

Максимов М.В., д.техн.н., професор, Демиденко В.Е., магістр, Бутенко О.В., аспірант,
Брунеткін О.І., д.техн.н., доцент

МОДЕЛЬ ПРОЛІЗУ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН ЗМІННОГО СКЛАДУ

*Науково-дослідний центр Збройних Сил України
“Державний океанаріум” Інституту Військово–Морських Сил
Національного університету “Одеська морська академія”, Одеса
Одеський національний політехнічний університет, Одеса*

Ключові слова: керований піроліз, фільтраційне горіння, зверхадіабатний режим.

Вступ

Потенційно можлива заміна частини обсягу викопного палива синтетичними паливами, які можливо отримати з побутових, виробничих, сільськогосподарських органічних речовин. Особливістю таких процесів переробки є змінність складу відходів. Внаслідок цього склад одержуваних горючих матеріалів також виявляється невідомого складу. Для вирішення цієї проблеми є актуальною розробка моделі створення необхідної кількості вторинних енергоресурсів при одночасному визначенні в режимі реального часу їх складу і теплотворної здатності.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У країнах, де найкращим чином розвинена система збору та переробки органічних відходів існує проблема сортування [1]. В [2] виділяється як найбільш привабливе рішення для переробки органічної частини муніципальних відходів анаеробне зброджування. Такий висновок зроблено на основі: екологічної чистоти і економічності такого методу. Переробка нерозкладаємої або поганобіорозкладаємої частини органічних відходів на сміттєспалювальних заводах вважається найбільш брудним способом їх утилізації [3]. Як заміну спалюванню в рамках піролітичних способів переробки одним з перспективних вважається двохстадійний на основі піролізу з подальшою можливістю використання отриманих хімічно активних (горючих) речовин в керованих процесах. Крім того, цей процес енергетично більш ефективний у порівнянні з анаеробним зброджуванням. На підтримку параметрів процесу піролізу досить лише 10 % з утворених горючих речовин.

Процес повільного піролізу використовується вже протягом тривалого часу, в технологічному плані більш відпрацьований. Але велика частина продуктів реакції знаходиться в газовій фазі. Внаслідок цього вони повинні бути використані відразу після створення. Крім того, в більшості випадків робота обладнання при повільному піролізі носить циклічний характер зі зміною складу робочої речовини протягом циклу. Це веде до зміни складу продуктів реакції. Ще одним фактором, що впливає на кількісне співвідношення речовин в суміші продуктів реакції, є вологість вихідних продуктів. На даний момент виділені особливості для організації керованого процесу використання продуктів повільного піролізу вимагають фіксованого та відомого складу вихідної сировини. Процес повільного піролізу можна вважати кращим при переробці органічних відходів з метою отримання вторинних енергоресурсів. Виділяють низько- і високоте-

мпературний повільний піроліз. Як показують теоретичні [4] і експериментальні [5] дослідження з ростом температури процесу збільшується вихід горючої газоподібної фази.

У багатьох випадках піроліз розглядається як процес термічного розкладання органічних речовин без доступу повітря. При цьому в якості енергоносія для зовнішнього обігріву реакційної зони використовуються різні види пального. Але більш коректно піроліз слід розглядати як процес розкладання при нестачі повітря [6], як окремий випадок процесу газифікації органічних речовин і, в ще більш широких межах, як спалювання при нестачі повітря [7]. При такому підході з'являється можливість переходу від зовнішнього обігріву до внутрішнього за рахунок використання енергії, що виділяється в процесі піролізу (газифікації, горіння при малому коефіцієнті надлишку окислювача).

Організація такого способу піролізу стримується невизначеністю і змінністю складу вихідної сировини, а також, у багатьох випадках, його високою вологістю. При підвищеному вмісті води процес газифікації може бути організований на основі методу, який отримав розвиток останнім часом. Він базується на реалізації процесу, відповідного фільтраційному горінню в сверхадіабатичному режимі [8]. Такий процес дозволяє спалювати органічні речовини низької калорійності або проводити його таким чином, щоб до 95 % теплової енергії згоряння було перетворено в газовій фазі. Можуть бути перероблені матеріали з низьким вмістом вуглецю (від 10 %) та вологістю до 60 %. При заданому складі перероблюваної речовини її газифікація в сверхадіабатично-мурежимі дозволяє зменшити витрату паливної складової при одночасному збільшенні температури в реакційній зоні.

В роботі [9] запропонований метод визначення в режимі реального часу брутоформули і теплотворної здатності газоподібного палива в процесі його спалювання в спеціальному пристрої. В якості вихідних даних використовуються величини заміряних витрат газу і повітря, а також температури продуктів згоряння. Об'єднання технології піролізу, побудованої на основі методу газифікації в сверхадіабатично-мурежимі [8], з методом визначення в режимі реального часу складу продукт-газу [9] створює можливість переробки органічних речовин довільного, змінного складу.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка моделі піролізу і газифікації органічних речовин змінного складу для виробництва технічних газів з максимальною теплотворною здатністю.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити модель процесів піролізу і газифікації, що дозволяє отримати склад продукт-газу з максимальною теплотворною здатністю при мінімальній кількості углекислого залишку в залежності від складу вихідної сировини;
- знайти область існування рішень моделі з енергетичного балансу.

Метод рішення задачі

У відомих джерелах при розгляді процесів фільтраційного горіння в сверхадіабатично-мурежимі спираються на побудову макрокінетичних моделей [8]. У той же час відзначається [7–8,10], що при малих швидкостях компонентів реалізуються процеси їх перетворення, близькі до рівноважних. Розрахунки на основі рівноважних моделей будуються з урахуванням всіх потоків ентальпії. У тому числі повинні враховуватися теплові втрати через стінки реактора в навколишнє середовище. Розрахунки виникаючих

при цьому теплових потоків від центральної зони реактора до його периферії повинні будуватися з урахуванням зміни теплофізичних характеристик шихти в процесі її термодімічних перетворень. Методи розрахунку таких характеристик існують [11], але вони складні в застосуванні. В силу малості втрат у порівнянні з тепловими потоками, що виникають в процесі розглянутих реакцій, відмовляються від їх обліку при побудові моделей рівноважних процесів. Більш того, втрати через стінки реактора можуть бути зменшені за рахунок застосування теплоізоляції або навіть виключені при застосуванні заходів, описаних в патенті [12].

Фільтраційне горіння в більшості відомих джерел передбачає розгляд протікаючих реакцій як процес окислення шихти киснем повітря. До того ж ці екзотермічні реакції розглядаються як джерело теплової енергії для підтримки процесу горіння. В [10] розглядається можливість присутності в якості ендотермічних окислювачів водяної пари та діоксиду вуглецю, але кисень повітря залишається основним окислювачем. В цьому випадку кисень повітря як окислювач необхідний як реагент, який підтримує екзотермічну реакцію – джерело теплової енергії.

При використанні в якості вихідної сировини органічних речовин може існувати й інше джерело теплової енергії. Для визначеності розглянемо деревину. У відомих джерелах при розгляді піролізу деревини в процесі її нагрівання виділяється кілька стадій з позначенням їх температурних меж і направлення відповідних енергетичних потоків [13].

Розглянемо схему процесу фільтраційного спалювання органічних речовин в сверхадіабатичному режимі (рис. 1), що відповідає [8]. Її відмінною рисою є зустрічний рух шихти і окислювача. При всіх перевагах такої організації процесу присутні і деякі недоліки. Сушка вихідної сировини (шихти) відбувається у верхній частині реактора. Нижче по напрямку руху сировини у міру його прогріву починаються піролітичні процеси з виділенням частини реакційної води. Таким чином велика частина води видаляється потоком продукт-газу до надходження шихти в зону окислення. Це збільшує вміст вологи продукт-газу і, відповідно, знижує його якість. Потрібно осушення отриманої газової суміші з організацією її охолодження і втратою значної частини енергії. У зоні окислення при температурах відбувається реакція коксового залишку з киснем, парами води і діоксидом вуглецю з утворенням водню і оксиду вуглецю [8]. У зоні гартування відбувається охолодження твердого залишку подається окислювачем з одночасним нагріванням останнього. Відповідно з такою схемою пари води спільно з киснем і діоксидом вуглецю виступають в якості окислювача, що діє в напрямку збільшення енергетичної цінності і обсягу продукт-газу при одночасному зменшенні углистого залишку. Але надходження в зону окислення зневодненого вихідної сировини зменшує кількість утворюємо-

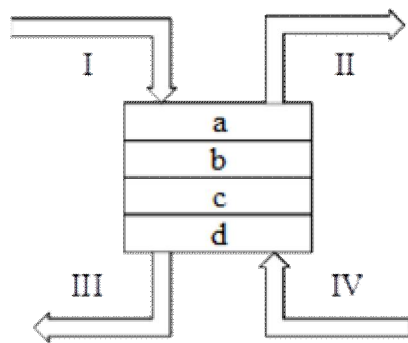


Рисунок 1 – Схема процесу фільтраційного спалювання органічних речовин

I – шихта; II – продукт-газ; III – твердий залишок; IV – окислювач;
a – зона сушіння; b – зона піролізу;
c – зона окислення; d – зона гарту

го водню. Це є одним з недоліків розглянутої схеми газифікації. У деяких випадках для збільшення частки складових $CO+H_2$ (синтез-газ) в складі продукт-газу в дуття (окис-

ється потоком продукт-газу до надходження шихти в зону окислення. Це збільшує вміст вологи продукт-газу і, відповідно, знижує його якість. Потрібно осушення отриманої газової суміші з організацією її охолодження і втратою значної частини енергії. У зоні окислення при температурах відбувається реакція коксового залишку з киснем, парами води і діоксидом вуглецю з утворенням водню і оксиду вуглецю [8]. У зоні гартування відбувається охолодження твердого залишку подається окислювачем з одночасним нагріванням останнього. Відповідно з такою схемою пари води спільно з киснем і діоксидом вуглецю виступають в якості окислювача, що діє в напрямку збільшення енергетичної цінності і обсягу продукт-газу при одночасному зменшенні углистого залишку. Але надходження в зону окислення зневодненого вихідної сировини зменшує кількість утворюємо-

лювач) додають пари води, що супроводжується збільшенням витрат енергії на здійснення процесу. З огляду на описані особливості процесу, пристрій, що працює за таким принципом, можна позиціонувати як реактор для спалювання різної, в тому числі малоенергетичної, сировини з попутним освітою певної кількості горючих газів.

З метою збільшення теплотворної здатності та обсягу утворюваних горючих газів пропонується схема руху шихти і газових потоків. У відповідності зі схемою процесу, зображеної на рис. 1, тепла енергія виділяється в зоні окислення «с». В рамках цієї схеми виділяема енергія використовується для сушки і видаляється із зони реакції. Нова схема процесу (рис. 2) полягає в сушінні і нагріванні вихідної сировини також продуктами реакції після зони окислення, але в супутному потоці. Для цього частину продуктів реакції (продукт-газу) при високій їх температурі подається на вхід камери разом з вихідною сировиною. Далі вони рухаються в одному напрямку. В результаті продукти сушки і початкового розкладу поступають в зону окислення. Разом з ними вноситься і енергія, яка використовується для їх утворення. Якщо в подаємому на вхід реактора по рециркуляційній лінії частини продукт-газу буде достатньо енергії для сушіння й нагрівання вихідної сировини до кінцевої температури зони попереднього піролізу (300–400 °С), почнеться зона виділення енергії і саморозкладу деревини. Вона збігається з зоною окислювальних процесів, які проходять за рахунок кисню з CO_2 і H_2O і відновленням останніх до CO і H_2 . У разі нестачі енергії і при необхідності підвищення температури продукт-газу на виході з реактора на його вході може подаватися необхідна кількість окислювача (повітря).

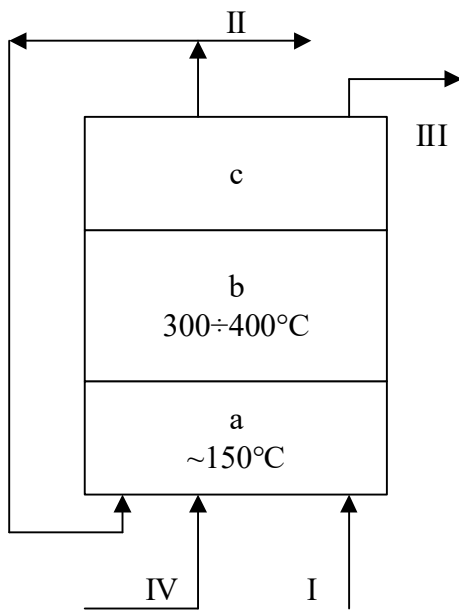
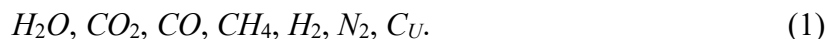


Рисунок 2 – Пропонована схема процесу фільтраційного спалювання органічних речовин

I – шихта; II – продукт-газ; III – твердий залишок; IV – окислювач (повітря);
а – зона сушіння; b – зона піролізу;
с – зона окислення

Процес термохімічного розкладання органічної речовини без повітря, організований за пропонованою схемою (рис. 2), можна віднести до піролізу. Процес, організований за схемою рис. 1, відноситься до горіння. Як правило, ці процеси описуються різними моделями. Але за схемою рис. 2 крім піролізу при подачі окислювача може бути організовано і горіння. Причому ці процеси можуть плавно переходити один в інший. З цієї причини необхідно використання єдиної моделі, що дозволяє описувати процеси піролізу і горіння з однаковою вірогідністю. В якості її основи використана модель, запропонована в [4]. Відмінністю є можливість обліку води в рідкому вигляді в складі вихідної речовини.

Розглянемо протікаючі процеси в припущенні, що продукти реакції знаходяться в газоподібному або конденсованому (вуглистім залишок) стані. На основі обмеженої кількості основних хімічних елементів, які можуть входити до складу вихідної речовини (C, H, O, N), може бути визначений перелік основних речовин, що входять до складу продуктів реакції і включає в себе:



Тут C_U – вуглистый залишок. Ця умова виконується і при подачі на вхід реактора продуктів реакції (рис. 2). Температура в рівноважній зоні реакцій визначається на основі закону збереження енергії. Він виражається в рівності ентальпій у вихідних продуктах і продуктах реакції.

Використовуючи прийняті допущення узагальнена модель процесів побудована на основі методу, запропонованого в [14]. В його рамках розглянемо види рівнянь, що входять в модель, і їх особливості.

Закон діючих мас. Для кожної з речовин (1), що входять до складу продуктів реакції записується рівняння термодінамічної рівноваги. На прикладі CO_2 воно має вигляд:

$$K_{CO_2}(T) = \frac{P_C \cdot P_O^2}{P_{CO_2}^2}. \quad (2)$$

Тут $K_{CO_2}(T)$ – константа хімічної рівноваги при температурі T для рівноважної реакції освіти CO_2 з елементів C і O (таблична величина); P_{CO_2} , P_C , P_O – парціальні тиску відповідних компонентів в суміші продуктів згорання. Використання парціальних тисків замість концентрацій правомірно в разі розгляду певної кількості молей МТ вихідної речовини замість одного моля. Значення МТ є додатковою невідомою величиною і підлягає визначенню. Рівняння має вигляд:

$$K_U(T) = \frac{P_C}{P_U}. \quad (3)$$

В даному рівнянні в процесі вирішення величина P_U при заданій температурі на відміну від інших величин парціальних тисків залишається постійною.

Закон збереження речовини. Рівняння записуються для кожного з хімічних елементів, що визначають склад вихідної речовини, у вигляді балансу його кількості в вихідній речовині і продуктах реакції. Рівняння записуються з урахуванням величини M_T вихідної речовини. Як приклад для елемента C воно має вигляд:

$$M_T \cdot b \cdot C = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{CH_4} + P_U + P_C. \quad (4)$$

У лівій частині рівняння відображено кількість атомів вуглецю в вихідній речовині. При цьому: b – кількість атомів в одному молі вихідної речовини.

Закон Дальтона. Поява змінної M_T для замикання системи вимагає введення додаткового рівняння. У його якості виступає сума парціальних тисків продуктів реакції, рівна тиску в реакторі.

$$P_{\Sigma} = \sum_i P_i . \quad (5)$$

Тут P_{Σ} – тиск газової фази в реакторі; P_i – парціальні тиску компонентів продуктів реакції. У цьому випадку також проявляється особливість, пов'язана з наявністю углистого залишку. Передбачається, що його обсяг малий у порівнянні з об'ємом газової фази. Тому величина P_U не враховується в рівнянні (5).

Таблиця 1

φ	α			
	0	0,1	0,2	0,3
0	1020	1095	1170	1310
0,1	1090	1140	1260	1500
0,2	1160	1340	1415	
0,3	1240	1380		
0,4	1380	1420		

В рамках процесу повільного піролізу, особливо високотемпературного, склад продуктів реакції визначається не тільки хімічним складом вихідної органічної речовини, але і її вологістю. У таких процесах кількість хімічно зв'язаної води в початкових продуктах впливає на склад продуктів реакції. Використання єдиної моделі для режимів піролізу і газифікації (при додаванні повітря в якості окислювача) вимагає і єдиного підходу до опису складу вихідної сировини у всіх розглянутих випадках. Виходячи з цих особливостей вихідна сировина розглядається як однорідна речовина, брутто-формула якої залежить від кількості води в його складі і витрати повітря.

Для демонстрації працездатності запропонованої моделі в якості вихідної органічної речовини прийнята абсолютно суха деревина сосни з брутто-формулою $CH_{1,44}O_{0,64}N_{0,009}$. Вода враховується як молярна частка φ в складі деревини. Наприклад, при φ = 0.1 для 0.9 молей деревини береться 0,1 моль води. В цьому випадку результуючий 1 моль вихідної речовини має брутто-формулу $C_{0,885}H_{1,504}O_{0,681}N_{0,008}$. Додавання повітря впливає на зміну брутто-формули сировини аналогічним чином і враховується як молярна частка α від складу деревини з уже доданою водою. Для спрощення розрахунків склад повітря приймається як суміш кисню (21 %) і азоту (79 %) з брутто-формулою $O_{0,42}N_{1,58}$. Так, наприклад, при додаванні α = 0.1 повітря для $C_{0,885}H_{1,504}O_{0,681}N_{0,008}$ (деревина + φ = 0.1 води) брутто-формула вихідної сировини матиме вигляд: $C_{0,592}H_{1,006}O_{0,595}N_{0,528}$. У процесі розрахунку визначається температура рівноважної суміші продуктів реакції, при якій її ентальпія дорівнює ентальпії вихідної речовини.

В [8] зазначено, що в зоні окислення (рис. 1) температура становить 1000–1200 °С. Тому і в виконаних розрахунках температура в зоні рівноважних реакцій розглядалася до величини 1500 К. При цьому застосовується модель таких обмежень не накладає. Результати розрахунків рівноважних температур при різних поєднаннях ступеня зволоженості вихідної сировини (φ) і кількості повітря, що подається (α) наведені в табл. 1. Отримані значення показують, що при використанні запропонованої схеми (рис. 2) температури в зоні окислення можуть досягати величин, що відповідають значенням в роботі [8] без подачі повітря або при малій його кількості. Так при α = 0 (без

повітря) і $\varphi = 0.4$ отримано $T = 1380 \text{ K}$ ($\sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$), а при $\alpha = 0.1$ і $\varphi = 0.4$ $T = 1420 \text{ K}$ ($\sim 1150 \text{ }^\circ\text{C}$).

Особливістю запропонованої схеми (рис. 2) є необхідність витрат значної кількості енергії для попередньої підготовки сировини. Для деревини ця температура становить $\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Для значень α і φ , наведених в табл. 1, були виконані розрахунки по визначенню енергії при охолодженні продуктів реакції до температури $\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\sim 670 \text{ K}$) і необхідної для нагріву вихідної сировини до цієї ж температури.

Враховувалася енергія, необхідна для нагрівання деревини, повітря, води до $100 \text{ }^\circ\text{C}$, її випаровування і нагрівання утвореної пари. Результати розрахунку наведені в табл. 2 у вигляді величини, рівної відношенню необхідної енергії до розполагаемой. Ці величини показують, яку частину продуктів реакції досить використовувати для її підтримки.

Кисень повітря підвищує температуру в реакційній зоні і зміщує реакцію в рівноважну область. Але при цьому збільшується ступінь окислення продуктів реакції і падає їх енергетична цінність. Використання водяної пари підвищує вміст в продуктах реакції компонентів синтез-газу і, відповідно, збільшує реакційну і енергетичну цінність продуктів реакції. Але така реакція вимагає великих енерговитрат, про що свідчать дані табл. 2. У той же час ці дані показують можливість протікання подібної реакції без використання кисню повітря або при малій його кількості. У табл. 3 наведені результати розрахунку кількості углистою залишку для різних значень φ і α . Величини дані в молях углистою залишку на 1 моль вихідної речовини. Наведені дані показують можливість повного окислення углистою залишку вологою вихідної речовини без кисню повітря або при мінімальній його кількості.

Таблиця 2

φ	α			
	0	0,1	0,2	0,3
0	0.67	0.61	0.55	0.44
0,1	0.82	0.73	0.58	0.41
0,2	0.88	0.61	0.53	
0,3	0.89	0.65		
0,4	0.77	0.68		

Таблиця 3

φ	α			
	0	0,1	0,2	0,3
0	0.59	0.28	0.11	0.02
0,1	0.41	0.17	0.04	0.002
0,2	0.26	0.04	0.005	
0,3	0.13	0.04		
0,4	0.05	0.005		

Результати розрахунків в табл. 1–табл. 3 отримані для речовин з брутто-формулами, наведеними в табл. 4.

Для можливості переробки органічних речовин змінного складу пропонується піролізна установка, принципова схема якої приведена на рис. 3.

Побудова основної частини установки – реактора III – відповідає схемі на рис. 2. Принцип роботи і величини деяких параметрів для стаціонарного режиму роботи відповідають описаним вище. Через колектор I з витратою G_1 на вхід в реактор подається вихідна сировина. Через колектор II на виході з реактора з витратою Q_2 в загальну систему надходить гарячий продукт-газ, де він розділяється на два потоки з витратами: Q_4 – споживачеві; Q_3 – по рециркуляційній лінії на вхід V в реактор для сушки і нагріву вихідної сировини. Через колектор IV подається необхідна кількість повітря з витратою Q_1 .

Таблиця 4

φ	α			
	0	0,1	0,2	0,3
0	$C_{1,44}H_{1,44}O_{0,64}N_{0,009}$	$C_{0,668}H_{0,962}O_{0,567}N_{0,531}$	$C_{0,501}H_{0,722}O_{0,530}N_{0,792}$	$C_{0,401}H_{0,578}O_{0,508}N_{0,950}$
0,1	$C_{0,885}H_{1,504}O_{0,681}N_{0,008}$	$C_{0,592}H_{1,006}O_{0,595}N_{0,528}$	$C_{0,445}H_{0,756}O_{0,551}N_{0,790}$	$C_{0,356}H_{0,605}O_{0,525}N_{0,948}$
0,2	$C_{0,794}H_{1,556}O_{0,714}N_{0,007}$	$C_{0,532}H_{1,042}O_{0,617}N_{0,527}$	$C_{0,400}H_{0,783}O_{0,568}N_{0,788}$	
0,3	$C_{0,714}H_{1,6}O_{0,743}N_{0,0064}$	$C_{0,479}H_{1,073}O_{0,637}N_{0,525}$		
0,4	$C_{0,654}H_{1,634}O_{0,765}N_{0,0059}$	$C_{0,439}H_{1,097}O_{0,652}N_{0,524}$		

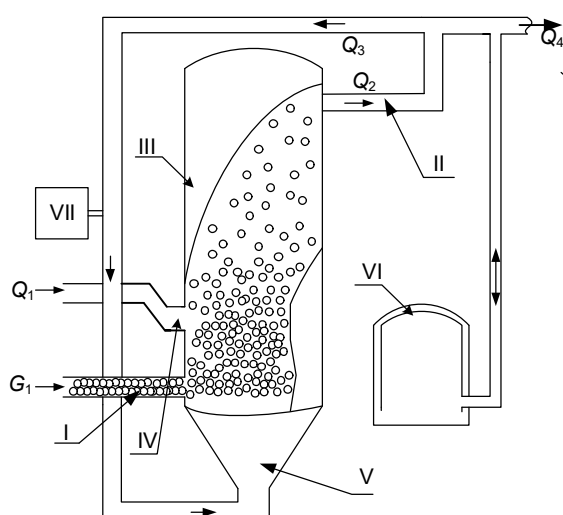


Рисунок 3 – Принципова схема піролізної установки

достатньо заміряти витрати газової суміші, повітря і відпрацьованих газів в цьому пристрої при різних витратах суміші. До складу газової суміші можуть входити і не горючі гази.

При фіксації зміни складу продукт-газу установка з режиму газифікації переводиться в режим горіння. Це виражається в збільшенні подачі повітря через колектор IV з метою гарантованого перетворення вихідної сировини зі змінним невідомим складом в газоподібні продукти. Далі в пристрої VII (рис. 3) визначається їх брутто-формула і, відповідно, новий склад вихідної сировини. Далі на підставі цих даних установка переводиться в режим піролізу (газифікації) шляхом регулювання подачі повітря відповідно до нового складу шихти.

Обговорення результатів рішення задачі

Хімічне, енергетичне обладнання розраховується на використання сировини певного складу і вимагає налаштування. Незначна зміна складу однотипної речовини призводить до збою, або навіть зупинки технологічних процесів. Так будь-який з нафтопереробних заводів працює тільки з певним сортом нафти. Котли електростанцій

розраховуються на спалювання певних сортів вугілля і постачання прив'язується до певних їх родовищ. Це відбувається через використання систем управління, розрахованих на парювання в режимі реального часу зміни теплофізичних параметрів і неможливості обліку зміни хімічного складу сировини.

Запропонований метод переробки органічних речовин дозволяє оптимальним чином перетворювати різні органічні речовини в газоподібний стан. Оптимальність визначається можливістю отримання максимального обсягу суміші горючих газів при максимальній їх теплотворної здатності. Оптимальність обумовлена організацією процесу піролізу і газифікації в сверхадіабатичному режимі при відомому складі вихідної сировини. Склад сировини в процесі переробки може довільним чином змінюватися. За рахунок введення в систему управління пристрою визначення в режимі реального часу складу газоподібних продуктів реакції (VII, рис. 3) контролюється склад вихідної сировини. У разі його зміни визначається новий склад. На підставі отриманих даних установка переводиться в оптимальний режим з новими параметрами.

Висновки

1. Розроблено модель процесів піролізу і газифікації, що дозволяє отримати склад продукт-газу з максимальною теплотворною здатністю при мінімальній кількості углистою залишку при різному складі вихідної сировини. Мінімальна кількість углистою залишку визначає можливість отримання максимально можливого обсягу суміші горючих газів. Максимальна теплотворна здатність обумовлена організацією процесу переробки в сверхадіабатичному режимі з мінімально можливим використанням повітря як окислювача.

2. Визначено можливість існування рішень моделі з енергетичного балансу. Розраховане співвідношення необхідної для підтримки процесу піролізу і енергії в продуктах реакції свідчить про можливість організації процесу без додаткової кількості повітря. Мінімальна кількість додаткового окислювача забезпечує максимальну теплотворну здатність утворюваного продукт-газу.

Література

1. Rousta K. Assessing incorrect household waste sorting in a medium-sized Swedish city [Text] / K. Rousta, K.M. Ekström // Sustainability 2013, 5, 4349–4361. <https://doi.org/10.3390/su5104349>.
2. Perrot J.F. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand [Text] / J.F. Perrot, A. Subiantoro // Sustainability. 2018, 10(9), DOI: 10.3390/su10093114.
3. Seltenrich N. Emerging Waste-to-Energy Technologies: Solid Waste Solution or Dead End? [Text] / N. Seltenrich // Environmental Health Perspectives, 2016, Vol. 124, No. 6. <https://doi.org/10.1289/ehp.124-A106>.
4. Brunetkin O. Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis [Text] / O. Brunetkin, M.V. Maksymov, A. Maksymenko, M.M. Maksymov // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 2019, 4/6 (100), 25–31. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176422.
5. Guizani C. Biomass Chars: The Effects of Pyrolysis Conditions on Their Morphology, Structure, Chemical Properties and Reactivity [Text] / C. Guizani, M. Jeguirim, S. Valin, L. Limousy, S. Salvador // Energies 2017, 10(6), 796; <https://doi.org/10.3390/en10060796>.

6. Ахметов С.А. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа [Текст] / С.А. Ахметов, Т.П. Сериков, И.Р. Кузеев, М.И. Баязитов // Санкт-Петербург, Недра, 2006, 872 с., ил.: код доступа – <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ahmetov-a-tehnologiya-i-oborudovanie-processov-pererabotki-nefti-i-gaza.pdf>.
7. Nadia H.L., Process efficiency of biofuel production via gasification and Fischer–Tropsch synthesis [Text] / H.L. Nadia, N.H. Leibbrandt, A.O. Aboyade, J.H. Knoetze, J.F. Görgens // Fuel, Volume 109, 2013, P. 484–492. doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.013.
8. Салганский Е.А. Модель паровоздушной газификации твердого горючего в фильтрационном режиме [Текст] / Е.А. Салганский, В.П. Фурсов, С.В. Глазов, М.В. Салганская, Г.Б. Манелис // Физика горения и взрыва, 2006, т. 42, № 1, с. 65–72. <https://docplayer.ru/86907583-Institut-problem-himicheskoy-fiziki-ran-chernogolovka.html>.
9. Brunetkin O. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation [Текст] / O. Brunetkin, V. Davydov, O. Butenko, G. Lysiuk, A. Bondarenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologic – 2019. – №3/6 (99). pp. 22–30. doi: 10.15587/1729–4061.2019.169219.
10. Полианчик Е.В. Фильтрационное горение углерода в присутствии эндотермических окислителей [Текст] / Е.В. Полианчик, С.В. Глазов // Физика горения и взрыва – 2015. – т. 51, №5 – с. 34–43. DOI: 10.15372/FGV20150504.
11. Matsevityi Yu.M. Identification of the Thermal Conductivity Coefficient for Quasi-Stationary Two-Dimensional Heat Conduction Equations [Текст] / Yu.M. Matsevityi, S.V. Alekhina, V.T. Borukhov, G.M. Zayats, A.O. Kostikov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – V. 90, No.6. – С. 1295–1310, DOI 10.1007/s10891-017-1686-7.
12. Установа для визначення складу горючого газу в процесі його спалювання. Патент України на винахід №. 120216: МПК G01N 7/08 (2006.01), G01N 25/20 (2006.01) / Максимов М.В., Брунеткін О.І., Лисюк О.В., Тарахтій О.С. № а 2017 12785; заявл. 22.12.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. №11.
13. Лямин В.А. Газификация древесины [Текст] / В.А. Лямин. – М.: Лесная промышленность, 1967. – 264 с.
14. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник : [в 6-ти т.]. / под науч. ред. акад. В.П. Глушко.– М.: ВИНТИ, 1971. – Том 1: Методы расчета. – 266 с.
15. Лысюк, А.В. Модель и метод сжигания в теплоэнергетической установке углеводородного газа переменного состава / А.В. Лысюк, А.В. Бондаренко, М.М. Максимов, А.И. Брунеткин // Автоматизация технологических і бизнес-процесів. – Одеса, 2017. – Volume 9, Issue 2. – С. 21–27. (Журнал включено до НМБД Index Copernicus, CrossRef (DOI)).
16. Метод расчета температуры горения произвольной смеси газообразного углеводородного топлива при произвольном избытке воздуха / ВО Давыдов, АВ Бондаренко // Праці Одеського політехнічного університету. Одеса, 2013. – №3 (42) – С. 98–102.

Bibliography (transliterated)

1. Rousta K. Assessing incorrect household waste sorting in a medium-sized Swedish city [Text] / K. Rousta, K.M. Ekström // Sustainability 2013, 5, 4349–4361. <https://doi.org/10.3390/su5104349>.

2. Perrot J.F. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand [Text] / J.F. Perrot, A. Subiantoro // Sustainability. 2018, 10(9), DOI: 10.3390/su10093114.

3. Seltenrich N. Emerging Waste-to-Energy Technologies: Solid Waste Solution or Dead End? [Text] / N. Seltenrich // Environmental Health Perspectives, 2016, Vol. 124, No. 6. <https://doi.org/10.1289/ehp.124-A106>.

4. Brunetkin O. Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis [Text] / O. Brunetkin, M.V. Maksymov, A. Maksymenko, M.M. Maksymov // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 2019, 4/6 (100), 25–31. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176422.

5. Guizani C. Biomass Chars: The Effects of Pyrolysis Conditions on Their Morphology, Structure, Chemical Properties and Reactivity [Text] / C. Guizani, M. Jeguirim, S. Valin, L. Limousy, S. Salvador // Energies 2017, 10(6), 796; <https://doi.org/10.3390/en10060796>.

6. Akhmetov S.A. Tekhnologiya i oborudovanie processov pererabotki nefti i gaza [Tekst] / S.A. Akhmetov, T.P. Serikov, I.R. Kuzeev, M.I. Bayazitov // Sankt-Peterburg, Nedra, 2006, 872 s., il.: kod dostupa – <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ahmetov-a-tehnologiya-i-oborudovanie-processov-pererabotki-nefti-i-gaza.pdf>.

7. Nadia H.L., Process efficiency of biofuel production via gasification and Fischer–Tropsch synthesis [Text] / H.L. Nadia, N.H. Leibbrandt, A.O. Aboyade, J.H. Knoetze, J.F. Görgens // Fuel, Volume 109, 2013, P. 484–492. doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.013.

8. Salganskij E.A. Model' parovozdushnoj gazifikaczii tverdogo goryuchego v fil'tracionnom rezhime [Tekst] / E.A. Salganskij, V.P. Fursov, S.V. Glazov, M.V. Salganskaya, G.B. Manelis // Fizika gorenija i vzry'va, 2006, t. 42, # 1, p. 65–72. <https://docplayer.ru/86907583-Institut-problem-himicheskoy-fiziki-ran-chernogolovka.html>.

9. Brunetkin O. Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation [Tekst] / O. Brunetkin, V. Davydov, O. Butenko, G. Lysiuk, A. Bondarenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologic – 2019. – #3/6 (99). – pp. 22–30. doi: 10.15587/1729–4061.2019.169219.

10. Polianchik E.V. Fil'tracionnoe gorenje ugleroda v prisutstvii e'ndotermicheskikh okislitelej [Tekst] / E.V. Polianchik, S.V. Glazov // Fizika gorenija i vzry'va – 2015. – t. 51, #5 – p. 34–43. DOI: 10.15372/FGV20150504.

11. Matsevityi Yu.M. Identification of the Thermal Conductivity Coefficient for Quasi-Stationary Two-Dimensional Heat Conduction Equations [Tekst] / Yu.M. Matsevityi, S.V. Alekhina, V.T. Borukhov, G.M. Zayats, A.O. Kostikov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – V. 90, No.6. – P. 1295–1310, DOI 10.1007/s10891-017-1686-7.

12. Ustanovka dlya viznachennja skladu goryuchogo gazu v proczesi' jogo spalyuvannja. Patent Ukraini na vinakhi'd #. 120216 : MPK G01N 7/08 (2006.01), G01N 25/20 (2006.01) / Maksimov M.V., Brunetki'n O.I., Lisyuk O.V., Tarakhti'j O.S. # a 2017 12785; zayavl. 22.12.2017; opubl. 11.06.2018, Byul. #11.

13. Lyamin V.A. Gazifikaczija drevesiny' [Tekst] / V.A. Lyamin. – M.: Lesnaya promy'shennost', 1967. – 264 p.

14. Termodinamicheskie i teplofizicheskie svojstva produktov sgoranija: spravocnik : [v 6-ti t.]. / pod nauch. red. akad. V.P. Glushko.– M.: VINITI, 1971. – Tom 1: Metody' rascheta. – 266 p.

15. Ly'syuk, A.V. Model' i metod szhiganiya v teploe'nergeticheskoj ustanovke uglevodorodnogo gaza peremennogo sostava / A.V. Ly'syuk, A.V. Bondarenko, M.M. Maksimov, A.I. Brunetkin // Avtomatizaczija tekhnologi'chnikh i' bi'znes-proczesi'v. – Odesa,

2017. – Volume 9, Issue 2. – P. 21–27. (Zhurnal vklyucheno do NMBD Index Copernicus, CrossRef (DOI)).

16. Metod rascheta temperatury` goreniya proizvol`noj smesi gazoobraznogo uglevodorodnogo topliva pri proizvol`nom izby`tke vozdukha / VO Davy`dov, AV Bondarenko // Praci` Odes`kogo poli`tekhnichnogo uni`versitetu. Odesa, 2013. – #3 (42)– P. 98–102.

УДК 681.54

Максимов М.В., д.техн.н., професор, Демиденко В.Е., магістр, Бутенко О.В., аспірант, Брунеткін О.І., д.техн.н., доцент

МОДЕЛЬ ПИРОЛИЗУ ОРГАНИЧНЫХ РЕЧОВИН ЗМІННОГО СКЛАДУ

Розглянуто питання організації процесу повільного піролізу органічних речовин, в загальному випадку невідомого і змінного складу. Актуальність роботи визначається розглядом можливості використання різних органічних відходів без їх попереднього сортування і сушіння для отримання вторинних енергоресурсів контрольованого складу. Новизна роботи обумовлена розробкою моделі методу керованого піролізу або газифікації органічних речовин з мінімальною кількістю твердих залишків при максимальній теплотворній здатності сумішігорючих газів, що утворюються.

Запропонована до розгляду схема процесу будується на основі організації попутного потоку вихідної сировини і продуктів реакції. В результаті утворюються вуглекислий газ і пари води використовуються в якості додаткових окислювачів. В результаті зменшується вуглистый залишок з одночасним збільшенням в складі суміші газоподібних продуктів чадного газу і водню.

Запропоновано схему моніторингу в режимі реального часу складу вихідної сировини в процесі піролізу (газифікації). Знання складу дозволяє управляти процесом його переробки з метою: а) організації оптимального процесу газифікації з точки зору максимізації кількості та енергетичної цінності суміші газоподібних продуктів реакції; б) управляти витратою перероблюваної вихідної сировини з метою виробництва необхідної в кожен момент часу кількості продукт-газу.

Ключові слова: керований піроліз, фільтраційне горіння, зверхадіабатний режим.

УДК 681.54

Максимов М.В., д.техн.н., професор, Демиденко В.Э., магістр, Бутенко А.В., аспірант, Брунеткин А.И., д.техн.н., доцент

МОДЕЛЬ ПИРОЛИЗА ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

Рассмотрены вопросы организации процесса медленного пиролиза органических веществ, в общем случае неизвестного и переменного состава. Актуальность работы определяется рассмотрением возможности использования различных органических отходов без их предварительной сортировки и сушки для получения вторичных энергоресурсов контролируемого состава. Новизна работы обусловлена разработкой модели ме-

тода управляемого пиролиза или газификации органических веществ с минимальным количеством твердых остатков при максимальной теплотворной способности образующейся смеси горючих газов.

Предлагаемая к рассмотрению схема процесса строится на основе организации попутного потока исходного сырья и продуктов реакции. В результате образующиеся углекислый газ и пары воды используются в качестве дополнительных окислителей. В результате уменьшается углистый остаток с одновременным увеличением в составе смеси газообразных продуктов угарного газа и водорода.

Предложена схема мониторинга в режиме реального времени состава исходного сырья в процессе пиролиза (газификации). Знание состава позволяет управлять процессом его переработки с целью: а) организации оптимального процесса газификации с точки зрения максимизации количества и энергетической ценности смеси газообразных продуктов реакции; б) управлять расходом перерабатываемого исходного сырья с целью производства необходимого в каждый момент времени количества продукт-газа.

Ключевые слова: управляемый пиролиз, фильтрационное горение, сверхадиабатный режим.

Maximov M., d.t.s., professor, Demidenko V., master, Butenko A., postgraduate student,
Brunetkin A., d.t.s., docent

MODEL OF PYROLYSIS OF ORGANIC MATTERS OF VARIABLE COMPOSITION

The organization of the process of slow pyrolysis of organic substances, in the general case of unknown and variable composition, is considered. The relevance of the work is determined by considering the possibility of using various organic waste without preliminary sorting and drying to obtain secondary energy resources of controlled composition. The novelty of the work is due to the development of a model of the method of controlled pyrolysis or gasification of organic substances with a minimum amount of solid residues with a maximum calorific value of the resulting mixture of combustible gases.

The process scheme proposed for consideration is based on the organization of the associated flow of feedstock and reaction products. As a result, the resulting carbon dioxide and water vapor are used as additional oxidizing agents. As a result, the carbonaceous residue decreases with a simultaneous increase in the composition of the mixture of gaseous products of carbon monoxide and hydrogen.

A real-time monitoring scheme for the composition of the feedstock during pyrolysis (gasification) is proposed. Knowing the composition allows you to manage the process of its processing with the aim of: a) organizing the optimal gasification process in terms of maximizing the quantity and energy value of the mixture of gaseous reaction products; b) manage the flow of processed feedstock in order to produce the quantity of product gas required at each moment of time.

Keywords: controlled pyrolysis, filtration combustion, super-adiabatic mode.