаження на чутливий елемент датчика. Вузол передачі зусилля «корзина — тяга — коромисло» виготовлений та відцентрований з високою точністю, завдяки чому навантаження на датчик спрямовано суворо по вертикалі. Сигнали від термопар та тензодатчика надходять до АЦП 7, далі – до модуля ІРСОН 8, після чого подаються до персонального комп'ютера 9. Для захисту датчика від теплового випромінювання та шкідливого впливу гарячих газів, між ним і реактором встановлені горизонтальні екрани 10 з термостійкого теплоізоляційного матеріалу. Система «реактор — датчик» розміщена під витяжним парасолем 11.

На рис. 2 схематично зображена конструкція реактора.



1 – піч; 2 – муфель; 3 – корзина; 4 – термопари; 5 – тяга тензодатчику

Рис. 2 – Конструкція реактора

У циліндричній модельній печі 1 з вертикальною віссю розташований муфель 2, виконаний з жаротривкої сталі, всередині якого підвішена корзина 3 з наважкою досліджуваного матеріалу; термопари розташовані, як описано вище. Вхідний і вихідний отвори печі та муфеля закриті кришками з пористої теплоізоляційної кераміки, які мають по 8 горизонтальних каналів: нижня 4 – для входу повітря, верхня 5 – для виходу продуктів згорання. Конструкція кришок забезпечує більш рівномірний розподіл температур по довжині муфеля та додатковий захист тензодатчика від впливу гарячих газів.

При вимірюванні температури використовуються багатоточкові реєструючі прилади з подальшою обробкою результатів вимірювань шляхом перенесення даних безпосередньо в персональний комп'ютер (рис. 3).

Для автоматизації процесу одержання даних при проведенні експериментальних робіт було створено систему на базі персонального комп'ютера, з використанням модуля сполучення територіально-розподільних датчиків І-7018 і І-7520 – ізольованого модуля конвертера каналу зв'язку RS-232/RS-485.

Модуль І-7018 – це малогабаритний багатофункціональний інтелектуальний пристрій зв'язку з об'єктом, спеціально розроблений для застосування в промислових умовах експлуатації. Вбудований мікропроцесор забезпечує незалежне від керуючого комп'ютера виконання функцій гальванічно ізольованого введення аналогових сигналів (у цьому випадку сигналів 5-ти термопар і тензорезистивного датчика зусилля) з наступною нормалізацією, фільтрацією, перетворенням у форму, придатну для передачі по послідовному каналу зв'язку.

Модуль I-7520 – модуль перетворення сигналів інтерфейсу RS-232 в RS-485, стандарт якого дозволяє за рахунок використання симетричної лінії зв'язку та диференціальної схеми включення прийомопередачем перебороти обмеження, характерні для інтерфейсу RS-232C, а саме: швидкість передачі даних, довжина лінії зв'язку і можливість створення багатоточкових систем передачі інформації.

Міцне і компактне конструктивне виконання модулів забезпечує простоту та зручність їхнього монтажу. Для приєднання вимірювальних термопар і зовнішніх ланцюгів до модуля передбачені клемні з'єднувачі, що витягаються, із гвинтовою фіксацією провідників, що забезпечує швидку зміну вимірюваних зразків у процесі експерименту.

Електричне живлення модулів здійснюється нестабілізованою напругою від 10 до 30 В. Крім того, у модулях реалізовані засоби захисту від "переполюсовки" напруги живлення і перевищення припустимої вхідної напруги. Для обміну даними в системі на базі розглянутих модулів використовується одна кручена пара, що спрощує монтажні роботи.

Протокол обміну з модулями такого типу являє собою набір символічних рядків у форматі ASCII. Опитування модулів прикладними програмами складається із простих операцій запису і читання символічних рядків з послідовного порту, що легко реалізується на будь-якій мові програмування, подібній Сі, Паскаль та Бейсік. Для керування і налаштування модуля використовується стандартний набір команд, що дозволяє безпосередньо з комп'ютера здійснювати установку типу термопар, проводити їхнє калібрування та калібрування зсуву нуля, швидкості обміну, формату даних і наявності перевірки контрольної суми (для виключення втрати даних вимірювань) тощо.

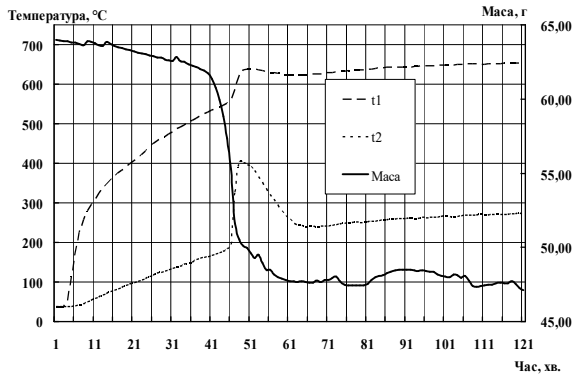


- 1-5 – термопары хромель-алюмелеві безкорпусні;
6 – тензодатчик (FSG15N1A), (максимальне вимірюване зусилля 1500 г, з дискретністю 1 г);
7 – ICP CON 7018 – модуль збору даних сигналів термопар;
8 – ICP CON 7520 – модуль перетворювач інтерфейсів з гальванічною розв'язкою каналу зв'язку;
9 – комп'ютер CPU 2,8 MHz DRAM 4096Mb*

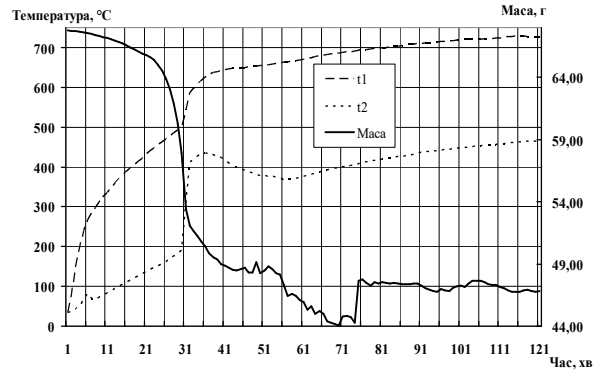
Рис. 3 – Функціональна схема вузла вимірів і обробки експериментальних даних

Перед початком досліджень виконувалось попереднє налагодження та калібрування системи вимірювань та обробки експериментальних даних. Калібрування тензодатчику здійснювалось за допомогою стандартного набору важків масою від 1 до 500 г з дискретністю 1 г, що відповідає паспортній дискретності тензодатчику FSG15N1A. Тарування системи нагрівання печі здійснювалось шляхом експериментального визначення залежності температури пічних нагрівачів від напруги живлення в умовах стабільного теплового режиму. Подальші дослідження провадились при однаковому режимі нагрівання та з масою навески 15–21 г. Під час експерименту сигнали первинних приладів подавались до системи вимірювань та обробки експериментальних даних, з якої після належної обробки виводились на монітор, що дозволяло спостерігати перебіг процесу в режимі реального часу.

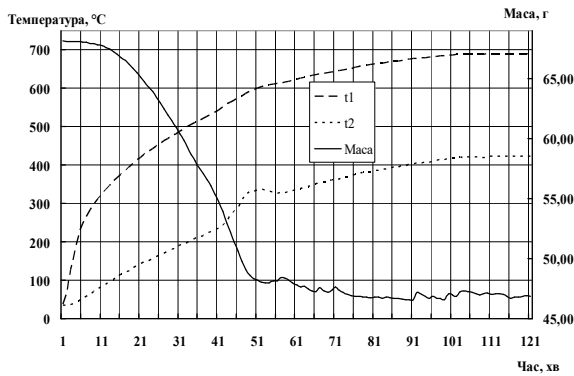
Далі було проведено серію експериментів з усіма основними компонентами ТПВ: деревина, харчові відходи (картопля, м'ясо), папір двох видів, шкіра, відходи саду, тетрапак, пластик. Результати приведено на рис. 4.



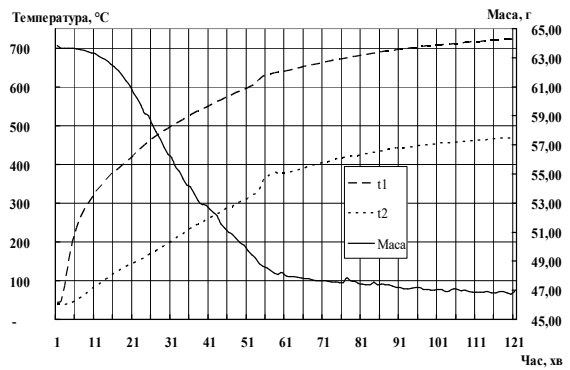
а) кінетика процесу згоряння деревини ($\alpha \gg 1$)



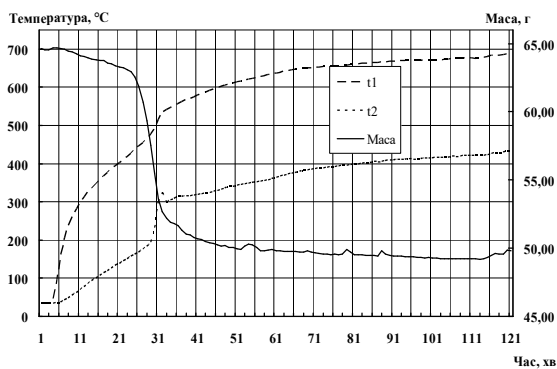
б) кінетика процесу згоряння деревини ($\alpha \approx 1$)



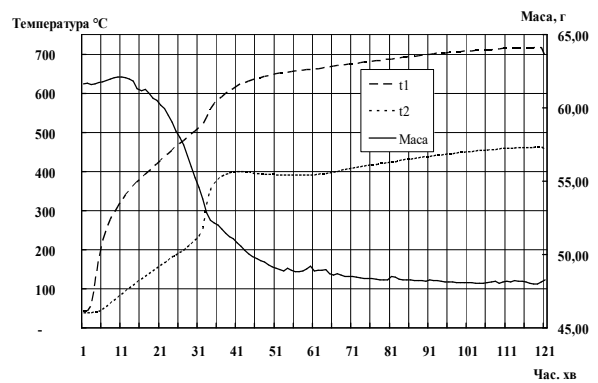
в) кінетика процесу згоряння картоплі



г) кінетика процесу згоряння м'яса



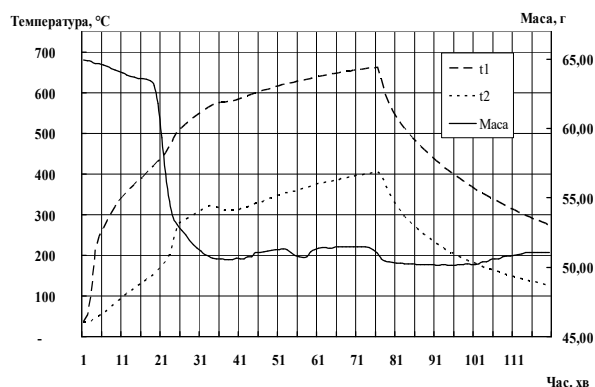
д) кінетика процесу згоряння паперу діаграмного



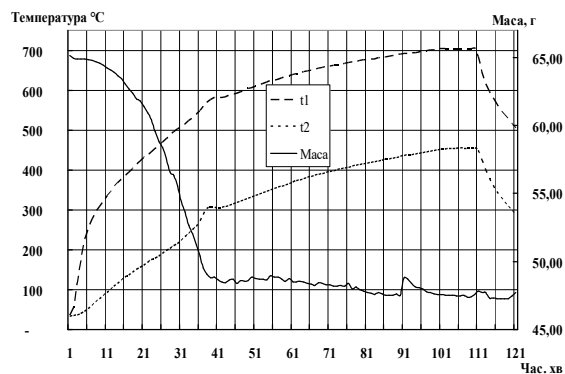
е) кінетика процесу згоряння шкіри

Рис. 4 – Кінетика процесу згоряння різних складових ТПВ

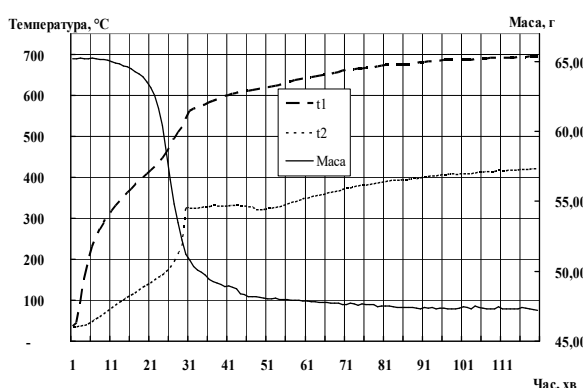
Виходячи з отриманих результатів, характер кривих зміни маси різних компонентів практично не залежить від їхнього хімічного складу та визначається головним чином стадійністю перебігу процесу згоряння, а останній, в свою чергу, – темпом нагрівання наважки.



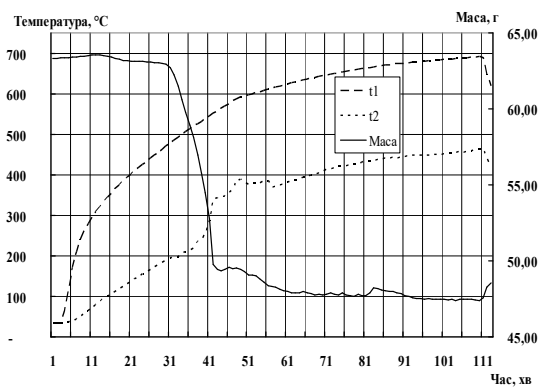
ж) кінетика процесу згоряння паперу офісного



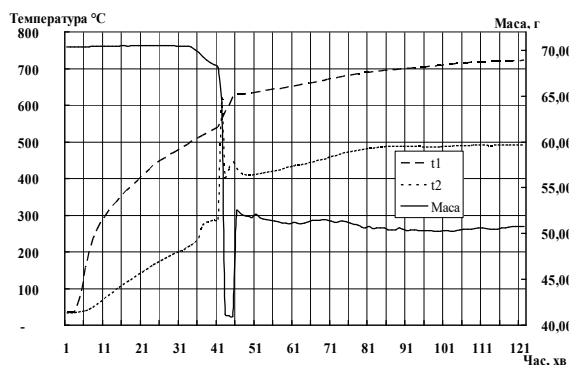
к) кінетика процесу згоряння відходів саду



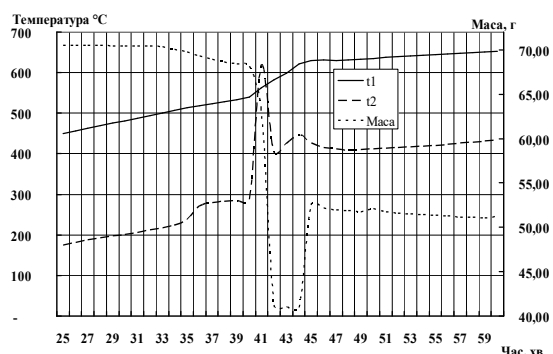
л) кінетика процесу згоряння тетрапаку



м) кінетика процесу часткового згоряння пластику



н) кінетика процесу повного згоряння пластику



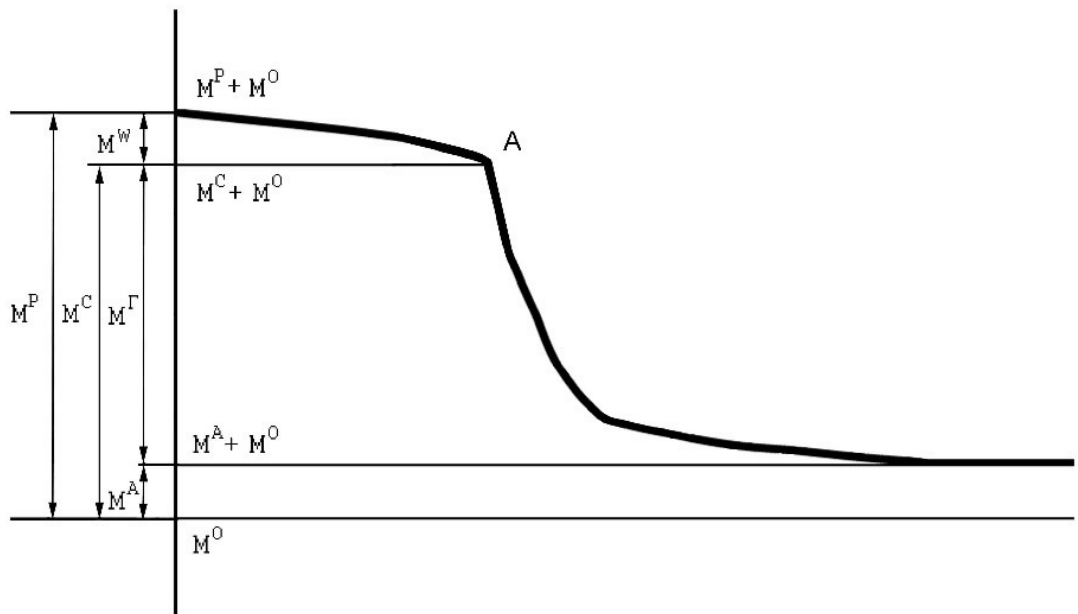
п) кінетика процесу повного згоряння пластику (25 – 60 хв)

Рис. 4 (продовження) – Кінетика процесу згоряння різних складових ТПВ

Виключенням є тільки згоряння пластику (рис. 4 н, п). Час окислення усіх, крім пластику, компонентів після досягнення температури початку горіння (~ 200–250 °С, іноді 300 °С) складає від 5–7 до 40–50 хв, тоді як інтенсивне згоряння пластику закінчується за 1 хв. За цей самий час температура всередині реактора підвищується на ~ 320–340 °С; при цьому різке підвищення швидкості потоку продуктів згоряння викликає ефект підйимальної сили, що діє на корзину з навскою, зменшуючи показання тензодатчика, як це видно на

рис. 4 н, на відрізку 41–46 хв; ефект підйимальної сили збільшений завдяки тому, що саме у цьому досліді на дно корзини було укладене додаткове піддення без отворів – для запобігання витоку розплавленого пластику (рис. 4 н).

Типовий вигляд кривої зміни маси показаний на рис. 5.



M^0 – маса підвіски «коромисло — тяга — корзина»; M^A – маса золи; M^Γ – горюча маса; M^C – суха маса;
 M^W – маса вологи; M^P – робоча маса

Рис. 5 – Типова крива зміни маси наважки в ході експерименту

Крива зміни маси більш або менш виразно поділена на 3 відрізки, з декількома характерними точками:

1) в першій точці кривої $M = f(\tau)$ фіксується сумарна маса зразка та системи підвіски (корзина — тяга — коромисло), тобто $M^P + M^0$; від точки «0» до А відбувається сушіння зразка;

2) в околі точки А характер кривої (кут нахилу) різко змінюється; для деяких компонентів ця точка різко виражена, для інших її окіл розмитий і не дозволяє визначити її з достатньою точністю; останнє пояснюється одночасним закінченням сушіння та початком виходу летючих горючих компонентів;

3) відрізок кривої після точки А відповідає згорянню горючої маси, темп якого уповільнюється від максимального до нульового; ордината горизонтального відрізка дорівнює $M^A + M^0$.

Таким чином, метод і апаратура дають принципову можливість експериментального визначення вологості та зольності як окремих компонентів, так і ТПВ в цілому:

$$W^P = (M^P - M^C) / M^P \times 100 \text{ (мас. \%)}, \quad (1)$$

$$A^P = M^A / M^P \times 100 \text{ (мас. \%)}, \quad (2)$$

$$C^P + H^P + O^P = 100 - W^P - A^P \text{ (мас. \%)}, \quad (3)$$

де W^P – вологість ТПВ, A^P – зольність ТПВ, $C^P + H^P + O^P$ – вміст вуглецю, водню та кисню, перераховані на робочу масу ТПВ.

Результати обробки результатів представлені в табл. 1.

При моделюванні морфологічного складу ТПВ було проведено експерименти з модельною масою ТПВ, штучно складеною з попередньо досліджених компонентів (табл. 2). Морфологічний склад модельних ТПВ приблизно відповідає усередненим показникам складу побутових відходів [6].

Таблиця 1 – Показники компонентів морфологічного складу ТПВ за результатами досліджень на модельній термогравітаційній установці ($M_0 = 48,0$ г*)

№	Компонент	Результати безпосередніх вимірів, г			Результати обробки					
		$M^P + M^0$	$M^C + M^0$	$M^A + M^0$	Маса, г			Масових, %		
					M^P	M^C	M^A	W	A	$C^P + H^P + O^P$
1	Деревина 1	64,00	60,75	47,25	16,00	12,75	-0,75	20,31	(**)	79,69
2	Деревина 2	67,79	63,88	46,83	19,79	15,88	-1,17	19,76	(**)	80,24
3	Картопля	68,13	67,04	46,92	20,13	19,04	-1,08	5,41	(**)	96,59
4	М'ясо	63,83	58,42	46,92	15,83	10,42	-1,08	34,18	(**)	65,82
5	Папір діаграмний	64,63	61,88	47,79	16,63	13,88	-0,21	16,54	(**)	83,46
6	Шкіра	61,7	59,5	48,1	13,7	11,5	0,1	16,06	(**)	83,94
7	Папір офісний	64,89	63,46	51,08	16,89	15,46	3,08	8,47	18,2	73,33
8	Відходи саду	65,01	61,42	47,75	17,01	13,42	-0,25	21,11	(**)	78,89
9	Тетрапак	65,21	63,17	47,25	17,21	15,17	-0,75	11,85	(**)	88,15
10	Пластик (часткове спалення)	63,38	62,71	47,38	15,38	14,71	-0,62	4,36	(**)	95,64
11	Пластик (повне спалення)	70,38	70,38	50,75	20,88	20,88	1,25	0,00	6,0	94,00
12	ТПВ (усередн.)	66,04	64,42	48,29	18,04	16,42	0,29	8,98	(**)	91,02

* У досліді 11: $M^0 = 49,5$ г

** В межах похибки системи вимірювання маси (до 5 %)

Таблиця 2 – Морфологічний склад модельних ТПВ

Компонент	Папір	Пластик	Тетрапак	Харчові відходи	Садові відходи	Дерево	Шкіра, гума	Сума
Маса, г	12,5	18,8	0,9	36,1	18,2	2,3	19,1	107,9
Мас. %	11,6	17,4	0,8	33,5	16,9	2,1	17,7	100 %

Уся маса була подрібнена, ретельно перемішана, з неї виділено 5 частин масою (18 ± 1) г, з якими проведено 5 дослідів в однакових умовах, як і з компонентами однакового морфологічного складу. В процесі обробки результатів встановлено, що розкид показників не перевищує $\pm 5\%$. Характерна діаграма кінетики процесу згоряння наведена на рис. 6, результати обробки – у табл. 1 (позиція 12).

Графік кінетики процесу згоряння ТПВ показує принципову подібність його до графіків окремих компонентів; кількісні показники є усередненими від їхніх аналогічних показників, що відповідає правилу адитивності, застосованому нами у розрахунках табл. 1.

Після спалення ТПВ залишається зола двох видів: летюча та подова. В проведених експериментах летюча зола уносилась через систему витяжної вентиляції, подова зола після спалення горючої маси залишалась на дні корзини. За даними різних авторів [7, 8], склад та властивості золи залежать від складу сирих ТПВ та технологічних параметрів процесу спалення. Вивчення хімічного складу золи показує, що головними елементами золи є Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na та Cl. Головні хімічні сполуки, знайдені у золі, представлені оксидами SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O .

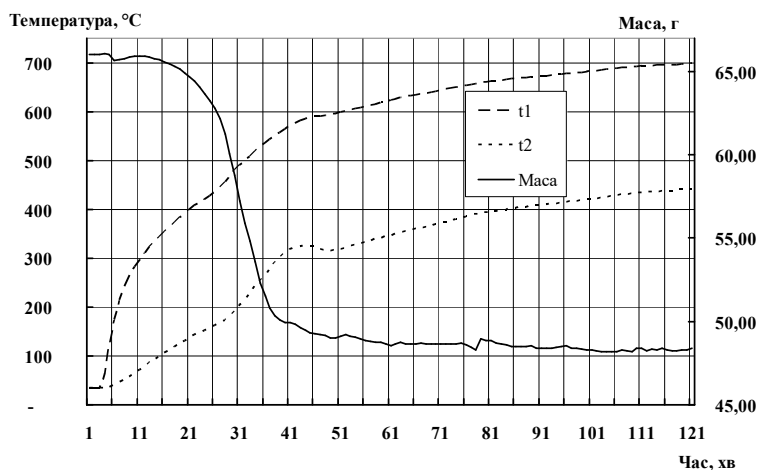


Рис. 6 – Кінетика процесу згоряння ТПВ (модельної суміші)

У проведених дослідях зола залишалась у вигляді порошкоподібного матеріалу, в окремих випадках зберігаючих форму шматків сировини (рис. 7).

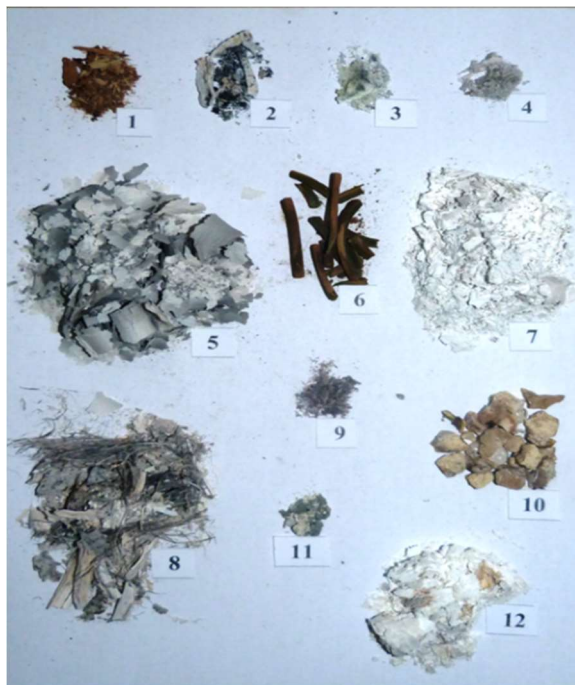


Рис. 7 – Загальний вигляд золи окремих компонентів ТПВ

Переважний колір золи – світлосірий, в окремих випадках – від світло- до темносірого, що пояснюється домішками вуглецю, незгорілого всередині окремих шматків внаслідок обмеженого доступу кисню. Буре забарвлення, вірогідно, надають оксиди заліза.

Висновки. Склад та теплофізичні властивості золи відіграють важливу роль у процесах термохімічної утилізації ТПВ, впливаючи на величину питомої теплотворної здатності ТПВ як палива та на величину адиабатичної температури газоподібних продуктів процесу. Урахуванню цього впливу мають бути присвячені термодинамічні розрахунки другого наближення та подальші експериментальні дослідження.

Список використаної літератури

1. Kothari R., Tyagi V., Pathak F. Waste to energy: A way from renewable energy sources to sustainable development // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. 14(9). P. 3164–3170.
2. Петрук М.П. Вирішення проблем утилізації твердих побутових відходів та продуктів їх спалювання // *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2011. 700. С. 275–279.
3. Alakangas E. Properties of fuels used in Finland // *Research Notes 2045*. Espoo: VTT. 2000. 3. 172 p. [In Finnish, abstract in English.]. ISBN 951-38-5699-2; 951-38-5740-9. <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>
4. Ajanko S., Moilanen A., Juvonen J. Quality control of recycled fuels // *VTT Publications 587*. Espoo: VTT. 2005. 59 p. [In Finnish, abstract in English.]. ISBN 951-38-6685-8; 951-38-6686-6. <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2005/P587.pdf>
5. Ajanko S., Moilanen A., Juvonen J. The effect of wastes' source separation system and handling technique on the quality of solid recovered fuel // *Research Notes 2317*. Espoo: VTT. 2005. 83 p. [In Finnish, abstract in English.]. ISBN 951-38-6753-6; 951-38-6754-4. <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2317.pdf>
6. Moilanen A. Thermogravimetric characterisations of biomass and waste for gasification processes // *Espoo: VTT Publications 607*. 2006. 103 p.
7. Lundin L., Marklund S. Thermal degradation of PCDD/F and HCB in municipal solid waste ash // *Chemosphere*. 2007. 67. P. 474–481.
8. Wey Ming-Yen, Liu Kuang-Yu, Tsai Tsung-Hsun, Chou Ling-Tong. Thermal treatment of the fly ash from municipal solid waste incinerator with rotary kiln // *J. Hazardous Mater*. 2006. 137. P. 981–989.

Oleksandr Snihur, Oleksii Sezonenko, Yurii Marchuk, Victoria Kovbasyuk, Olena Ivanenko, Kiril Nosachov

RESEARCH OF PROCESSES OF THERMOCHEMICAL DISPOSAL OF COMPONENTS OF THE MORPHOLOGICAL COMPOSITION AND MODEL ANALOGS OF MSW

The article emphasizes that processing and disposal of household waste mainly concerns large densely populated cities, where millions of cubic meters of solid household waste (MSW) are accumulated annually. It was noted that thermal methods of solid waste disposal are among the most advanced methods of their processing. The advantage of these methods is a significant reduction in the volume of processed material. When waste is burned, its weight is reduced by 85-90%. In addition to reducing the volume and mass of waste, incineration of household waste allows you to obtain additional energy resources. Indicators of the amount of heat of combustion of MSW are similar to indicators of brown coal – from 1000 to 3000 kcal/kg.

To date, existing waste incineration plants have a number of disadvantages, the main of which is low efficiency. The rate of useful use of thermal energy does not exceed 65%, even with the use of a more advanced property.

The combustion processes themselves, the formation and composition of ash residues are affected by a large number of factors, starting with the properties and characteristics of the fuel, the physical and chemical properties of the raw materials, the parameters of the combustion process, the dispersed size of the fuel, the type of reactor, and the level of oxygen in the working area.

Thus, the selection of the range of temperatures and pressures, the rate of heating of the gas medium for the thermogravimetric method of disposal of carbon-containing waste plays a decisive role in overcoming the shortcomings of this method.

The purpose of the article is the development of a thermogravitational installation for studying the peculiarities of the flow of kinetic processes during the combustion of MSW samples.

The article presents the development of an experimental thermogravimetric unit for researching processes of thermochemical processing of carbon-containing alternative fuels with wide possibilities, which allows to study the influence of technological parameters on the combustion process. A description of the main nodes and the measurement system, the methodology of the experiment and the analysis of the obtained data is given.

A series of experiments was conducted with all the main components of solid waste: wood, food waste (potatoes, meat), office and chart paper, leather, garden waste, tetrapak, plastic. It is shown that the nature of the mass change curves of various components practically does not depend on their chemical composition and is determined mainly by the staged course of the combustion process, and the latter, in turn, by the rate of heating of the sample, the only exception being the combustion of plastic. The oxidation time of all components, except plastic, after reaching the temperature of the beginning of combustion (~ 200–250, sometimes 300 °C) is from 5–7 to 40–50 minutes, while the intensive combustion of plastic ends in 1 minute.

It was determined that the composition and thermophysical properties of ash play an important role in the processes of thermochemical disposal of MSW, affecting the value of the specific calorific value of MSW as a fuel and the value of the adiabatic temperature of the gaseous products of the process.

Keywords: *solid household waste, MSW, thermal disposal, combustion kinetics, ash*

References

1. Kothari, R., Tyagi, V., & Pathak, F. (2010). “Waste to energy: A way from renewable energy sources to sustainable development”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no 14(9), pp. 3164–3170.
2. Petruk, M.P. (2011). “Vyrishennya problem utylizatsiyi tverdykh pobutovykh vidkhodiv ta produktiv yikh spalyuvannya” [Solving the problems of disposal of solid household waste and their incineration products], *Chemistry, technology of substances and their application*. Lviv: NU "Lviv Polytechnic", 700 p., pp. 275–279. (In Ukrainian)
3. Alakangas, E. (2000). “Properties of fuels used in Finland”, *Research Notes 2045*, no 3, 172 p.
4. Ajanko, S., Moilanen, A., & Juvonen, J. (2005). “Quality control of recycled fuels”, *VTT Publications 587*, 59 p.
5. Ajanko, S., Moilanen, A., & Juvonen, J. (2005). “The effect of wastes’ source separation system and handling technique on the quality of solid recovered fuel”, *Research Notes 2317*, 83 p.
6. Moilanen, A. (2006). “Thermogravimetric characterisations of biomass and waste for gasification processes”, *VTT Publications 607*. 103 p.
7. Lundin L., & Marklund S. (2007). “Thermal degradation of PCDD/F and HCB in municipal solid waste ash”, *Chemosphere*, no 67, pp. 474–481.
8. Wey, Ming-Yen, Liu, Kuang-Yu, Tsai, Tsung-Hsun, & Chou, Ling-Tong. (2006). “Thermal treatment of the fly ash from municipal solid waste incinerator with rotary kiln”, *J. Hazardous Mater.*, no 137, pp. 981–989.