

Новосад Ю.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воробйов М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ГАЗИФІКАЦІЇ БІОМАСИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗУ

Заміщення природного газу на альтернативні види палива є надійним шляхом забезпечення енергетичної незалежності Держави. На ряду з широким розвитком нових технологій використання альтернативних палив, зокрема таких як пряме спалювання біомаси, для існуючого паливовикористовуючого обладнання, що спалює природний газ, найбільш простим на технологічному є переведення обладнання на спалювання альтернативного газового палива. Таким альтернативним газовим паливом може бути біогаз, звалищний газ, або генераторний газ утворений з вугілля або біомаси.

Оскільки генераторний газ можна отримувати безпосередньо на об'єкті, де встановлене конкретне паливовикористовуюче обладнання, то важливою та актуальною є оцінка складу та властивостей даного палива (генераторного газу) в залежності від складу вихідної сировини – вугілля, біомаси або відходів різного походження.

Робота присвячена визначенню складу генераторного газу в залежності від початого складу сировини, температури процесу та коефіцієнту надлишку повітря в газогенераторі. Розвинутий теоретичний підхід щодо розрахунку складу продуктів газифікації твердих палив, зокрема вугілля і біомаси, що базується на законах рівноважної термодинаміки. Представлено математичну модель визначення складу рівноважних продуктів згоряння на основі базових законів хімічної термодинаміки. Проведено аналіз основних рівнянь процесу газифікації з врахуванням впливу режимних параметрів (коефіцієнт надлишку повітря та температура процесу) на утворення продуктів газифікації. Отримані результати демонструють, що температура є ключовим фактором у визначенні складу генераторного газу: при 800–900°C і водяної пари, що свідчить про домінування реакцій окислення, тоді як при 1000–1100°C основними продуктами є CO і H₂, що підтверджує переважання реакцій відновлення. Вплив складу сировини також відіграє значну роль: деревина через високий вміст кисню продукує більше CO₂, тоді як пластик і гума через високий вміст вуглецю та водню сприяють утворенню CO та H₂.

Кореляція експериментальних і теоретичних даних підтверджує можливість прогнозування складу газової суміші на основі термодинамічного моделювання, що є важливим для проектування газифікаційних установок і визначення оптимальних умов процесу.

Ключові слова. *Заміщення природного газу, процеси газифікації палив, рівноважні продукти газифікації, біомаса, константи рівноваги хімічних реакцій.*

Постановка проблеми. Через зростання цін на традиційні паливо-енергетичні ресурси і, перш за все, внаслідок спостережуваного тренду підвищення цін на вуглеводневу сировину, передбачається, що прогресивні технології генерації теплової енергії на базі відновлювальних джерел енергії та побутових відходів мають знайти ширше застосування як у системах централізованого теплопостачання (СЦТ, близько 60% споживачів), так і в системах індивідуального теплопостачання (СІТ). При цьому є певні розбіжності

в оцінках місця газифікації – від доволі скромного локального до значущого в масштабах окремих держав (на прикладі підземної газифікації вугільних басейнів, зокрема в Узбекистані, Австралії, Південній Африці). В Україні процес газифікації звичайно розглядають як використання місцевих альтернативних джерел сировини для певної місцевості [1, 2].

На сучасному етапі розвитку технологій заміщення викопних палив Актуальною та важливою є задача ефективного використання

альтернативних непроекtnих палив різного походження.

Для енергетичних установок які використовують у якості основного палива природний газ, для їх переведення на альтернативні палива можна використовувати різні шляхи:

- Глибока модернізація обладнання з переведенням газового обладнання на спалювання твердого палива (вихрових передтопках, у шарі та ін.);

- Заміщення природного газу альтернативним газовим паливом отриманим в процесах газифікації твердої паливної сировини.

Для прогнозування режимів та експлуатаційних характеристик роботи обладнання при переході з природного газу на продукти газифікації необхідно мати дані з точного складу та властивостей відповідного генераторного газу. Оскільки для процесів газифікації можна використовувати багато видів альтернативних твердих палив (біомаса різного походження, автомобільні шини, пластмаса, продукти органічного походження та інше), то необхідно коректно виконувати оцінку паливного газу, який може бути одержаний з такої сировини.

Щодо визначення складу і властивостей продуктів газифікації твердих палив, то в основному використовують експериментальні методи які полягають у прямому визначенні компонентів газифікації безпосередньо за результатами процесу. Такий спосіб є достатньо капіталоємним з точки зору часових та фінансових затрат.

Для вирішення цієї задачі в роботі пропонується використовувати методи рівноважної хімічної термодинаміки. В роботі пропонується виконати оцінку складу та властивостей продуктів газифікації шляхом визначення стану їх рівноважності використовуючи підходи хімічної термодинаміки та для розрахунку хімічних рівноваг TERRA (автор Б.Г. Трусов), яка реалізована на основі відповідних обчислювальних механізмів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [4, 5] було представлено інформацію щодо газових палив, які певною мірою можуть слугувати альтернативою природному газу в системах опалення побутових і виробничих приміщень.

Водночас тенденції, намічені новою Енергетичною стратегією України-2023 на період до 2050 р. яка включає міжнародні зобов'язання та враховує сучасні виклики в енергетиці та побудована на зменшенні частик використання

вугілля в котлоагрегатах СЦТ, зокрема, стратегія акцентує увагу на розвитку біоенергетики. Планується, що до 2035 року обсяг постачання первинної енергії з біомаси, біопалива та відходів досягне 11 млн т н.е. Дана стратегія має як своїх прихильників, так і опонентів. Наприклад, у роботі [6] наведено перелік переваг і недоліків двох систем: прямого спалювання та газифікації твердого палива, включно з відходами деревообробки та рослинними відходами (лушпиння соняшника). Є вказівки на те, що попередня газифікація сировини має більше переваг і менше недоліків, ніж пряме спалювання. Газифікація при цьому дає змогу безпосередньо використовувати обладнання для спалювання природного газу в той час, як «переобладнання» на тверде паливо можна порівняти з вартістю робіт із заміни котла [6]. Продукти газифікації вугілля, твердих і рідких органічних речовин, біомаси можуть з'явитися досить цінним альтернативним газовим паливом, що заміщає природний газ у системах теплопостачання приватних і комунальних господарств.

Під час визначення складу окислювача для проведення процесу газифікації: повітря, O_2 , повітря збагачене O_2 , H_2O , CO_2 , продукти згоряння або суміш з-поміж згаданих компонентів, під час вибору співвідношення «вихідне паливо: окислювач», а також параметрів процесу газифікації (температура, тиск) слід виходити з прагнення отримати газове паливо з максимальним вмістом горючих компонентів, які зазвичай відповідають синтез-газу ($CO + H_2$), без дисперсних включень (включень сажі С).

Передбачено стратегічне планування газифікації цієї технології в економіку з урахуванням забезпечення правових та економічних передумов просування, зокрема й через комбіновані цикли «газифікація – генерування енергії», найважливішого місця в цих процесах технології підземної газифікації вугілля, визнання ролі біомаси та біогазу.

Постановка завдання. Мета дослідження полягала в розрахунково-теоретичному прогнозуванні складу і властивостей горючих газів отриманих шляхом газифікації вихідної твердопаливної сировини використовуючи методи хімічної термодинаміки.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Метод дослідження – теоретичне визначення продуктів реакції та їх порівняння з експериментальним складом та властивостей синтез-газу, що утворюється при газифікації різних видів біомаси,

зокрема з вугілля, рослинної олії, соломи, обробленої та необробленої деревини, трави, у процесах газифікації за умов різних параметрів (температура, тиск, тип окиснювального агента).

Об'єкт дослідження – процеси газифікації біомаси, зокрема пелетизованих відходів деревини та комбінованих пелет із стічних вод і деревини, в умовах використання різних газифікаційних установок.

Предмет дослідження – утворення генераторного газу при газифікації різних типів біомаси; вплив типу палива та параметрів процесу газифікації (температура, тиск, тип окиснювального агента) на склад і властивості генераторного газу; енергетична ефективність процесу газифікації в залежності від типу біомаси та умов її обробки.

Виклад основного матеріалу. Як буде показано нижче, дійсно, під час вибору складів вихідних реагентів і параметрів процесу газифікації виходять із запобігання утворенню твердофазних компонентів.

У роботі [7] виконано ексергетичний аналіз процесу газифікації різних біопалив, представлено склади продуктів і параметри процесу газифікації. Оцінимо склади продуктів газифікації з погляду їхньої рівноважності. З цією метою буде використано два прийоми:

1. Суворі оцінки: визначення складу рівноваги продуктів реакції для заданої органічної частини біопалива за відомих параметрів процесу (p , T) і зіставлення рівноважного і фактично отриманого складів.

2. Визначення відповідності виходу окремих компонентів (з числа фактично отриманих у дослідках) необхідним за рівновагою концентраціям з використанням табульованих констант рівноваги відповідних реакцій.

Умовою хімічної рівноваги в ізобарно-ізотермічній ($p = \text{const}$, $T = \text{const}$) системі, де міститься i, j -их речовин $j = 1, 2, \dots, i$, з хімічним потенціалом окремої з них μ_j , є екстремальна залежність (існування мінімуму) вільної ентальпії ізобарно-ізотермічного потенціалу системи, що реагує, залежно від глибини перебігу реакції (ступінь просування реакції), функції Гіббса G [8],

$$(dG)_{p,T} = 0 \quad (1)$$

Зазначена закономірність може бути легко отримана для індивідуального компонента

$$dG = d(H - TS) = dH - TdS - SdT \quad (2)$$

з урахуванням співвідношення для 1-го початку термодинаміки та співвідношення між прирос-

тами (повними диференціалами) теплоти, ентальпії та внутрішньої енергії

$$dG = Vdp - SdT \quad (3)$$

при ізобарно-ізотермічних умовах: $dp = 0$; $dT = 0$.

Якщо поняття енергії Гіббса узагальнюють на хімічно реагуючу суміш компонент [8],

$$dG = Vdp - SdT + \sum \mu_i dn_i, \quad (4)$$

то присутня хімічна реакція $\sum \nu_i A_i = 0$ в умовах ізобарно-ізотермічного процесу приходить у стан рівноваги за деякої глибини реакції $0 < \zeta < 1$ (рис.), за якої

$$dG = \sum_i \mu_i dn_i = \sum_i \mu_i \nu_i d\zeta = 0 \quad (5)$$

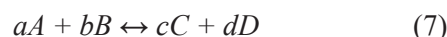
або

$$\sum_i \nu_i \mu_i = 0. \quad (6)$$

Зміна функції Гіббса за абсолютною величиною дорівнює максимальній роботі реакції: $\Delta G = |Ap|$, яка є мірою хімічної спорідненості. Отже, у міру наближення до рівноваги $Ap \rightarrow 0$.

При збільшенні хімічної спорідненості (чим більша вихідна концентрація реагуючих компонентів A і B – див. нижче) зростає максимальна робота реакції до повноти реакції в напрямку, що визначається знаком A_p .

Для бімолекулярної реакції



$$Ap = RT \left(\ln K_p - \frac{P_C^c \cdot P_D^d}{P_A^a \cdot P_B^b} \right), \quad (8)$$

тобто умовою рівноваги є

$$\frac{P_C^c \cdot P_D^d}{P_A^a \cdot P_B^b} = K_p(T) \quad (9)$$

Саме такий підхід, пов'язаний з перевіркою умови (9) – відповідності складу суміші константам рівноваги окремих реакцій за відповідної температури, було використано для оцінювання ступеня рівноважності продуктів газифікації різних твердих і рідких органічних і біопродуктів.

Інший випробуваний метод полягав у спробі безпосередньо зіставити розрахунковий склад рівноважних продуктів реакції, визначений через поелементний склад вихідних речовин, що піддаються газифікації.

Для реакції (7) вираз (6) набуває вигляду

$$a\mu_A + b\mu_B = c\mu_C + d\mu_D, \quad (10)$$

а з використанням виразу, що зв'язує потенціали компонентів зі значеннями потенціалів індивідуальних речовин

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln p_i / p_0 = \mu_i^0 + RT \ln p_i \quad (11)$$

В умовах стандартного тиску $p_0 = 1$ бар приходимо до залежності

$$\ln Kp = \ln \prod_{(i)} p_i^{\nu_i} \quad (12)$$

Зокрема, для реакції (7) приходимо до відомого виразу із закону Вант-Гоффа:

$$\ln Kp = \ln \frac{P_C^c \cdot P_D^d}{P_A^a \cdot P_B^b} = -\frac{\Delta G^0}{RT} \quad (13)$$

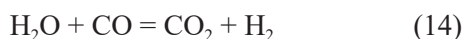
і до підтвердження рівняння (9).

1. Визначення констант рівноваги реакцій газифікації біомаси

У статті [7] проводиться порівняння значень фізичної та хімічної ексергій для продуктів газифікації різних видів біомаси. Розглянуто сім газоподібних палив, отриманих з біологічної сировини.

Щоб для розрахунків застосовувати отримані нами формули, необхідно впевнитися, що продукти газифікації є рівноважною газоподібною сумішшю. Для цього необхідно знайти константи хімічних реакцій газифікації. Для кожного палива визначили константи рівноваги трьох реакцій, двома способами, як приклад розглянуто процес газифікації вугілля.

Реакція водяного газу:



1 спосіб. За об'ємним вмістом компонентів

$$K_{p(\text{фактич})} = \frac{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{CO}}} =$$

$$= (0,009 \cdot 0,158) / (0,005 \cdot 0,324) = 0,877 \text{ атм}^2$$

2 спосіб. Аналітичний, використовуючи табличні значення констант рівноваги для відомих елементів

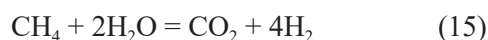
$$K_{p(\text{теор})} = \frac{K_{\text{H}_2\text{O}} \cdot K_{\text{CO}}}{K_{\text{CO}_2} \cdot K_{\text{H}_2}} =$$

$$= (4,676 \cdot 10^{-45} \cdot 2,134 \cdot 10^{-33}) / (1,538 \cdot 10^{-62} \cdot 6,616 \cdot 10^{-16}) = 0,98 \text{ атм}^2.$$

Бачимо невелику відмінність в отриманих значеннях, що пояснюється невідповідністю процесу рівноважному за даної температури газифікації. Наочно це видно на графіку (рис. 1), коли

фактично отримані значення «випадають» з лінії, побудованої на основі теоретично отриманих точок. Це означає, що за цієї реакції газифікація цього виду біомаси проходить неефективно.

Реакція парового реформінгу метану



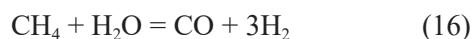
$$K_{p(\text{фактич})} = \frac{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}^4}{P_{\text{H}_2\text{O}}^2 \cdot P_{\text{CH}_4}} =$$

$$= (0,009 \cdot 0,158^4) / (0,001 \cdot 0,005^2) = 224 \text{ атм}^2$$

$$K_{p(\text{теор})} = \frac{K_{\text{H}_2\text{O}}^2 \cdot K_{\text{CH}_4}}{K_{\text{CO}_2} \cdot K_{\text{H}_2}^4} =$$

$$= ((1,912 \cdot 10^{-55}) \cdot (2,134)^2 \cdot 10^{-66}) / (1,538 \cdot 10^{-62} \cdot (6,616)^4 \cdot 10^{-64}) = 295 \text{ атм}^2.$$

Реакція конверсії метану



$$K_{p(\text{фактич})} = \frac{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2}^3}{P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{CH}_4}} =$$

$$= (0,324 \cdot 0,158^3) / (0,001 \cdot 0,005) = 255 \text{ атм}^2$$

$$K_{p(\text{теор})} = \frac{K_{\text{H}_2\text{O}} \cdot K_{\text{CH}_4}}{K_{\text{CO}} \cdot K_{\text{H}_2}^3} =$$

$$= (1,912 \cdot 10^{-55} \cdot 2,134 \cdot 10^{-33}) / (4,676 \cdot 10^{-45} \cdot 6,616^3 \cdot 10^{-48}) = 301 \text{ атм}^2.$$

Аналогічні дії проводимо для інших продуктів газифікації. Тоді значення констант рівноваги, що залежать від мольних часток компонентів і температур газифікації, вибудовуватимуться вздовж теоретично отриманої лінії (рис. 1, рис. 2, рис. 3).

Загалом, точки на графіках, отримані за фактичними розрахунками і теоретичними (табличними) даними, показують високий ступінь збігу. Це дає нам підстави приймати продукти газифікації біомаси за рівноважні газові суміші, а отже, користуватися табличними даними і формулами для розрахунків рівноважного складу.

Користуючись наведеними в [7] даними, наведемо склад біомаси, що включає органічні елементи та вологу (табл. 1).

2. Основні рівняння процесу газифікації

Розглянемо процес газифікації окремих речовин. Для розрахунку рівноважного складу ПЗ будемо використовувати програму TERRA.

Вугілля/Coal

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 1105 К. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

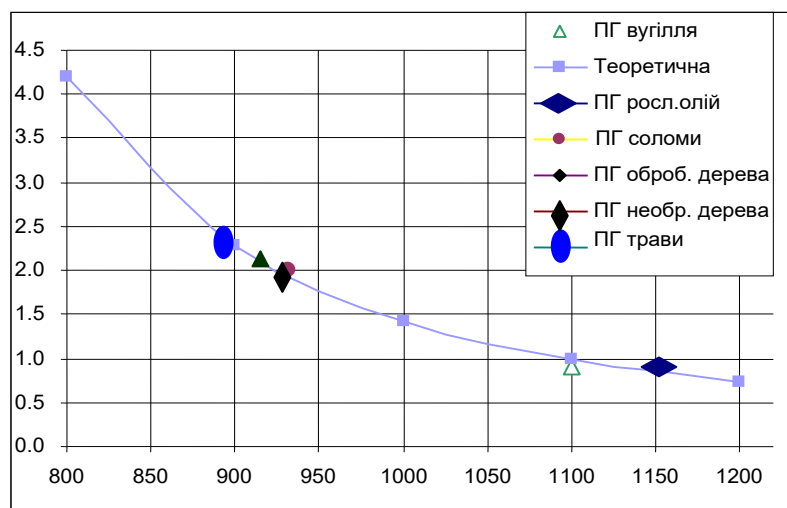


Рис. 1. Константи рівноваги реакцій газифікації, розрахункові та теоретичні (реакція $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}$)

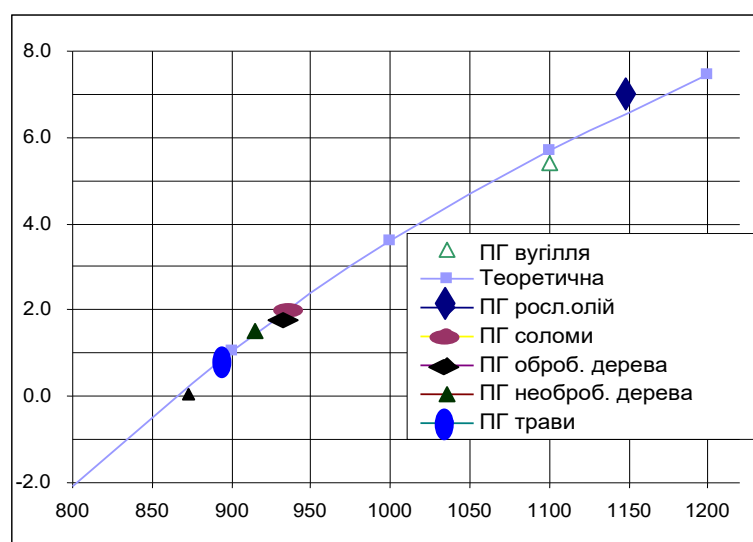


Рис. 2. Константи рівноваги реакцій газифікації, розрахункові та теоретичні (реакція $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$)

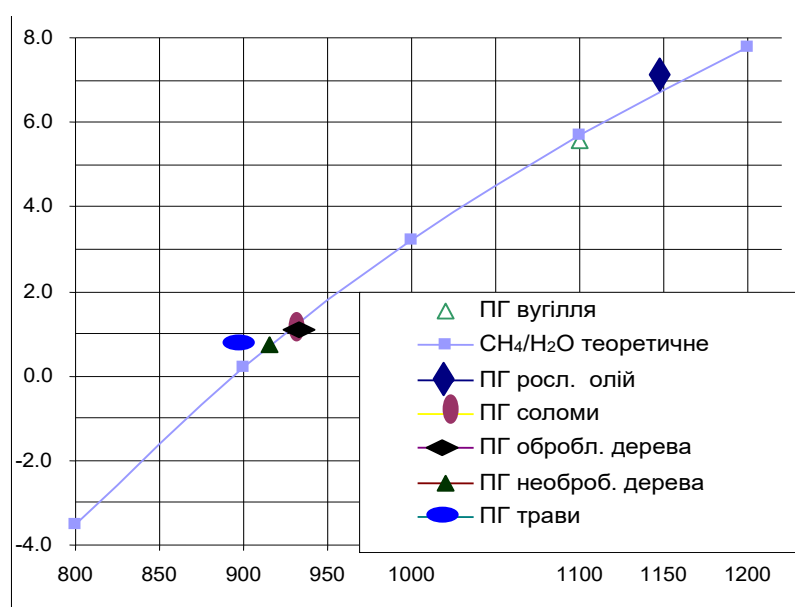


Рис. 3. Константи рівноваги реакцій газифікації, розрахункові та теоретичні (реакція $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$)

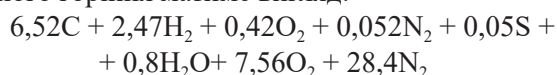
Склад вугілля та біомаси для процесу газифікації

№	Паливо	Елементарний склад, % маси					Вода, % загальної маси біомаси
		C	H	O	N	S	H ₂ O
1	Вугілля	78,2	4,93	13,3	1,45	1,69	11,5
2	Рослинні олії	75,4	11,7	12,9	0,0	0,0	0,0
3	Солома	48,9	5,97	43,9	0,82	0,15	12,7
4	Оброблена деревина	51,5	6,03	41,3	1,22	0,09	14,6
5	Необроблена деревина	50,8	6,06	42,7	0,36	0,07	19,8
6	Трава	49,7	6,00	42,7	1,32	0,18	24,2

C = 78,2 кг; H = 4,93 кг; O = 13,3 кг; N₂ = 1,66 кг; S = 1,91 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α , необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:



$\alpha = 0.23$.

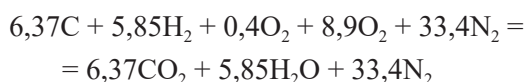
Рослинні олії /Vegetable oils

Проведемо зіставлення наведеного складу продуктів газифікації ПГ з продуктами згоряння ПЗ за тих самих термодинамічних умов: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 1148 К. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 75,4 кг; H₂ = 11,7 кг; O₂ = 12,9 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α , необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow* (кг / кг біомаси) 3.837.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:



Необхідний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0.274$.

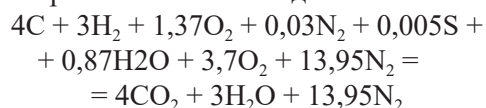
Солома/Straw

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 932 К. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 48,9 кг; H = 5,97 кг; O = 43,9 кг; N₂ = 0,82 кг; S = 0,15 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α , необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:



Необхідний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0.23$.

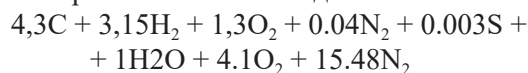
Оброблена деревина /Treated wood

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 928 К. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 51,5 кг; H = 6,03 кг; O = 41,3 кг; N = 1,22 кг; S = 0,09 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α , необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:



Необхідний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0.23$.

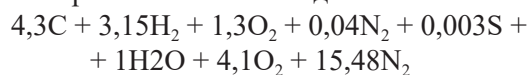
Необроблена деревина /Unreated wood

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 915 К. Для розрахунку рівноважного складу ПЗ використовуємо програму FUEL. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

C = 50,8 кг; H = 6,06 кг; O = 42,7 кг; N = 0,36 кг; S = 0,07 кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α , необхідного для цієї реакції, складаємо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:



Необхідний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0.23$.

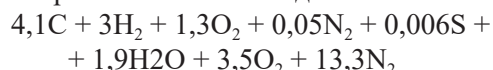
Трава/Grass

Умови реакції: тиск 0,1013 МПа, температура процесу 894 К. Для розрахунку рівноважного складу ПЗ використовуємо програму FUEL. Початковий склад палива задаємо в масових частках:

$C = 49,7$ кг; $H = 6$ кг; $O = 42,7$ кг; $N = 1,32$ кг; $S = 0,18$ кг.

Для розрахунку коефіцієнта надлишку повітря α , необхідного для цієї реакції, складемо рівняння реакції (1), а також використовуємо наведене авторами статті [7] значення *Air flow*.

У молярних одиницях ліва частина рівняння повного горіння матиме вигляд:



Необхідний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0,2$.

Порівняємо результати наших розрахунків і експериментальні дані з [7], результати порівняння наведені в табл. 2.

Розрахуємо відносну похибку проведених розрахунків за кожним компонентом (табл. 3).

Проаналізувавши отримані графіки, що базуються на рівноважних реакціях газифікації, а саме реакції водяного газу реакція (14), парового реформінгу метану реакція (15) та конверсії метану, реакція (16), можна зробити ряд важливих висновків. Високий вміст CO у продуктах газифікації вказує на домінування реакції (16), особливо при підвищених температурах, оскільки рівновага зміщується в бік утворення CO і H_2 .

Реакція (14) відіграє важливу роль у формуванні водню, проте її рівноважний стан залежить від температури та співвідношення реагентів.

Таблиця 2

Порівняння розрахункових та експериментальних складів продуктів газифікації вугілля та біомаси

№	Тип палива	Джерело	T(K)	Air flow (кг/кг біомаси)	Склад продуктів газифікації (мольні долі)						
					H ₂ O	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ S
1	Вугілля	[1]	1105	2,836	0,005	0,500	0,158	0,324	0,009	0,001	0,003
		Наш розрахунок			0,004	0,500	0,177	0,304	0,007	0,001	0,001
2	Рослинні олії	[1]	1148	3,837	0,003	0,467	0,251	0,275	0,003	0,001	0,000
		Наш розрахунок			0,003	0,455	0,267	0,270	0,003	0,002	0,000
3	Солома	[1]	952	1,401	0,063	0,384	0,225	0,205	0,113	0,010	0,000
		Наш розрахунок			0,060	0,383	0,227	0,210	0,108	0,011	0,000
4	Оброблена деревина	[1]	928	1,628	0,062	0,409	0,213	0,194	0,112	0,010	0,000
		Наш розрахунок			0,060	0,402	0,220	0,199	0,107	0,113	0,000
5	Необроблена деревина	[1]	915	1,452	0,076	0,380	0,227	0,177	0,126	0,013	0,000
		Наш розрахунок			0,074	0,375	0,234	0,181	0,121	0,015	0,000
6	Трава	[1]	894	1,240	0,097	0,363	0,232	0,146	0,145	0,018	0,000
		Наш розрахунок			0,088	0,385	0,223	0,148	0,138	0,018	0,000

Таблиця 3

Відносна похибка розрахунку теоретичного складу продуктів згоряння порівняно з експериментальними даними

№	Тип палива	Відносна похибка розрахунку, %						
		H ₂ O	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ S
1	Вугілля	12	0	12	6	19	0	67
2	Рослинні олії	0	3	6	2	0	82	0
3	Солома	3	0.3	0.9	2	4	10	0
4	Оброблена деревина	3	2	3	3	4	15	0
5	Необроблена деревина	3	1	3	2	4	15	0
6	Трава	9	6	4	1	5	0	0

За низьких температур реакція (14) зміщується вліво, що сприяє утворенню CO_2 , тоді як при підвищенні температури концентрація CO зростає. Паровий реформінг метану (16) є основним механізмом утворення H_2 , що підтверджується значним збільшенням його концентрації у високотемпературному діапазоні. Залежно від вихідної сировини вміст H_2 може суттєво змінюватися: біомаса з високим вмістом кисню сприяє утворенню більшої кількості CO_2 та водяної пари, що може знижувати концентрацію CO і H_2 . Динаміка зміни рівноважних констант K_p свідчить про високу кореляцію між розрахунковими та експериментальними даними, що підтверджує ефективність використаної методології. Зокрема, при підвищенні температури значення K_p для реакцій (14) та (16) збільшується, що вказує на зміщення рівноваги у бік утворення CO та H_2 , тоді як для реакції (16) рівноважна константа також зростає, що сприяє підвищенню концентрації H_2 .

Отримані результати демонструють, що температура є ключовим фактором у визначенні складу генераторного газу: при 800–900°C і водяної пари, що свідчить про домінування реакцій окислення, тоді як при 1000–1100°C основними продуктами є CO і H_2 , що підтверджує переважання реакцій відновлення. Вплив складу сировини також відіграє значну роль: деревина через

високий вміст кисню продукує більше CO_2 , тоді як пластик і гума через високий вміст вуглецю та водню сприяють утворенню CO та H_2 . Це підтверджується відповідними рівноважними концентраціями компонентів газової фази. Таким чином, процес газифікації може бути оптимізований шляхом регулювання температурного режиму та співвідношення реагентів, що дозволить отримати генераторний газ із бажаним складом для конкретних енергетичних або хімічних застосувань.

Висновки. В роботі розвинутий теоретичний підхід щодо розрахунку складу продуктів газифікації твердих палив, зокрема вугілля і біомаси, що базується на законах рівноважної термодинаміки. Представлено математичну модель визначення складу рівноважних продуктів згоряння на основі базових законів хімічної термодинаміки. Проведено аналіз основних рівнянь процесу газифікації з врахуванням впливу режимних параметрів (коефіцієнт надлишку повітря та температура процесу) на утворення продуктів газифікації.

Кореляція експериментальних і теоретичних даних підтверджує можливість прогнозування складу газової суміші на основі термодинамічного моделювання, що є важливим для проектування газифікаційних установок і визначення оптимальних умов процесу.

Список літератури:

1. Karp I.N., Pyanykh K.E., Antoshchuk T.A., Lysenko A.A. Results of laboratory and industrial tests of periodic-type gas generators. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. Volume 88, Issue 3. P 749–755. DOI: 10.1007/s10891-015-1246-y
2. Клименко В.М., Баштовий А.І., Зубенко В.І., Антошук Т.О. Дослідження швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі. *Промислова теплотехніка*. 2016. Т. 38, № 2. С. 26–33.
3. Allan M.M. Leal, William R. Smith. (2022). Inverse chemical equilibrium problems: General formulation and algorithm. *Chemical Engineering Science*. 2022. volume 252, 117162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117162>
4. М.В. Цоколов Альтернативні види палива / Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство», 20-21 травня 2021 р., м. Київ. DOI: <https://doi.org/10.20535/EHS.2021.233413>
5. Romaniuk W, Savinykh P.A., Borek K., Plotnikowa Y.A., Palitsyn A.V., Korotkov A.N., Roman K., Roman M. Improvement of Gas Generator Technology for Energy Processing of Agricultural Waste. *Energies*. 2021; 14 (12) : 3642. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123642>
6. Карп І.М., Нікітін Є.Є., П'яних К.Є., Зайвий О.М. Напрями заміщення природного газу альтернативними видами палива та енергії в промисловості та комунальній енергетиці. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2009, № 4. С. 16–26.
7. Plasinski K.J., Prins M.J., Pierik A. Exergetic Evaluation of Biomass Gasification. *Energy*. 2006, Volume 32, Issue 4. P. 568–574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.024>
8. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation / 4th ed. Springer, 2006. 378 p.

Novosad Yu.I., Vorobiov M.V. ANALYSIS OF BIOMASS GASIFICATION PROCESSES AND FORECASTING THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF SYNGAS

Replacing natural gas with alternative fuels is a reliable way to ensure the state's energy independence. Along with the widespread development of new technologies for the use of alternative fuels, in particular, such as direct combustion of biomass, for existing fuel-using equipment that burns natural gas, more easy technological option is to switch the equipment to the combustion of alternative gas fuel. Such alternative gas fuels can be biogas, landfill gas, or generator gas formed from coal or biomass.

Since generator gas can be obtained directly at the facility where specific fuel – using equipment is installed, it is important and relevant to assess the composition and properties of this fuel (generator gas) depending on the composition of the raw material-coal, biomass or waste of various origins.

The paper is devoted to determining the composition of generator gas depending on the initial composition of raw materials, the process temperature and the coefficient of excess air in the gas generator. A theoretical approach to calculating the composition of gasification products of solid fuels, in particular coal and biomass, based on the laws of equilibrium thermodynamics is developed. A mathematical model for determining the composition of equilibrium combustion products based on the Basic Laws of chemical thermodynamics is presented. The main equations of the gasification process are analyzed, taking into account the influence of regime parameters (excess air coefficient and process temperature) on the formation of gasification products. The results show that temperature is a key factor in determining the composition of the generator gas: at 800–900°C and water vapor, which indicates the dominance of oxidation reactions, while at 1000–1100°C the main products are CO and H₂ which confirms the predominance of reduction reactions. The influence of raw material composition also plays a significant role: wood, due to its high oxygen content, produces more CO₂, while plastic and rubber, due to their high carbon and hydrogen content, contribute to the formation of CO and H₂.

The correlation of experimental and theoretical data confirms the possibility of predicting the composition of the gas mixture on the basis of thermodynamic modelling, which is important for the design of gasification plants and determining the optimal process conditions.

Key words: *natural gas substitution, fuel gasification processes, equilibrium gasification products, biomass, equilibrium constants of chemical reactions.*