

Праженнік Ю.Г., Ховавко О.І., канд. техн. наук,
ORCID: 0000-0001-7372-5174, Марчук Ю.В., канд. техн. наук,
Снігур О.В., Небесний А.А.

Інститут газу Національної академії наук України, Київ
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, e-mail: uprazh@gmail.com

Теоретичні та експериментальні дослідження методів термохімічної переробки твердих побутових відходів

Наведено результати термодинамічного аналізу процесів термохімічної переробки твердих побутових відходів (ТПВ). Для проведення розрахунків використано програмне забезпечення TERRA, за допомогою якого розраховувалися показники рівноважного стану продуктів реакції. Показано, що точність результатів розрахунку визначається точністю значення нижчої теплотворної здатності $Q_{нр}$, що використовується. Контрольні розрахунки виконано для чистого вуглецю, глюкози, целюлози, поліетилену. Термодинамічний аналіз можливостей термохімічної утилізації виконано на підставі проведених досліджень складу ТПВ, одержаних безпосередньо з полігонів України. Показано, що адіабатична температура суттєво залежить від вмісту оксидів — компонентів золи — та їхнього хімічного складу. Розроблено та виготовлено лабораторну установку для вимірювання температури, ваги та складу газу. Дослідження провадилося за допомогою системи на базі персонального комп'ютера з використанням модуля сполучення територіально-розподільних датчиків I-7018 та I-7520 — ізольованого модуля конвертора каналу зв'язку SR-232/RS-485. Для досліджень термічної обробки ТПВ запропоновано поєднання термогравітаційного аналізу з можливістю хроматографічного контролю складу газової фази на всіх етапах термічної обробки. Виконано кінетичні дослідження газифікації деревини за допомогою гравіметричного аналізу з одночасним визначенням складу газової фази. *Бібл. 16, рис. 4, табл. 2.*

Ключові слова: тверді побутові відходи, термохімічна утилізація, термогравіметрія, хроматографічний аналіз.

Україна щорічно споживає близько 210 млн т умовного палива та належать до енергодефіцитних країн, тому що задовольняє свої потреби в енергоспоживанні на 53 %, імпортує 75 % необхідного об'єму природного газу та 85 % сирої нафти й нафтопродуктів. Така структура первинних енергоресурсів (ПЕР) економічно недоцільна, спричиняє залежність України від країн-експортерів нафти і газу та загрожує її енергетичній та національній безпеці. Виходячи із завдань державної політики енергозбереження на період до 2015 року, в Україні необхідно забезпечити зниження споживання ПЕР по відношенню до 1990 року на 108 млн т у.п. [1].

Новий критерій оцінки економічного розвитку країн, який з'явився за останні десятиріччя, — це частка енергії, виробленої з нетрадиційних

та відновлюваних джерел. У високо розвинутих країнах вона досягає від 0,7 % (Велика Британія) до 64,5 % (Ісландія) та має чіткі тенденції до збільшення у майбутньому.

Важливе місце серед відновлюваних джерел енергії займають тверді побутові відходи (ТПВ). Вони накопичуються постійно та після відповідної переробки можуть використовуватися в енергетиці, хімічних технологіях, виробництві водню набагато ефективніше, ніж традиційне органічне паливо. ТПВ невичерпні, їх потенціал мало змінюється у часі (до того ж у бік підвищення); крім того, процеси термохімічної утилізації ТПВ допомагають підвищенню екологічної безпеки навколишнього середовища.

Мета цієї роботи — теоретичні та експериментальні дослідження процесів термохімічної ути-

лізації твердих побутових відходів з виробленням теплової та електричної енергії, а також горючих газових сумішей, які можуть використовуватись як паливо та сировина для подальшого хімічного синтезу, водневої енергетики тощо.

Кінцевою метою цього напрямку досліджень є розробка технології та обладнання термохімічної утилізації ТПВ, оптимізація техніко-економічних показників процесу, в тому числі мінімізація шкідливих викидів.

Термодинамічний аналіз процесів термохімічної переробки ТПВ українського походження. Особливості комп'ютерних програм. Види розрахунків

Програма TERRA [2], за допомогою якої розраховувалися показники рівноважного стану продуктів реакції, дає можливість виконувати два види розрахунків: 1) розрахунок рівноважного складу продуктів реакції при заданих параметрах вихідної суміші та температурі продуктів $T_{пр}$, К; 2) розрахунок адіабатичної температури $T_{ад}$, К, та рівноважного складу продуктів при заданих параметрах вихідної суміші.

У розрахунках першого виду програма використовує тільки табличні значення констант рівноваги потрібної кількості незалежних реакцій за участю компонентів (елементів) вихідної суміші [3].

У розрахунках другого виду програма використовує також табличні значення ентальпій утворення та/або повних ентальпій компонентів (речовин) вихідної суміші та продуктів реакції [3].

Усі названі значення у широкому діапазоні температур заведені у програму як константи (точніше – апроксимовані у вигляді поліномів) та долучаються до розрахунку в автоматичному режимі. Дані [3] не викликають сумніву та мають найбільшу точність.

Проблеми виникають при розрахунках термохімічних перетворень за участю твердих або рідких палив, для яких більш-менш точно визначений тільки елементний склад, за допомогою якого без додаткової інформації неможливо визначити теплоту утворення або повну ентальпію.

У цих випадках до характеристик вихідної суміші найчастіше додають значення нижчої або вищої теплотворної здатності палива. Оскільки переважна більшість твердих та рідких палив не є індивідуальними речовинами, точність результатів розрахунку визначається точністю застосова-

ного значення нижчої теплотворної здатності $Q_{н^P}$.

Порівняльна оцінка методів визначення величини $Q_{н^P}$ [4] дала можливість зробити висновок, що найбільш точні результати (за винятком експериментального методу) дає формула Д.І. Менделєєва.

Величина теплотворної здатності є надзвичайно важливою характеристикою твердого палива, зокрема ТПВ: на її підставі виконуються теоретичний аналіз процесів газифікації твердих палив та термохімічної переробки ТПВ з одержанням теплової енергії або синтезу газу, практичні розрахунки технологічних параметрів, а також оптимізація технологічних режимів промислових процесів.

Як показано раніше [2], нижча робоча теплота згоряння $Q_{н^P}$ ТПВ найкраще апроксимується формулою Менделєєва [5], яка найширше уживана в інженерних та теоретичних розрахунках, а також формулою Держстандарту України [6], яка співпадає з [5] після перерахунку з ккал на кДж шляхом множення на коефіцієнт 4,187:

$$Q_{н^P} = 339 C^P + 1030 H^P - 109 (O^P - S^P) - 25 W^P, \text{ кДж/кг.} \quad (1)$$

Детальний порівняльний аналіз результатів розрахунку $Q_{н^P}$ за різними формулами описаний у [6].

Усі розглянуті емпіричні формули, наведені в численних публікаціях та підтверджені практичним використанням, дають надійні результати стосовно таких твердих палив, як кам'яне та буре вугілля, торф, деревина та інші, молекулярний склад яких значною мірою подібний. Що ж стосується ТПВ, основну частину горючої маси складають речовини, істотно відмінні від попередніх: харчові відходи, рослини, пластик, текстиль, шкіра, а отже, теплові ефекти деструкції та окислення цих молекул можуть істотно впливати на результати розрахунків [7]. Застосування цих формул у розрахунках ТПВ не знайшло достатнього підтвердження.

У країнах Західної Європи та США поширене використання формули Дюлонга, яка застосовується для розрахунків як твердих, так і рідких палив, хоча у деяких джерелах [8–10] визнається менш точною, ніж (1). Однак, з огляду на досягнення вказаних країн у галузі термохімічної утилізації ТПВ можливість застосування цієї формули у порівнянні з раніше отриманими результатами потребує додаткового розгляду.

Зокрема, у публікації [11] запропонована Modified Dulong formula (для вологих умов):

$$\text{BTU/lb} = 145 C + 610 (H_2 - O_2/8) + 40 S + 10 N.$$

Перерахунок у систему СІ можна здійснити за формулою:

$$Q_{н^p} = [145 C + 610 (H_2 - O_2/8) + 40 S + 10 N] \times 2,326 = 337 C + 1419 (H_2 - O_2/8) + 93 S + 23 N, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

але ця формула викликає сумнів, оскільки до правої частини не входить значення вологості W (можливо, вологість враховано зменшеними концентраціями решти компонентів).

Натомість, у публікації [6] запропонована формула Дюлонга у такому вигляді:

$$Q_{н^p} = 81,4 C + 342(H - O/8) + 25 S - 6 (9 H + W), \text{ ккал/кг},$$

або після перерахунку

$$Q_{н^p} = 341 C + 1432 (H - O/8) + 105 S - 25 (9 H + W), \text{ кДж/кг}, \quad (3)$$

до якої не входить значення азоту N .

У роботі [7] формула Дюлонга наведена у такому вигляді:

$$Q_{н^p} = [8080 C + 34460 (H - (O + N)/8) + 2250 S]/100, \quad (4)$$

а також вказано, що формула (1) є більш прийнятною для вугілля. До того ж усі розрахункові формули дають більш-менш подібні результати, які проте відхиляються від величини, що віднайдена емпіричним шляхом.

Для палив з високим вмістом кисню (деревина, торф, буре вугілля) за формулою Дюлонга одержують менші значення теплоти згорання [11]. Наприклад, різниця між теплотворною здатністю горючої маси деревини, визначеною калориметрично (4510 ккал/кг) та розрахованою за формулою Дюлонга (4360 ккал/кг), складає $4510 - 4360 = 150$ ккал/кг (або 3,3%), у перерахунок на кДж/кг: $18883 - 18255 = 628$ кДж/кг.

З метою порівняльних розрахунків величини $Q_{н^p}$ скористуємося обґрунтованим значенням елементного складу та $Q_{н^p}$ деревини [3].

Значення $Q_{н^p}$, % на робочу/суху масу: С — 40,5/50,63; Н — 4,8/6,0; О — 33,8/42,25; N — 0,1/0,13; А — 0,8/1,0; W — 20,0/-; $Q_{н^p}$ — 14480/18100 кДж/кг [8].

Розрахунок проведено за формулами:

$$(1) - Q_{н^p} = 339 \times 40,5 + 1030 \times 4,8 - 109 \times 33,8 - 25 \times 20,0 = 13730 + 4944 - 3684 - 500 = 14490 \text{ кДж/кг};$$

$$(2) - Q_{н^p} = 337 \times 40,5 + 1419 (2,4 - 16,9/8) + 0 + 23,26 \times 0,1 = 13649 + 412 + 23,26 = 14084 \text{ кДж/кг};$$

$$(3) - Q_{н^p} = 341 \times 40,5 + 1432 (4,8 - 33,8/8) + 0 - 25 (9 \cdot 4,8 + 20) = 13811 + 823 - 1580 = 13054 \text{ кДж/кг};$$

$$(4) - Q_{н^p} = [8080 \times 40,5 + 34460 \times (4,8 - (33,8 + 0,1)/8) + 0]/100 = (327240 + 19384)/100 = 3466 \text{ ккал/кг} (\times 4,187 = 14490 \text{ кДж/кг}).$$

З обґрунтованим у [8] значенням $Q_{н^p} = 14,48$ МДж/кг найкраще збігається значення 14,49 МДж/кг, отримане за формулою Менделєєва, та близьке до нього 14,084 МДж/кг — за формулою (2) (відносна похибка — 2,7%).

Еталонними значеннями можуть бути індивідуальні речовини, для яких надійне значення $Q_{н^p}$ може розраховуватися за допомогою таблиць термодинамічних властивостей [3] або взятє з джерел, які викликають певну довіру. Контрольні розрахунки виконані для речовин, наведених нижче.

1. Чистий вуглець (С = 100 %):

— за таблицями [1], $Q_{н^p} = 32792$ кДж/кг;

— за різними джерелами, у середньому $Q_{н^p} = 32800$ кДж/кг;

— за формулою Менделєєва, $Q_{н^p} = 33900$ кДж/кг;

— за формулою Дюлонга (2), $Q_{н^p} = 33700$ кДж/кг.

2. Глюкоза ($C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 = 6 CO_2 + 6 H_2O + 2826$ кДж/моль. Склад, % (мас.): С — 40; Н — 6,667; О — 53,333) [12]:

— за даними [9], $Q_{н^p} = 15700$ кДж/кг;

— за формулою (1), $Q_{н^p} = 14614$ кДж/кг;

— за формулою (2), $Q_{н^p} = 13480$ кДж/кг.

3. Целюлоза ($(C_6H_{10}O_5)_n + (6 O_2)_n = (6 CO_2)_n + (5 H_2O)_n + 16400$ кДж/кг. Склад, % (мас.): С — 44,45; Н — 6,17; О — 49,38) [13]:

- за формулою (1), $Q_{н}^p = 16042$ кДж/кг;
- за формулою (2), $Q_{н}^p = 14980$ кДж/кг.
- 4. Поліетилен $((CH_2)_n + 1,5n O_2 = n CO_2 + n H_2O + 47,14$ МДж/кг. Склад, % (мас.): С – 85,7; Н – 14,3) (табл. 1):
 - за даними [13], $Q_{н}^p = 47140$ кДж/кг;
 - за формулою (1), $Q_{н}^p = 43781$ кДж/кг;
 - за формулою (2), $Q_{н}^p = 47328$ кДж/кг.
- 5. Каучук натуральний $((C_5H_8)_n$. Склад, % (мас.): С – 88,2; Н – 11,8):
 - за даними [14], $Q_{н}^p = 44730$ кДж/кг;
 - за формулою (1): $Q_{н}^p = 42054$ кДж/кг;
 - за формулою (2): $Q_{н}^p = 46467$ кДж/кг.

Отже, окремі приклади, розглянуті вище, дають можливість дійти попереднього висновку: формула Дюлонга має перевагу для розрахунку $Q_{н}^p$ тих компонентів ТПВ, які не містять кисню у складі горючої маси, в інших випадках перевагу має формула Менделєєва.

Для остаточного висновку наведених прикладів не досить. Найбільшу точність мають експериментальні дані, отримані за методом калориметричної бомби [15]. Але, оскільки існує безкінечна кількість складів ТПВ, то, на нашу думку, слід накопичувати банк даних експериментального винайдених $Q_{н}^p$ компонентів морфологічного складу (сухої маси), а теплотворну здатність ТПВ обчислювати за принципом адитивності $Q_{н}^p$ окремих компонентів [16].

Дослідження кінетики процесів газифікації

Для проведення досліджень була розроблена та виготовлена лабораторна установка, схема якої зображена на рис. 1.

Установка складається з блоку реактор – піч, допоміжного обладнання, систем вимірювання та обробки експериментальних даних.

Таблиця 1. Молекулярна маса та формула поліетилену

Table 1. Molecular mass and formula of polyethylene

Середньомасова молекулярна вага [14]				
Поліетилен	Молекулярна вага	Середня молекулярна вага	n	Формула
ВД	80.000–500.000	290.000	20.700	$(CH_2)_{20.700}$
СД	300.000–400.000	350.000	25.000	$(CH_2)_{25.000}$
НД	80.000–3000.000	1540.000	110.000	$(CH_2)_{110.000}$

Примітка. Оскільки величина «n» не впливає на склад палива, виражений у масових відсотках, розрахунок за формулами (1) та (2) для поліетилену високого (ВД), середнього (СД) та низького тиску (НД) дає однакові результати.

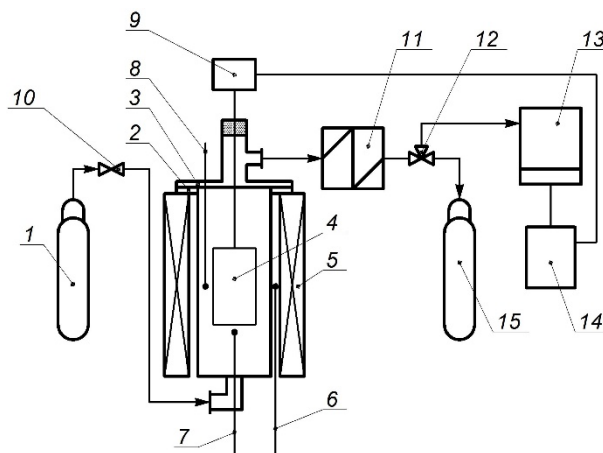


Рис. 1. Схема лабораторної установки: 1 – балон; 2 – реактор; 3 – кришка; 4 – кошик з навискою; 5 – піч; 6–8 – термопара; 9 – датчик ваги; 10, 12 – вентиль; 11 – холодильник; 13 – хроматограф; 14 – система комп'ютерної обробки даних; 15 – ресивер.

Fig. 1. Scheme of laboratory unit: 1 – cylinder; 2 – reactor; 3 – cover; 4 – basket with a sample; 5 – furnace; 6–8 – thermocouple; 9 – weight sensor; 10, 12 – valve; 11 – cooler; 13 – chromatograph; 14 – computer; 15 – receiver.

Основним апаратом установки є блок реактор – піч. У ньому встановлені термопари: 6 – для вимірювання та регулювання температури у зоні нагрівання; 7 – контрольна для визначення температури під кошиком; 8 – між кошиком із зразком та внутрішньою стінкою реактора. Кришка 3 герметично з'єднана з реактором, у верхній частині розташовано ущільнювач. Корзина з навискою (зразком) 4, підвішена усередині реактора за допомогою тяги, яка проходить крізь ущільнювач та з'єднана з датчиком ваги 9. Реактор, піч, корзина та термопари розміщені вертикально. Коливання температури у робочій зоні печі знаходяться у межах ± 30 °С. Продукти піролізу охолоджуються в холодильнику 11, аналізуються за допомогою хроматографа 13 та збираються у ресивері 15.

Вимірювання температури, ваги та складу газу під час проведення досліджень провадилося за допомогою системи на базі персонального комп'ютера з використанням модуля сполучення територіальнорозподільних датчиків I-7018 та

I-7520 — ізольованого модуля конвертора каналу зв'язку SR-232/RS-485.

Склад газу аналізувався на стаціонарному хроматографі ЛХМ-80, поз. 13.

Проведення експерименту

Перед початком досліду пробу ТПВ або компоненту морфологічного складу вміщують у кошику 4, після чого монтують верхню фланцеву кришку 3 та з'єднують з іншими елементами схеми (див. рис. 1). Далі подають напругу на піч 5, встановлюють та підтримують задану температуру в печі та всередині реактора. Маса зразка та температура фіксуються системою комп'ютерної обробки даних 14. Проби синтез-газу відбираються періодично на виході з реактора та аналізуються хроматографом ЛХМ-80.

Результати експерименту

Результати експерименту наведені на рис. 2. Як видно з графіку, протягом 50 хв відбувалося повільне нагрівання внутрішнього простору реактора та зразка до 240–260 °С, далі починалося виділення синтез-газу; процес закінчувався приблизно на 90-й хвилині від початку експерименту при температурі (440 ± 10) °С. Маса зразка з корзиною зменшилася з 65 до 42,5 г, відповідно маса зразка — на 22,5 г. Результати аналізів проб

синтез-газу, відібраних на відріжку 50–90 хв, наведені на рис. 3. Для більшої наочності на рис. 4 наведені суми горючих компонентів газової суміші: $\text{CO} + \text{H}_2$ та $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$.

Застосована методика аналізу на ЛХМ-80 не дає можливості окремо визначити концентрації азоту та кисню у пробі газу, і тому показник N_2

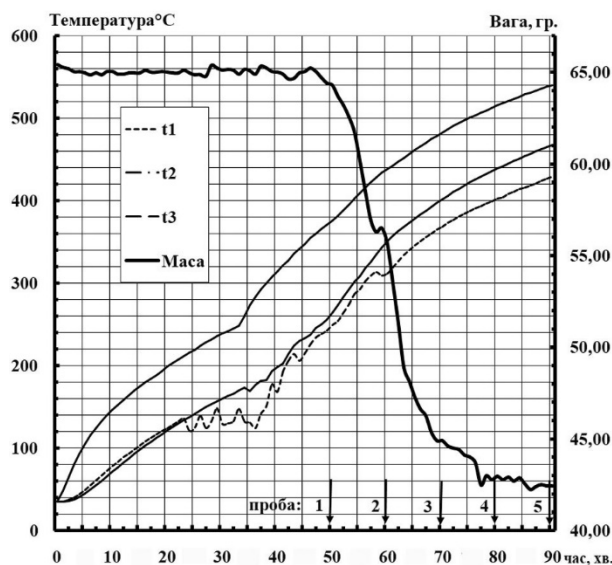


Рис. 2. Кінетика процесу газифікації деревини ($\alpha < 1$).
Fig. 2. Kinetics of wood gasification process ($\alpha < 1$).

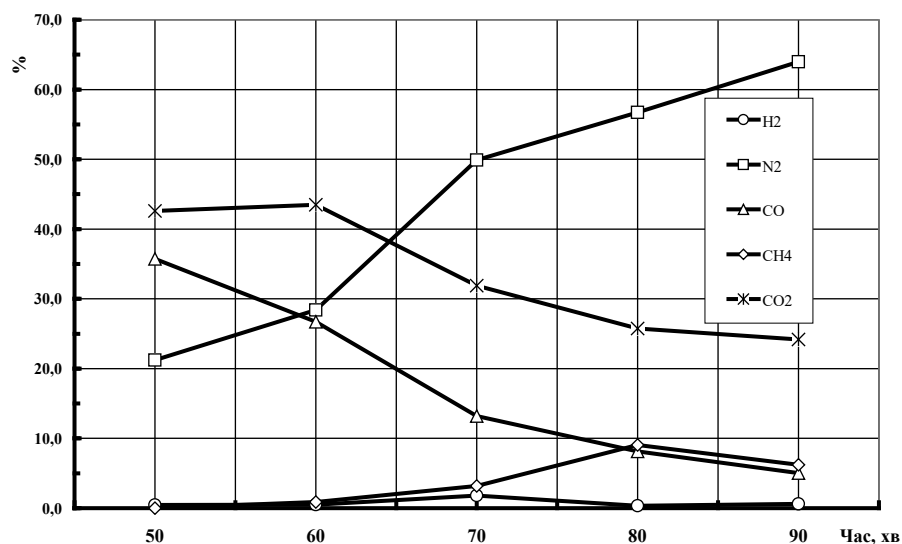


Рис. 3. Зміна складу синтез-газу у процесі газифікації деревини ($\alpha < 1$).
Fig. 3. Change in the composition of synthesis gas at the process of wood gasification ($\alpha < 1$).

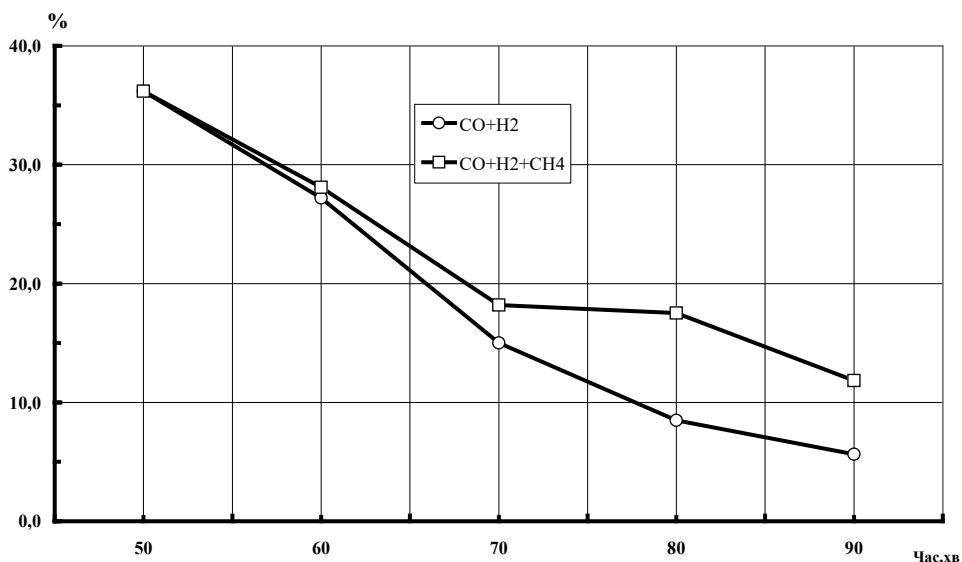
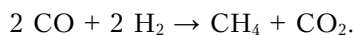
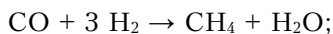


Рис. 4. Зміна концентрацій горючих компонентів синтез-газу у процесі газифікації деревини ($\alpha < 1$).

Fig. 4. Change in concentrations of combustible components of synthesis gas at the process of wood gasification ($\alpha < 1$).

слід інтерпретувати як ($O_2 + N_2$). Стійке підвищення цього показника може означати зниження сумарної концентрації усіх інших компонентів або завершення процесу газифікації та пов'язане з ним накопичення повітря, що надходить до реакційного простору. Останнє припущення підтверджується одночасним зниженням С, що входить до складу СО та CO_2 .

Порівняння кривих на рис. 4 та кривої CH_4 на рис. 3 свідчить про зростання ролі процесу метанізації, який відбувається із зменшенням об'єму за реакціями:



Слід особливо відзначити надзвичайно важливу, до того ж подвійну позитивну роль цих реакцій у процесі газифікації ТПВ (та інших твердих палив), а саме: зменшення об'єму газоподібного палива призводить до підвищення питомої теплотворної здатності (тобто на одиницю теплотворної здатності відбувається за рахунок фізичної ентальпії реагентів, яка в іншому випадку втрачається у холодильнику. Інакше кажучи, хвостові відділи реакційного простору відіграють

роль утилізаційного теплообмінника. Окремо слід дослідити можливість подальшого зниження температури за рахунок метанізації шляхом застосування селективних каталізаторів (вибіркової активності, з гальмуванням реакцій утворення сажі).

роль утилізаційного теплообмінника.

Окремо слід дослідити можливість подальшого зниження температури за рахунок метанізації шляхом застосування селективних каталізаторів (вибіркової активності, з гальмуванням реакцій утворення сажі).

Обговорення результатів

Результатом експериментальних досліджень є оцінка теплотворної здатності синтез-газу, отриманого в процесі газифікації.

Теплотворна здатність палива визначається як різниця повних ентальпій вихідної суміші та продуктів повного згоряння ($\alpha = 1$) при температурі T_0 ; у даному випадку при 298,15 К на 100 молей синтез-газу згідно з рівнянням



де P_i — стехіометричний коефіцієнт i -го реагенту, який дорівнює мольному (об'ємному) відсотку; з балансу кисню визначаємо $x = 13,5$.

Вихідні дані та результати розрахунку наведені у табл. 2.

При розгляді результатів слід взяти до уваги, що дискретність відбору проб з інтервалом 10 хв, вірогідно, не дала можливості виявити нетрива-

Таблиця 2. Результати розрахунку теплотворної здатності ТПВ**Table 2. Calculating results of calorific value of solid wastes**

Номер проби	На 100 моль синтез-газу				Нижча теплотворна здатність		
	CH ₄	CO	H ₂	CO ₂ + N ₂	кДж/моль	кДж/м ³	ккал/м ³
1	0	36	0	решта	102	4554	1088
2	0	27	0	решта	76	3393	810
3	2	14	2	решта	51	2277	544
4	9	9	0	решта	54	2411	576
5	6	5	1	решта	36	1607	384

лий відрізок часу з максимальною концентрацією горючих компонентів, особливо дуже короткий момент виходу летких. У стаціонарному (або псевдостационарному) процесі такі відрізки перебивають один одного, створюючи потік стабільного складу.

Висновки

На підставі проведених досліджень складу ТПВ, одержаних безпосередньо з полігонів України, проведений термодинамічний аналіз можливостей їхньої термохімічної утилізації.

Доведено, що для підвищення точності розрахунків (з урахуванням кількості золи, яка утворюється, та її складу) треба обов'язково приймати до уваги розраховані склади та температури продуктів газифікації ТПВ у стані адіабатичної рівноваги.

Показано, що адіабатична температура суттєво залежить від вмісту оксидів — компонентів золи — та їхнього хімічного складу. Приблизно оцінена величина похибки розрахунків за програмою TERRA.

Вивчена можливість урахування обмеженої кількості компонентів золи при розрахунках та доведена обґрунтованість застосовності таких обмежень.

Вперше для досліджень термічної обробки ТПВ запропоновано поєднання термогравітаційного аналізу з можливістю хроматографічного контролю складу газової фази на всіх етапах термічної обробки.

Вперше виконані кінетичні дослідження газифікації деревини за допомогою гравіметричного аналізу з одночасними визначенням складу газової фази.

Список літератури

1. Поровский М.И. Политика энергосбережения Госкомэнергосбережения Украины. — <http://www.alfar.ru/smart/4/647/> (Дата доступу 18.11.2021)
2. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.
3. Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Наука, 1978. Т. 1. 328 с.
4. Федорова Н.И., Михайлова Е.С., Исмагилов З.Р. Зависимость теплоты сгорания углей от их химического состава. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2015, № 2. С. 135–138. DOI: 10.15372/ KhUR20150205.
5. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования. М.: Наука, 1971. 358 с.
6. ДСТУ 3581-97 (ГОСТ 30517-97). Энергосбережения. Методи вимірювання і розрахунку теплоти згорання палива. Київ: Держстандарт, 1999. 16 с.
7. Снигур А.В., Праженник Ю.Г., Марчук Ю.В., Бондаренко Б.И. Термодинамическое моделирование процессов газификации горючей массы твердого топлива. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2017. № 1. С. 27–38. — <https://doi.org/10.33070/etars.1.2017.03>
8. Mohamed Sawalem, Ibrahim Badi, Suleman Aljamel. Evaluation of solid wastes for utilization in biogas plant in Libya — A Case study. *International journal of engineering sciences & research technology*. Sawalem. 2015. Vol. 4, № 11. P. 577–583.
9. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. М.: Наука, 1977. 344 с.
10. Добрянский А.Е. Анализ нефтяных продуктов. М.: ОНТИ, 1936. 454 с.
11. Поконова Ю.В. Новый справочник химика и технолога. Ч. 1. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. СПб.: Мир и семья, 2002. 988 с. 454 с.
12. Казин В.Н., Плисс Е.М., Русаков А.И. Физическая химия: Учебное пособие для академического бакалаврата. М.: Юрайт, 2019. 182 с.
13. Удельная теплота сгорания топлива и горючих материалов. — <http://www.thermalinfo.ru/eto-interesno/udelnaya-teplota-sgoraniya-topliva-i-goryuchih-materialov> (Дата доступу 18.11.2021)
14. Земский Г.Т. Огнеопасные свойства неорганических и органических материалов: Справочник. М.: ВНИИПО, 2016. 970 с.
15. ГОСТ 33108-214. Топливо твердое из бытовых отходов. Определение теплоты сгорания. М.: Стандартинформ, 2016. 44 с.

16. Снигур А.В., Праженник Ю.Г., Марчук Ю.В., Бондаренко Б.И. Термодинамический анализ методов обеспечения автотермичности процессов воздушной га-

зификации комбинированных топлив. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2018. № 1. С. 21–30. — <https://doi.org/10.33070/etars.1.2018.03>

Надійшла до редакції 10.04.2022

Праженник Ю.Г., Ховавко А.И., канд. техн. наук,
ORCID:.0000-0001-7372-5174, Марчук Ю.В., канд. техн. наук,
Снигур А.В., Небесный А.А.

Институт газа Национальной академии наук Украины, Киев
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: uprazh@gmail.com

Теоретические и экспериментальные исследования методов термохимической переработки твердых бытовых отходов

Приведены результаты термодинамического анализа процессов термохимической переработки твердых бытовых отходов (ТБО). Для проведения расчетов использовано программное обеспечение TERRA, с помощью которого рассчитывались показатели равновесного состояния продуктов реакции. Показано, что точность результатов расчета определяется точностью используемого значения низшей теплотворной способности $Q_{нр}$. Контрольные расчеты выполнены для чистого углерода, глюкозы, целлюлозы, полиэтилена. Термодинамический анализ возможностей термохимической утилизации выполнен на основании проведенных исследований состава ТБО, полученных непосредственно с полигонов Украины. Показано, что адиабатическая температура существенно зависит от содержания оксидов — компонентов золы — и их химического состава. Разработана и изготовлена лабораторная установка для измерения температуры, веса и состава газа. Исследования проводились с помощью системы на базе персонального компьютера с использованием модуля сопряжения территориально-распределительных датчиков I-7018 и I-7520 — изолированного модуля конвертора канала связи SR-232/RS-485. Для исследований термической обработки ТБО предложено сочетание термогравитационного анализа с возможностью хроматографического контроля состава газовой фазы на всех этапах термической обработки. Выполнены кинетические исследования газификации древесины с помощью гравиметрического анализа с одновременным определением состава газовой фазы. *Библ. 16, рис. 4, табл. 2.*

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, термохимическая утилизация, термогравиметрия, хроматографический анализ.

Prazhennik Yu.G., Khovavko O.I., *Candidate of Technical Sciences,*
ORCID: 0000-0001-7372-5174, Marchuk Yu.V.,
Candidate of Technical Sciences, Snigur O.V., Nebesniy A.A.
The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
39, Dehtiarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: uprazh@gmail.com

Theoretical and Experimental Studies of Methods of Thermochemical Processing of Municipal Solid Wastes

Thermodynamic analysis of thermochemical processing of MSW of Ukrainian origin is performed. The software TERRA was used for calculations, with the help of which the equilibrium indicators of the reaction products were calculated. It is shown that the accuracy of the calculation results is determined by the accuracy of the used value of the lower calorific value. Control calculations were performed for the following substances: pure carbon, glucose, cellulose, polyethylene. Thermodynamic analysis of the possibilities of thermochemical utilization was performed on the basis of studies of the composition of MSW obtained directly from landfills in Ukraine. It is shown that the adiabatic temperature significantly depends on the content of oxides — ash components — and their chemical composition. For experimental researches the laboratory installation was developed and constructed. Measurement of temperature, weight and composition of gas during researches was carried out by means of system on the basis of personal computer using the module of connection of territorial-distribution sensors I-7018 and I-7520 — isolated module of a converter of communication channel SR-232/RS-485. For the first time, a combination of thermogravimetry analysis with a possibility of chromatographic control of a composition of the gas phase at all stages of heat treatment was proposed for studies of MSW heat treatment. For the first time, kinetic studies of wood gasification were performed using gravimetric analysis with simultaneous determination of the gas phase composition. *Bibl. 16, Fig. 4, Tab. 2.*

Keywords: municipal solid wastes, thermochemical utilization, thermogravimetry, chromatographic analysis.

References

1. Porovsky M.I. [Energy saving policy of the State Committee for Energy and Saving of Ukraine]. — <http://www.alfar.ru/smart/4/647/> (Accessed November 18, 2021) (Rus.)
2. Belov G.V., Trusov B.G. [Thermodynamic modeling of chemically reactive systems]. Moscow : MG TU named after N.E. Bauman, 2013. 96 p. (Rus.)
3. Gurvich L.V., Vejc I.V., Medvedev V.A. [Thermodynamic properties of individual substances]. Moscow : Nauka, 1978. 1. 328 p. (Rus.)
4. Fedorova N.I., Mikhailova E.S., Ismagilov Z.R. [Dependence of the heat of combustion of coals on their chemical composition]. *Himija v interesah ustojchivogo razvitiya*. 2015, No. 2. pp. 135–138. DOI: 10.15372/KhUR20150205. (Rus.)
5. Ravich M.B. [Fuel and efficiency of its use]. Moscow : Nauka, 1971. 345 p. (Rus.)
6. DSTU 3581-97 (GOST 30517-97). [Energy saving. Methods of measuring and calculating the heat of combustion of fuel]. Kyiv : Dergstandart, 1999. 16 p. (Ukr.)
7. Snigur A.V., Prazhennik Yu.G., Marchuk Yu.V., Bondarenko B.I. (2017). [Thermodynamic modeling of solid fuel combustible weight gasification processes]. *Ecotekhnologii i Resursosberezheniye [Energy Technologies and Resource Saving]*, No. 1, pp. 27–38. — <https://doi.org/10.33070/etars.1.2017.03> (Rus.)
8. Mohamed Sawalem, Ibrahim Badi, Suleman Aljamel. Evaluation of solid wastes for utilization in biogas plant in Libya — A Case study. *International journal of engineering sciences & research technology*. Sawalem. 2015. 4 (11). pp. 577–583.
9. Ravich M.B. [Efficiency of use fuel]. Moscow : Nauka, 1977. 344 p. (Rus.)
10. Dobryansky A.E. [Analysis of petroleum products]. Moscow : ONTI, 1936. 454 p. (Rus.)
11. Pokonova Y.V. [New reference book of chemist and technologist. Part 1: Raw materials and products of the industry of organic and inorganic substances]. St.-Petersburg : Mir i semja, 2002. 988 p. (Rus.)

12. Kazin V.N., Pliss E.M., Rusakov A.I. [Physicalchemistry : A textbook for the academic bachelor]. Moscow : Yrait, 2019. 182 p. (Rus.).

13. [Specific heat of combustion of fuel and combustible materials] – <http://www.thermalinfo.ru/eto-interesno/udelnaya-teplota-sgoraniya-topliva-i-goryuchih-materialov> (Accessed November 18, 2021) (Rus.)

14. Zemsky G.T. [Flammable properties of inorganic and organic materials: reference book]. Moscow : VNIPO, 2016. 970 p. (Rus.)

15. GOST 33108-214. [Solid fuel from municipal solid waste. Determination of heat of combustion]. Moscow : Standartinform, 2016. 44 p. (Rus.)

16. Snigur A.V., Prazhennik Yu.G., Marchuk Yu.V., Bondarenko B.I. (2018). [Thermodynamic analysis of methods for providing autothermicity of combined fuels air gasification processes]. *Ecotekhnologii i Resursoberezeniye [Energy Technologies and Resource Saving]*, No. 1, pp. 21–30. – <https://doi.org/10.33070/etars.1.2018.03> (Rus.)

Received April 10, 2022

УДК 633.002.68:620.9
DOI: 10.33070/etars.2.2022.06

Осьмак О.О., Серьогін О.О., докт. техн. наук

Національний університет харчових технологій, Київ

вул. Володимирська, 68, 01033 Київ, Україна, e-mail: seryoginoo@ukr.net

Новітні технології виробництва та використання біопалив

Наведено порівняльні характеристики твердих паливних матеріалів, елементний склад горючої та робочої мас. Здійснено розрахунок основних геометричних параметрів газогенератора для питомої продуктивності 350 кг/м²-год. Наведено результати економічної доцільності процесу газифікації палива. Оцінено прибуток від впровадження технології використання біопалив. Наведені у роботі розрахунки свідчать про ефективність та доцільність використання біопалива як енергоресурсів України. *Бібл. 5, табл. 2.*

Ключові слова: енергоресурси, біомаса, теплотворна здатність, газифікація палива, газогенератор

Використання альтернативних та відновлювальних джерел енергії є одним з дієвих шляхів, направлених на подолання кризових явищ перш за все в комунальній та промисловій енергетиці [1–5]. Як енергоресурси біомасу (бадилля, хвостики буряку, відходи спиртової та масложирової промисловості тощо) вже використовують у Польщі, Угорщині, Чехії та інших країнах Європи.

Для опалення та технологічних потреб використовують побічні продукти агропромислового комплексу та переробної промисловості України. Енергоресурси рослинної біомаси (солома, зернові культури, кукурудза, соняшник, буряк, гілки плодівих дерев та винограду) можливо ефективно утилізувати, якщо вони розташовані на невеликих відстанях від об'єкту опалення (бажано

на самому підприємстві) та їх кількість достатня для виробничих потреб. При цьому важливими елементами технічного забезпечення відповідних технологій є: а) машини по підготовці біомаси для переробки; б) сховища та обладнання для зберігання біомаси; в) технологічне обладнання для спалювання, газогенерації, піролізу, метанування біомаси; г) системи контролю, керування технологічними процесами на всіх етапах виробництва та застосування біопалив.

Сільськогосподарська переробна біомаса, що може використовуватись як паливо, має ряд особливостей, які відрізняють її від традиційних енергоресурсів, що застосовуються для опалення та технологічних цілей.

Деякі характеристики твердого біопалива, у першу чергу, зовнішні (щільність, розміри части-