

УДК 678.002.8(075)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/37>**Тарахтій О.С.**

Державний університет «Одеська політехніка»

Бутенко О.В.

Державний університет «Одеська політехніка»

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Вимоги до технологій переробки твердих побутових відходів (ТПВ) – це ефективність, безпека й екологічність через способи повторного використання, сортування, розділення й утилізації. Дослідження показали, що накопичення відходів у країнах, що розвиваються, впливає на глобальну стійкість навколишнього природного середовища. Спалювання відходів – це найбільш ефективний спосіб, тому що їх обсяг зменшується на порядок, і є можливість отримувати теплову енергію, як наслідок, мінімізується шкідливе навантаження на навколишнє середовище, але синтезуються шкідливі органічні сполуки.

Запропоновано для імітаційного моделювання різних груп ТПВ умовну формулу, в якій в основу покладено масові або об'ємні частки складових частин органічних сполук ТПВ, а також їх хімічні формули. Імітаційне моделювання різних груп ТПВ умовною формулою дало змогу їх класифікувати за чотирма групами. Класифікаційною ознакою стала кількість атомів в органічній сполуці, яка притаманна тим чи іншим видам ТПВ.

У роботі розглядається універсальна піролізна технологія, в основу якої покладена переробка підготовленої сировини. Кожній групі ТПВ відповідає свій процес термічної переробки на установці. Для регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглистіший залишок, який по суті спалюється в зоні хімічної реакції. Використання вуглистого залишку збільшує кількість CO_2 в суміші, яку утворює продукт-газ.

Проаналізовані дані, які визначають кількісний розподіл сірки, хлору і фтору між твердою і газовою фазами на вході в систему очистки газу технології піролізу. Отримані результати дозволяють оцінити концентрацію HCl , HF , SO_3 в продукт-газі, який надходить у систему газоочистки. Основними елементами системи сухої газоочистки є циклон із рукавним тканинним фільтром і попередньо включена камера змішання для подачі в потік продукт-газу сухого порошку лужного сорбенту $Ca(OH)_2$ або Na_2CO_3 .

Розроблена технологічна схема проведення піролізу ТПВ, в основу якої було закладено властивості вивчених технологій. Крім того, були внесені додаткові технологічні прийоми. Додатково визначена область окиснення ТПВ як «фільтраційне горіння». У більшості відомих технологій передбачається, що реакції піролізу протікають як процес окислення сировини підігрітим повітрям, а керування проходить через рециркуляцію частини отриманого продукт-газу, яку використано для балансування термічним навантаженням.

Ключові слова: тверді побутові відходи, імітаційна модель, продукт-газ, кислі гази, піролізна установка, вуглистіший залишок, рукавний фільтр, сухий метод очистки газів.

Постановка проблеми. Декларація з Охорони навколишнього середовища і розвитку була прийнята в 1992 році на Міжнародній конференції ООН в Ріо-де-Жанейро, де визначено світову політику щодо безпечної та екологічно прийнятної утилізації ТПВ. Вимоги до технологій переробки ТПВ – це ефективність, безпека й екологічність через способи повторного використання, сортування, розділення й утилізації [1, с. 3820; 2, с. 491; 3, с. 252]. Низка досліджень [2, с. 492] показали, що накопичення відходів у

країнах, що розвиваються, впливає на глобальну стійкість навколишнього природного середовища [3, с. 253]. Більше того, поліпшення економічного розвитку країн приведе до того, що міські агломерації до 2025 року будуть генерувати 1,3 мільярда тонн ТПВ на рік [4]. Відкрите полігонне зберігання ТПВ в розвинених країнах вважається неприйнятним, дослідження показали [4; 5, с. 228], що такий спосіб утилізації викликає локальні повені, забруднення землі, води і повітря. Великобританія, США, Японія, Італія

ввели безвідходне муніципальне управління ТПВ [6, с. 164], куди входять насамперед технології термічної утилізації і повторне використання та переробка. Аналіз джерел статистичної інформації дозволив сформувати таблицю 1.

Найпоширеніший спосіб утилізації ТПВ – це полігонне захоронення. Спалювання ТПВ – найбільш ефективний спосіб, тому що їх обсяг зменшується на порядок, і є можливість отримувати теплову енергію, як наслідок, мінімізується шкідливе навантаження на навколишнє середовище, але синтезуються шкідливі органічні сполуки. Тому в подальшому в межах розглянутого розділу доцільно розглянути утворення ТПВ та провести аналіз їх складу та класифікувати для їх термічної переробки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Результати систематизації досліджень [7, с. 80; 8, с. 9; 9, с. 69], які показують утворення ТПВ на одну людину протягом року в різних країнах ЄС, було зведено в таблицю 2.

Такі країни, як Швейцарія, Швеція та ФРН, відмовилися від полігонів ТПВ. Ці країни інвестують кошти в такі методи утилізації відходів, як сортування, спалювання та переробка. Румунія, Польща, Чехія, Латвія, Угорщина та Литва – це країни, які більшість своїх відходів утилізують на полігонах, а переробка, спалювання та сортування займає незначну частку. Отже, в Німеччині, Швейцарії, Швеції показник переробки відходів від загальної кількості всіх відходів в країні становить 46,6%, 32,6% та 33,3% відповідно. В інших країнах він коливається від 16,6% до 25%, в Румунії цей показник становить лише 6%.

Як свідчать матеріали, збір і переробка ТПВ – актуальне питання для нашої країни. Українські екологи, науковці представили матеріали про кількість ТБО в Україні і як вона зростає кожного поточного року. Полігони, розташовані за межами міст, перенаповнені ТПВ. Проблема утилізації відходів в міських ЖКГ стоїть дуже гостро і періодично посилюється надзвичайними ситуаціями, стан ТПВ в Україні наведено в таблиці 3 [10].

Таблиця 2

Обсяг утворення ТПВ в країнах ЄС

Країна	ТПВ	
	Питомий показник, на 1 чол. в рік, у кг	Збираються за рік, млн т
Австрія	418	5,70
Бельгія	492	4,35
Угорщина	463	4,70
Німеччина	587	20,50
Данія	820	3,20
Ірландія	730	3,20
Іспанія	609	22,70
Італія	540	32,50
Нідерланди	599	9,30
Португалія	452	4,60
Фінляндія	822	2,50
Франція	570	28,00
Чехія	316	4,64
Швейцарія	352	2,70
Швеція	471	4,20

У відкритих джерелах для умов України не було знайдено результатів систематичних досліджень морфологічного складу ТПВ. Єдиними джерелами статистичних даних були невеликі дослідження, які проводилися операторами ТПВ та відповідними асоціаціями в той чи інший час у тих чи інших регіонах. Їх результати суттєво різняться між собою. Наприклад, згідно з дослідженнями, проведеними в межах національного проекту «Чисте місто», найбільші частки у морфологічному складі ТПВ припадають на продукти харчування (більш ніж 30% загального обсягу) та відходи упаковки, в основному картон і папір [11, с. 230]. За даними інших досліджень [12, с. 410], до структури ТПВ входять харчові відходи – 35–50%, папір і картон – 10–15%, полімери – 9–13%, скло – 8–10%, метали – 2%, текстиль – 4–6%, будівельні відходи – 5%, деревина – 1% та інші відходи – 10% [13, с. 52]. Розбіжності в даних, скоріше за все, пов'язані з обмеженим обсягом вибірки. Обробка даних [11, с. 8231; 12, с. 410] дала змогу отримати такі результати по морфологічному

Таблиця 1

Співвідношення методів утилізації ТПВ в різних країнах

Технології утилізації	Країни								
	США	Велика Британія	Франція	ФРН	Австрія	Італія	Україна	Японія	Південна Корея
Термічна	17	7	37	21	73	13	6	70	18
Полігонна	81	92	53	73	19	84	94	17	79
Компостна		1	10	6	7	3		1	2
Інші	2				1			12	1

Стан ТПВ за адміністративно-територіальним поділом України, без урахування анексованих територій АР Крим і частки Луганської та Донецької областей [10]

Адміністративно-територіальний поділ	Обсяги ТПВ			
	захоронення на полігоні – всього станом на 2019 р.		зібрано всього за 2019 р.	
	млн м ³	млн т	млн м ³	млн т
Вінницька	32,16	64,07	1,48	0,29
Волинська	16,24	48,33	1,12	0,33
Дніпропетровська	44,16	76,33	4,98	0,83
Донецька	64,49	18,56	2,70	0,54
Житомирська	26,59	7,05	1,38	0,31
Закарпатська	11,81	3,60	1,32	0,33
Запорізька	52,02	12,72	3,70	0,61
Івано-Франківська	16,82	3,88	1,03	0,19
Київська	27,64	44,66	1,95	0,35
Кіровоградська	18,61	4,46	1,71	0,37
Луганська	15,17	4,04	0,67	0,16
Львівська	623,06	7,73	4,08	0,69
м. Київ	49,87	13,45	7,83	1,45
Миколаївська	70,50	14,96	1,28	0,22
Одеська	33,96	8,49	3,39	0,85
Полтавська	43,69	8,40	1,90	0,31
Рівненська	34,17	7,92	1,25	0,23
Сумська	12,54	0,39	0,80	0,18
Тернопільська	22,98	5,65	0,92	0,29
Харківська	81,12	16,12	3,74	0,75
Херсонська	28,54	8,37	0,76	0,18
Хмельницька	47,39	9,72	1,65	0,35
Черкаська	14,92	3,48	1,27	0,19
Чернівецька	10,49	2,62	0,80	0,20
Чернігівська	34,16	8,33	1,25	0,23
Всього по Україні:	1433,11	233,44	52,92	10,42

Таблиця 4

Морфологічний склад ТПВ за даними [13, с. 53]

Склад за масою, %															
Харчові відходи	Папір	Картон	Упаковка	ПЕТФ тара	Чорні метали	Кольорові метали	Текстиль	Скло	Деревина	Шкіра, резина	Мин. залишок	Пластмаса	Полімерна плівка	Небезпечні ТПВ	Залишок органіки
39	8	5	0,96	2,09	0,94	0,17	2	13	1	1	4,31	3	2,09	0,02	14,68

складу ТПВ для України в 2018 році: харчові відходи – 54,2%, папір і картон – 16,3%, деревина – 3,5%, метали – 4,2%, текстиль – 6,7%, скло – 4,3%, пластмаса – 6,3%. Окрім того, можливо, що частину органічних відходів не було включено до оцінки. За даними Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства України» морфологічний склад ТПВ наведено в таблиці 4.

Постановка завдання. Метою статті є синтез та обґрунтування імітаційної моделі ТПВ, в основу якої покладено розуміння умовної формули та розроблення схеми термічної переробки за рахунок використання технології піролізу.

Досягнення мети здійснюється розробленням таких завдань:

– класифікація ТПВ за якісним складом елементів, що їх утворюють, та імітаційне моделювання різних груп;

– визначення існуючих технологічних схем термічної переробки ТПВ на піролізних установках;

– визначення метода і технології виведення сполук Cl, S і F під час піролізу ТПВ;

– розроблення технологічної схеми термічної переробки ТПВ піролізною установкою в адиабатичному потоці.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для імітаційного моделювання різних груп ТПВ умовною формулою розглянемо моделі, які запропоновані в [14, с. 180; 15, с. 23], де в основу покладено відомі масові або об'ємні частки складових частин органічних сполук, а також їх хімічні формули. Для цього запропоновано записувати умовну формулу ТПВ у вигляді

$$A_{b_{1T}}^{(1)} A_{b_{2T}}^{(2)} \dots A_{b_{iT}}^{(i)} \dots A_{b_{mT}}^{(m)}, \quad (1)$$

де $A^{(i)}$ – символ i -го хімічного елемента; b_{iT} – кількість атомів i -го хімічного елемента в умовній молекулі ТПВ.

Незважаючи на таке розмаїття органічних речовин і сполук, їх можливо описати за допомогою єдиної моделі. Визначимо модель на прикладі целюлози, що включає до свого складу атоми [C], [H], [O]. Целюлоза є представником кисневмісних вуглеводнів, що охоплюють широкий клас органічних сполук. Так, додаткове врахування всього лише двох елементів [S] і [N], що зустрічаються в ТПВ в менших кількостях, дає змогу змодельовати майже всі органічні сполуки, які є складовими ТПВ [16, с. 44]. Виходячи з умов побудови моделі, немає необхідності враховувати структуру цієї речовини. В цьому разі умовна формула віскози має вигляд

$$C_{b_C} H_{b_H} O_{b_O}. \quad (2)$$

Тут b_C , b_H , b_O – кількість відповідних атомів в умовній формулі пального. Для целюлози

$$b_C=6, b_H=10, b_O=5. \quad (3)$$

У подальшому для зменшення кількості невідомих аргументів під час розрахунків сполук, що утворено, розрахунки проводять на один атом вуглецю, і тому остаточно умовна формула целюлози має вигляд $C_{H_{1,666}O_{0,833}}$.

З таблиці 4 для подальшого аналізу було відібрано лише ТПВ, які, виходячи з хімічних формул цих сполук, можна віднести до класу органічних речовин. У результаті аналізу було сформовано чотири групи ТПВ за такими ознаками: вуглеводневі; вуглеводневі, що містять кисень; вуглеводневі, що містять кисень та азот та вуглеводневі, що містять активні елементи. За правилом подання

інформації у вигляді умовної формули всі хімічні елементи розраховуються на один атом вуглецю. Отриману класифікацію наведено в таблиці 5.

У [17, с. 81] розглядається універсальна піролізна технологія, в основу якої покладена переробка підготовленої сировини. Кожній групі ТПВ відповідає свій процес термічної переробки на піролізній установці, основним елементом якої є піролізна піч (1), що являє собою шахтну піч зі вбудованою всередині швельшахтою (рис. 1). Під впливом власної ваги підготовлені ТПВ (a) опускаються в нижню частину, де проходить хімічна реакція, куди подається підігріте до 400 °С повітря з підігрівача повітря (6), яке за кількістю недостатнє для повного згоряння відходів [17, с. 81].

Частка вуглецевого залишку, який утворюється від розкладання ТПВ, використовується для формування потрібної температури протікання реакції піролізу в (1), а продукт-газ, пройшовши циклон-сепаратором (2), живильним вентилятором (4), подається споживачеві. У цьому відношенні описана технологія нагадує технологію спалювання ТПВ з тією лише різницею, що очищення від пилу не проводиться через утворення високотемпературних газів, для яких знепилюючі установки незастосовні. Отримані в результаті піролізу компоненти продукт-газ і рідкі нафтоподібні продукти (c) можуть бути використані для потреб енергетичного устаткування. З циклон-сепаратора (2) в бункер твердих карбонатів і силікатів (3) направляється отримана суміш, яка розділяється від твердих продуктів. Частину отриманого продукт-газу (5) використовують для підігріву повітря (e) в (6). Через підігрівач повітря (6) димові гази (f) після спалювання продукт-газу в (5) надходять до навколишнього середовища. Із печі (1) шлак, який було утворено, направляють у бункер шлаку (7). Дієвим недоліком такої технології є постійна зміна сировини, яка надходить на термічну переробку. Крім того, для регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглистілий залишок, який по суті спалюється в зоні хімічної реакції. Використання вуглистого залишку збільшує кількість CO_2 в суміші, яку утворює продукт-газ. Таким чином, заздалегідь спроектована установка для постійної переробки ТПВ перетворюється в циклічну, яку кожний раз потрібно налаштовувати для заданої групи ТПВ.

Ще одним недоліком при переробці ТПВ є утворення в продукт-газі кислих газів. У подальшому потрібно розглянути впроваджені технології їх утилізації.

В останній час у країнах ЄС для очищення газоподібних продуктів штучного походження від «кислих» газів найбільшу перевагу віддають сухим методам [18, с. 60], які поряд із прийнятними інвестиційними та експлуатаційними витратами, а також простою концептуальною схемою установки і компактним обладнанням забезпечують впевнене дотримання вимог, які пред'являються Європейською Директивою 2000/76 / ЄС [19, с. 92] до

викидів шкідливих складників зі штучно отриманими газами при термічній утилізації ТПВ.

З урахуванням вищесказаного, для очищення газоподібних продуктів згоряння ТПВ від «кислих» газів пропонується застосувати систему газоочистки, в основі якої лежить сухий лужний метод. Розглянемо коротко суть такого методу.

Для оцінки взаємодії були проаналізовані виконані дослідження [20, с. 80; 21, с. 16], метою яких

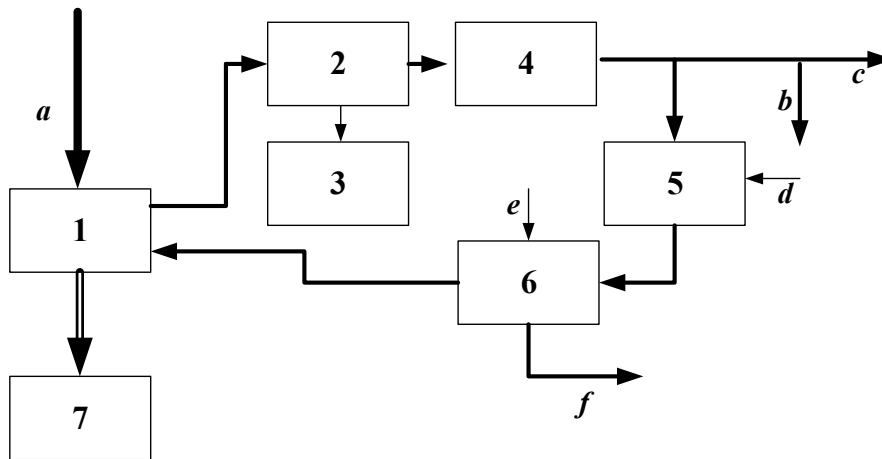


Рис. 1. Схема термічної переробки підготовлених ТПВ технологією піролізу

(1 – піч піролізу, 2 – циклон сепаратор, 3 – бункер твердих карбонатів і силікатів, 4 – живильний вентилятор, 5 – камера спалювання продукт-газу для підігріву повітря, 6 – підігрівач повітря, 7 – бункер шлаку, a – підготовлені ТПВ, b – продукт-газ на аналіз, c – продукт-газ до споживача, d – повітря для підігріву, e – повітря для регенерації, f – димові гази від камера спалювання продукт-газу)

Таблиця 5

Класифікований морфологічний склад ТПВ через представлення умовною формулою

№	Сформована група ТПВ	Назва ТПВ	Умовна формула ТПВ, базовий склад елементів С, Н, О, N	Присутність активних елементів
1	Вуглеводневі	Поліетиленова плівка	$(CH_2)_n$	
		Поліпропіленові елементи конструкцій	$(CH_2)_n$	
		Полістіренові елементи конструкцій	$(CH)_n$	
2	Вуглеводневі ті, що містять кисень	Штучний текстиль. Триацетат целюлози	$(CH_{1,777}O_{0,888})_n$	
		Папір	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Картон	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Упаковка	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Деревина	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		ПЕТФ тара	$CH_{0,8}O_{0,4}$	
		Штучний текстиль. Віскоза	$(C_6H_{2,166}O_{0,833})_n$	
3	Вуглеводневі ті, що містять кисень та азот	Харчові відходи	$CH_{2,055}O_{0,222}N_{0,055}$	
		Штучний текстиль найлон-66	$(CH_{1,8332}O_{0,166}N_{0,166})_n$	
		Вовна	$CH_{2,5}ON_{0,5}$	
		Шкіра	$CH_{1,5}O_{0,312}N_{0,25}$	
		Залишок органіки	$CH_{2,5}ON_{0,5}$	
4	Вуглеводневі ті, що містять активні елементи	Полихлорвінільні елементи конструкцій	$(C_1H_{1,5}Cl_{0,5})_n$	Cl
		Вініліденфторидні елементи конструкцій	$(CHF_2)_n$	F
		Гума, в тому числі автомобільна	$(CH_{1,777}S_{0,444})_n$	S

було визначити кількісний розподіл сірки, хлору і фтору між твердою і газоподібною фазами на вході в систему газоочистки. Отримані результати дають змогу оцінити концентрацію HCl, HF, SO₃ в продукт-газі, який надходить у систему газоочистки.

У [20, с. 81; 21, с. 17] була проведена оцінка розподілу сірки, хлору і фтору по тракту установки, включаючи газоочистку. Система газоочистки включає в себе сухий реактор (абсорбер), в який для уловлювання SO₃, HCl, HF подається розпилений реагент сорбент, і рукавний фільтр.

У таблицях 6 та 7 наведені результати аналізу відібраних у ході випробувань проб для визначення вмісту сірки, хлору і фтору в твердих продуктах згоряння [20, с. 81; 21, с. 18].

За даними табл. 7 можна зробити висновок, що безпосередньо з установки виводиться 86,1–88,4% сірки; 20,5–24,1% хлору; 25,7–28,5% фтору. Слід відзначити, що граничні розрахункові концентрації, що регламентуються для «кислих» газів (SO₃,

HCl, HF), не перевищують відповідно 220; 300 і 15 мг/м³ за нормальних умов.

Метод сухої сорбції наведено для комплексної переробки ТПВ, схема установки для якої показана на рис. 2.

При вихідних концентраціях кислих газів (SO₃, HCl, HF) в синтез-газі (табл. 2.3) можливе їх очищення до спалювання методом сорбції шляхом введення реагенту Ca(OH)₂ або Na₂CO₃ (g) безпосередньо в газохід у сухому розпиленому вигляді з подальшою обробкою і фільтрацією твердих частинок в циклоні з рукавним фільтром (4). З циклону видаляються продукти сорбції та винесений пил з печі піролізу (h). Розкислений продукт-газ (j) продуктивним вентилятором продукт-газу (5) направляється споживачу.

Основними елементами системи сухої газоочистки є циклон з рукавним тканинним фільтром (4) і попередньо включена камера змішання для подачі в потік продукт-газу (j) сухого порошку лужного сорбенту Ca(OH)₂ або Na₂CO₃ (g).

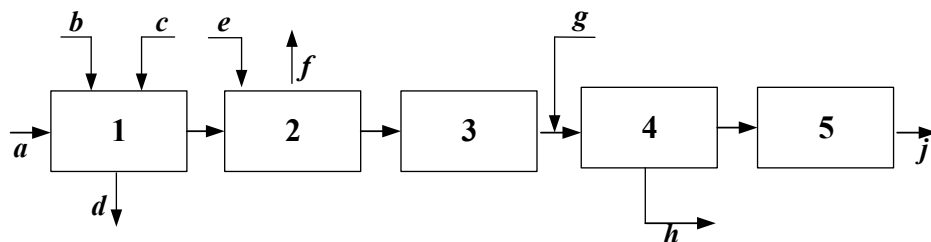


Рис. 2. Схема сухої сорбції при термічній утилізації ТПВ технологією піролізу

(1 – піч піролізу, 2 – підігрівач гарячої води; 3 – звужуючий пристрій, 4 – циклон з тканинним рукавним фільтром; 5 – продуктивний вентилятор продукт-газу, а – повітря, b – сухий порошок CaO або Na₂O, c – ТПВ, d – вугільний залишок, e – холодна вода, f – гаряча вода, g – сухий порошок лужного сорбенту Ca(OH)₂ або Na₂CO₃, j – очищений продукт-газ, h – продукти сорбції та винесення пил з печі піролізу.)

Таблиця 6

Масовий вміст сірки, хлору і фтору в відібраних пробах твердих продуктів піролізу

Компонент	Вид відібраної проби		
	Вуглистіи залишок	Винесна зола утилізаційної установки	Винесна зола рукавного фільтра
SO ₃ , %	3,3	5,05	4,85
Cl, %	0,3	2,60	10,85
F, мг/кг	8,60	8,70	10,00

Таблиця 7

Результати розрахунку виходу сірки, хлору і фтору в різних точках установки піролізу

Компонент	Вид розглянутої компоненти в елементах технології			
	Вуглистіи залишок кг/год	Газ на виході з утилізаційної установки, кг/год	Газ на виході з рукавного фільтра кг/год	Газ на виході в систему очищення кг/год
SO ₃	55,1	0,93	7,35	0,02
Cl	5,17	0,48	18,05	0,22
F	14,81	0,16	1,55	36,00

Основний технологічний процес очистки методом сорбції полягає в розпорошенні лужних реагентів (g) в камеру газоходу та змішуванні з потоком продукт-газу в паралельному напрямі. Для інтенсифікації перемішування і рівномірного розсіювання реагентів камера змішання виконана у вигляді пристрою звуження. Введені реагенти вступають у реакцію з кислими газами й адсорбують кислі гази, що знаходяться в газоподібному стані. Далі продукти піролізу ТПВ у вигляді пилу, кислих газів, які частково вступили в реакцію з реагентами, та залишкові реагенти потрапляють у циклон із тканинним рукавним фільтром (4), де тверді частинки осідають на поверхні фільтруючого тканини. Зі збільшенням шару твердих частинок підвищується фільтруюча здатність пиловловлювача. Крім того, реагенти, що містяться в такому шарі, забезпечують додаткове очищення продукт-газу при фільтрації їх через створений шар [22, с. 54].

Реакцію піролізу ТПВ можна уявити як: $\text{ТПВ} + \text{енергія} = \text{C (вуглистім залишок)} + \text{смоли} + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{C}_n\text{H}_m + \text{HCl} + \text{HF} + \text{SO}_3$. Первинними продуктами можуть бути рідина, тверда вуглиста речовина і гази залежно від виду і параметрів процесу піролізу, вторинними – енергія, паливо та продукти органічної хімії.

Твердим продуктом піролізу є вуглистім залишок, теплова утворююча здатність якого $Q_{\text{рн}} = 30$ МДж/кг, вихід якого може досягати 30–35% від маси ТПВ. Вуглистім залишок може використовуватися для технологічних потреб металургії, фармакології, для сорбційного очищення води і газів.

Газоподібні продукти, по-перше, продукт-газ, теплоутворююча здатність якого $Q_{\text{рн}} = 15\text{--}22$ МДж/н м³, і по-друге, при частковій газифікації низькокалорійний газ ($Q_{\text{рн}} = 4\text{--}8$ МДж/н м³). Вихід газоподібного палива може доходити до 70% від маси ТПВ. Склад газу залежить від сировини і параметрів процесу. Низькокалорійний газ використовується в самому процесі піролізу для підтримки процесу і сушіння вихідної маси ТПВ.

Сучасні технології піролізу поділяють за ознаками, які наведено в таблиці 8: швидкість нагріву (швидкий, повільний піроліз), середовище, в якому відбувається піроліз (вакуумний, гідропіроліз, метанопіроліз) [23, с 94].

На підставі аналізу технологічних схем проведення піролізу та узагальнення отриманих результатів по класифікації ТПВ та проведеного огляду літературних джерел щодо закономірностей регульованого термічного розкладання ТПВ можна зробити таке узагальнення.

1. Для кожної з груп ТПВ (див табл. 4) залежно від фізико-хімічних властивостей склад продуктів піролізу залежить від умов нагрівання температури і швидкості її зростання. Швидке нагрівання приводить до підвищення частки твердого залишку в продуктах піролізу.

2. Основні експериментальні дані щодо залежності частки твердих, рідких і газоподібних продуктів піролізу від температури і темпу нагріву отримані для харчових відходів.

3. Не виявлено у відкритих джерелах результати узагальнень експериментальних даних, які б дозволили зробити обґрунтований висновок про схожість механізмів термічного розкладання різних видів ТПВ, відповідно залежності складу

Таблиця 8

Характеристики основних технологій піролізу

Характеристики	Швидкий піроліз, низькі температури	Швидкий піроліз, високі температури	Повільний піроліз
Час процесу	1...3 с	2...5 с	до 1800 с
Розмір сировини	малий	малий	середній
Вологість сировини	дуже низька	дуже низька	низька
Температура, °С	550...650	700...1100	600...800
Надлишковий тиск, кПа	120	50...200	150
Газ:			
вихід, % маси сухої сировини	до 30	до 70	до 40
теплота згоряння, МДж/н м ³	10–20	10–20	5–10
Рідина:			
вихід, % маси сухого залишку*	до 80	до 20	до 30
теплота згоряння, МДж/кг	23	23	23
Тверда речовина:			
вихід, % маси сухого залишку	до 15	до 20	20...30
теплота згоряння, МДж/кг	30	30	30

продуктів піролізу від температури та швидкості її зміни.

4. Не встановлено зв'язок виходу продуктів піролізу зі структурою або параметрами ТПВ, що характеризують її склад чи структуру. Відсутні результати теоретичних досліджень процесів як повільного, так і швидкого піролізу ТПВ.

З опису технологічних схем і експериментальних даних цих схем була розроблена технологічна схема проведення піролізу ТПВ, в основу якої було закладено кращі властивості опанованих технологій. Крім того, були внесені додаткові технологічні прийоми. Була додатково визначена область окислення ТПВ як «фільтраційне горіння», в більшості відомих технологій передбачається розгляд реакцій як процес окислення сировини повітрям. Ці екзотермічні реакції розглядаються як джерело теплової енергії для підтримки процесу горіння. У [24, с. 26] розглядається можливість присутності як ендотермічних окиснювачів водяної пари і діоксиду вуглецю. У цьому разі кисень повітря як окиснювач необхідний як реагент, який підтримує екзотермічну реакцію – джерело теплової енергії. В результаті виділення кращих технологічних прийомів кожної схеми на рис. 3 запропоновано

технологічну схему установки піролізу ТПВ, яка функціонує в такий спосіб.

Непідготовлені ТПВ (*a*) надходять на дробильну установку (4), далі в приймальний бункер підготовленого ТПВ (3) запропонованої установки піролізу. З приймального дозуючого бункера ТПВ подають у проміжний бункер (2), днищем якого слугує пластинчастий живильник, призначений для завантаження ТПВ в піч піролізу фільтраційного горіння (1). Крім того, в піч піролізу з бункера розчинюючих матеріалів (5) подаються лужні сполуки CaO або Na₂O. Ще з підігрівача повітря в піч піролізу (6) подається регенеративне підігріте повітря (*e*). Піроліз проводиться при температурі 550–650 °С без доступу повітря або з його обмеженням. У результаті утворюється газова суміш (*c*), яка містить у своєму складі продукт-газ, що утворився, кислі гази, пари смол і твердий вуглецевмісний продукт – вуглецевий залишок (*i*). Керування процесом піролізу відбувається, на відміну від попередньо розглянутих схем, регулюванням подачі первинного продукт-газу (*d*).

Отриманий у печі вуглисті залишок (*i*) з температурою 450–500 °С у відсутності окиснювача надходить в холодильний барабан (10), де охоло-

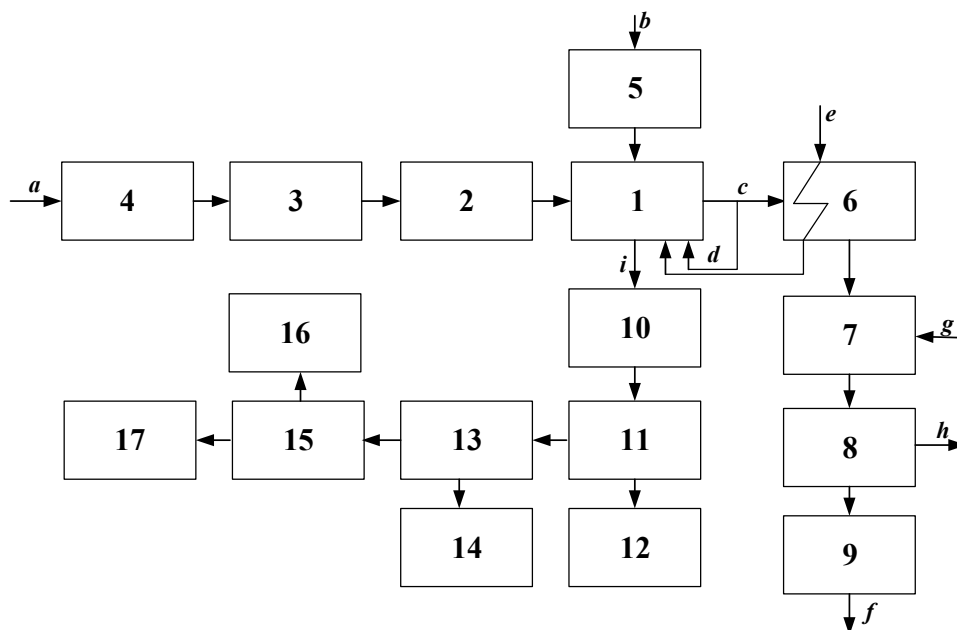


Рис. 3. Запропонована технологічна схема установки піролізу ТПВ

(1 – піч піролізу фільтраційного горіння, 2 – дозуючий бункер, 3 – бункер підготовленого ТПВ, 4 – дробильна установка, 5 – бункер розчинюючих матеріалів з CaO або Na₂O, 6 – підігрівач повітря для печі піролізу, 7 – звужувачий пристрій, 8 – циклон з тканинним рукавним фільтром, 9 – продуктивний вентилятор продукт-газу, 10 – холодильний барабан охолодження вуглистого залишку, 11 – електромагнітний сепаратор, 12 – бункер чорного металу, 13 – мельниця сепаратор матеріалів, 14 – бункер селікатних матеріалів, 15 – мокрий сепаратор-мельниця вуглистого залишку і кольорових металів, 16 – бункер кольорового металу, 17 – бункер вуглистого залишку, *a* – непідготовлені ТПВ, *b* – сухий порошок CaO або Na₂O, *c* – отримана первина суміш продукт-газу, *d* – первинний продукт-газ який витрачено на піроліз, *e* – повітря для технологічного процесу, *i* – первинний вугільний залишок, *g* – сухий порошок лужного сорбенту Ca(OH)₂ або Na₂CO₃, *h* – продукти сорбції та винесений тил ТПВ з печі піролізу, *f* – очищений продукт-газ).

джується до 40–50 °С, і далі по стрічковому конвеєру подається на помел, попередньо пройшовши електромагнітний сепаратор (11) для вилучення залишків чорного металу, які направляються в бункер (12), і потім надходить на мельницю-сепаратор (13) для відділення силікатних фрагментів ТПВ, які направляються в бункер (14), і далі зазнає мокрому помелу (15). Подрібнені частинки розміром до 5 мм і менше, надходять на відцентрову сепарацію для вилучення фрагментів кольорових металів, які направляються в бункер (16), а вуглисті залишок направляють в бункер (17). Одночасно з цим отримана в печі (1) первинна суміш продукту-газу (с) направляється в підігрівач повітря для печі піролізу (6), де продукт-газ передає тепло повітрю.

При вихідних концентраціях кислих газів (SO_3 , HCl , HF) в продукт-газі проходить його очищення методом сорбції шляхом керованого введення сухого порошку $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 (g) безпосередньо в газогін у звужуючий пристрій (7) із подальшою обробкою і фільтрацією твердих частинок (h) в циклоні з рукавним фільтром (8). З циклону видаляються продукти сорбції та винесений пил з печі піролізу (h). Розкислений продукт-газ (j) продуктивним вентилятором продукт-газу (9) направляється споживачу.

Висновки. Імітаційне моделювання різних груп ТПВ умовною формулою дозволило їх класифікувати за чотирма групами. Класифікаційною ознакою стала кількість атомів в органічній сполуці, яка притаманна тим чи іншим видам ТПВ. До першої групи потрапили ТПВ, які умовно можна віднести до такої умовної формули C_nH_m , – вуглеводневі. Основу таких ТПВ становить насамперед поліетиленова плівка, поліпропіленові та полістерені елементи штучних конструкцій. До другої групи потрапили ТПВ, які умовно можна віднести до наступної умовної формули $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_k$, – вуглеводневі, що містять кисень. Основу таких ТПВ становить насамперед папір, картон, деревина, ПЕТФ-тара, штучний текстиль (триацетат целюлози та віскоза). До третьої групи було віднесено ТПВ,

які умовно можна віднести до наступної умовної формули $\text{C}_n\text{H}_m\text{N}_k$, – вуглеводневі, що містять кисень і азот. Основу таких ТПВ складають насамперед харчові відходи, залишки органіки, нейлон, вовна, шкіра. До четвертої групи було віднесено ТПВ, які умовно можна віднести до умовних формул $\text{C}_n\text{H}_m\text{F}_k$, $\text{C}_n\text{H}_m\text{Cl}_k$, $\text{C}_n\text{H}_m\text{S}_k$ – вуглеводневі, що містять активні елементи. Основу таких ТПВ складають насамперед поліхлорвінільні та вініліденфторидні елементи конструкцій, гума, в тому числі автомобільна.

Розглянуто технологічні схеми піролізу підготовлених ТПВ. Схема має свої недоліки та переваги. До недоліків було віднесено незрозумілий технологічний прийом очищення продукт-газу від кислих газів. Крім того, для регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглисті залишок, якій по суті спалюється в зоні хімічної реакції. Використання вуглистого залишку збільшує кількість CO_2 в суміші продукт-газу.

Показана оцінка розподілу сполук сірки, хлору і фтору по тракту піролізної установки. Приведено схему систему газоочистки, яка включає в себе абсорбер, в який для уловлювання кислих газів SO_3 , HCl , HF подається розпилений реагент сорбент у вигляді сухого лужного порошку сорбенту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ або Na_2CO_3 , і рукавний фільтр. Для очищення газоподібних продуктів згоряння ТПВ від «кислих» газів пропонується застосувати систему газоочистки, в основі якої лежить сухий лужний метод.

Показано, що вуглисті залишок має теплоутворюючу здатність $Q_{\text{рн}}=30$ МДж/кг, вихід якого може досягати 30–35% від маси ТПВ. Продукт-газ має теплоутворюючу здатність $Q_{\text{рн}}=15\text{--}22$ МДж/н м³, і при частковій газифікації низькокалорійний газ $Q_{\text{рн}}=4\text{--}8$ МДж/н м³. Запропонована технологічна схема, де піч піролізу працює за технологією фільтраційного горіння, підігрів повітря для окиснювання здійснюється за рахунок охолодження продукт-газу, а в піч додатково для розкислення додається сухий порошок CaO або Na_2O .

Список літератури:

1. Cheng Hu Y. Municipal solid waste as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, № 11. P. 3816 – 3824.
2. Sharholly M., Ahmad K., Vaishya R., Gupta R. Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India. *Waste Management*. 2007. Vol. 27, № 4. P. 490 – 496.
3. Ziadat A., Mott H. Assessing solid waste recycling opportunities for closed campuses. *Management of Env Quality*. 2005. Vol. 16, № 3. P. 250 – 256.
4. World Bank. What a Waste: Global Review of Solid Waste Management. Washington: *Urban Development*, 2012.
5. Themelis N., Kim Y., Brady M. Energy recovery from New York City municipal solid wastes. *Waste Management & Research*. 2002. Vol. 20, № 3. P. 223 – 233.

6. Ahmed A. Environmental Properties of Waste By Product *Materials Used in Constructions*. J solid waste techno mgmt. 2014. Vol. 40, № 2. P. 160 – 169.
7. Систер В.Г., Мирный А.Н. Гюнтер Л.И. Экологические проблемы мегаполисов. М.: Акад. коммун. хоз-ва им. К.Д. Памфилова, 2004. 431 с.
8. Сопилко Н.Ю. Переработка отходов: анализ мировых тенденций. *Твердые бытовые отходы*. 2011. № 11. С. 9.
9. Бабанин И.В. Отходы в странах Европейского союза: статистика и динамика. *Твердые бытовые отходы*. 2011. № 6. С. 68–71.
10. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2019 рік. *Офіційний веб-сайт Міністерства розвитку громад та територій України*. 12.03.2020. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vi/> дата зверн.24.04.2020
11. Райзберг Б.А., Стародубцева Б.Б. Современный экономический словарь: *Методологические указания*. М.: ИНФА, 1999. 479 с.
12. Гринь С.А., Дреева А.С., Кызынгашева А.А. Проблемы утилизации твердых бытовых отходов в Украине. *Young Scientist*. 2018. № 10. С. 411–415.
13. «Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні»: *Практичний посібник*. За ред. Г. Гелетука. К.: «Поліграф плюс», 2015. 72 с.
14. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: *справ. АН СССР*, ВИНТИ, 1972. Т. 1. 266 с.: ил.
15. Максимов М.В., Брунеткин А.И., Бондаренко А.В. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании. *Вост.-европ. журн. передовых технологий*. 2013. Т. 6. № 8 (66). С. 20–27.
16. Maksimov M., Davydov V., Krusir G., Maksimova O. Increasing of process efficiency of biogas plants production processing. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2017. Iss. 3. P. 43–53.
17. Петрук В.Г., Васильківський І.В., Кватернюк С.М., Турчик П.М., Іщенко В.А., Петрук Р.В. Управління та поводження з відходами. Частина 2. Тверді побутові відходи: *навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2013. 243 с.
18. Паулынтайнер Р., Граф М., Штубенволь И. Австрийская система очистки дымовых газов. *Твердые бытовые отходы*. 2007. № 4. С. 59– 63.
19. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on incineration of waste. *Official Journal of European Communities*, 28.12.2000. P. 332/91-332/111.
20. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка влияния минеральной части отходов на экологические характеристики образующихся при сжигании дымовых газов. Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы: *сб. докл. 5-ой науч.-практ. конф.*, т. 1. Челябинск, 2011. С. 78–86.
21. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка влияния минеральной части отходов на содержание в дымовых газах газообразных соединений серы, хлора и фтора. *Электрические станции*. 2011. № 10. С. 15–20.
22. Угначев В.И., Епихин А.Н., Тугов А.Н. Контроль работы газоочистного оборудования на установках для сжигания твердых бытовых отходов. *Теплоэнергетика*. 2001. № 12. С. 52–56.
23. Сидорчук О.В. Розробка комплексної технології отримання біогазу із багатокомпонентних субстратів: дис... канд. техн. наук. К., 2013. 166 с.
24. Brunetkin O., Maksymov M. V., Maksymenko A., Maksymov M. M. Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4/6 (100). P. 25–31.

Tarakhtii O.S., Butenko O.V. SIMULATION MODEL OF SOLID WASTE AS A CONTROL OBJECT

Requirements for solid waste treatment technologies (SW) are efficiency, safety and environmental friendliness through the methods of reuse, sorting, separation and disposal. Studies have shown that the accumulation of waste in developing countries affects the global sustainability of the environment. Waste incineration is the most efficient way because its volume is reduced by an order of magnitude, and it is possible to obtain thermal energy and, as a result, minimize the harmful load on the environment, but synthesize harmful organic compounds.

A simulation modeling for different groups of solid waste conditional formula, which is based on a mass or volume fraction of the components of organic compounds solid waste, as well as their chemical formulas. Simulation of different groups of solid waste by the conditional formula allowed to classify them into four groups. The classification feature was the number of atoms in the organic compound, which is inherent in one or another type of solid waste.

The paper considers the universal pyrolysis technology, which is based on the processing of prepared raw materials. Each group of solid household waste corresponds to its own process of thermal processing at the installation. To regulate the amount of heat supplied, a carbonaceous residue is used, which is essentially burned in the chemical reaction zone. The use of a carbonaceous residue increases the amount of CO₂ in the mixture formed by the gas product.

Data were analyzed that determine the quantitative distribution of sulfur, chlorine and fluorine between the solid and gas phases at the entrance to the gas purification system of pyrolysis technology. The obtained results allow to estimate the concentration of HCl, HF, SO₃ in the product gas that enters the gas cleaning system. The main elements of the dry gas cleaning system are a cyclone with a bag filter and a pre-included mixing chamber for feeding the product gas product of dry powder of alkaline sorbent Ca(OH)₂ or Na₂CO₃.

A technological scheme for pyrolysis of solid household waste was developed, which was based on the properties of the studied technologies. In addition, additional technological techniques were introduced. The area of solid waste oxidation was additionally defined as "filtration combustion". Most known technologies assume that pyrolysis reactions take place as a process of oxidation of raw materials with heated air, and control takes place through the recirculation of part of the obtained product gas which is used to balance the thermal load.

Key words: *solid household waste, simulation model, product gas, acid gases, pyrolysis installation, carbonaceous residue, bag filter, dry method of gas purification.*