

УДК 621.314:662.76.034:536.72

С.В.Клюс¹, М.М.Жовмір², канд.техн.наук, З.В.Маслюкова³ (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ), В.П.Демчина⁴ (Інститут газу НАН України, Київ)

Визначення основних показників та ефективності часткової газифікації біомаси в газогенераторі щільного шару з оберненим дуттям

Викладено уточнену методику визначення параметрів процесу часткової газифікації біомаси, складання матеріального і теплового балансів. Ефективність процесу часткової газифікації характеризується коефіцієнтом корисної дії, який є відношенням теплоти згоряння отриманих кількостей горючого газу та біовугілля до нижчої теплоти згоряння біомаси. Для досліджених режимів часткової газифікації біомаси коефіцієнт корисної дії становить близько 90%. Бібл. 16, табл. 6.

Ключові слова: біомаса, карбонізація, газифікація, тепловий баланс.

ORCID: ¹0000-0002-5804-4925; ²0000-0001-6514-7474; ³0000-0002-4180-7930; ⁴0000-0001-9824-9661

Вступ. Останні роки увага багатьох дослідників націлена на дослідження та впровадження у практику нової технології газифікації твердого палива, включаючи біомасу, яка відома під назвами: часткова газифікація (карбонізація, окиснювальний піроліз, автотермічний окиснювальний піроліз), процес газифікації з оберненим дуттям та зустрічною хвилею, процес зі зворотною тепловою хвилею, цільовими продуктами якої є коксовий залишок (карбонізат) і горючий газ із відносно низьким вмістом смол, тоді як у класичних технологіях газифікації цільовим продуктом є лише горючий газ. Далі у цій статті цей процес будемо називати частковою газифікацією з оберненим дуттям та зустрічною тепловою хвилею. В роботах [1, 2] визначалися режимні параметри та енергетичні показники процесу окиснювального піролізу окремих видів біомаси і твердих викопних палив, що поглибило розуміння термохімічних перетворень, які протікають у реакторі (газифікаторі). Разом з тим дані різних авторів відрізняються за режимними умовами, виходом газу та коксового залишку, складом отримуваного генераторного (піролізного) газу, що ускладнює порівняння ефективності технології переробки палив при різних режимах її реалізації. В ряді випадків наводяться оціночні дані зі значним діапазоном зміни величин. Об'єктивно це зумовлено тим, що безпосередні вимірювання ряду

величин (витрата гарячого генераторного газу, вміст смол у газі, елементний склад палива та отримуваних продуктів) є технічно складними і затратними роботами. Їх виконання навіть у лабораторних умовах є складним завданням. У виробничих умовах на основі обмеженого переліку вимірюваних величин необхідно визначати основні характеристики здійснюваного режиму часткової газифікації палива (окиснювального піролізу) та його ефективність. У роботі [2] наведено результати досліджень часткової газифікації біомаси з оберненим дуттям та зустрічною тепловою хвилею як першої стадії двостадійного процесу повної газифікації біомаси, але автором не опубліковано методик розрахунку показників процесу, що не дозволяє скористатися ними, а опубліковані кінцеві результати складання теплового балансу свідчать про необхідність урахування теплоти екзотермічної реакції піролізу біомаси.

Постановка задачі. Метою даної роботи є розроблення методики розрахунку основних параметрів процесу часткової газифікації біомаси за експериментально визначеними значеннями окремих величин шляхом уточнення відомих методик для процесів повної газифікації. Для розрахунку параметрів процесу часткової газифікації (окиснювального піролізу) палива з оберненим дуттям та зустрічною тепловою хвилею приймаємо за основу метод матеріальних балансів, викладений

у роботах [3–6] стосовно розрахунку газогенераторів з оберненим дуттям.

Отримані результати. Вихідними даними для розрахунку є елементарний склад палива та хімічний склад отриманого генераторного (піролізного) газу. Дані про елементарний хімічний склад біомаси наводяться у довідковій літературі, причому відмінність складу сухої беззолної деревини різних порід незначна. Врахуванням фактичного виміряного вмісту золи та вологи за базою у стані постачання, тобто у стані, в якому паливо доставлене для споживання (робоча маса палива), можна розрахувати елементарний склад біомаси за відомими стандартизованими методиками.

Для класичних газогенераторів оберненого процесу дані про хімічний склад генераторного газу можна отримати з довідкової літератури. Для газогенераторів із частковою газифікацією біомаси з оберненим дуттям та зустрічною тепловою хвилюю дані щодо складу газу карбонізації бурого вугілля наведені в роботах [8, 9]. При проектних розрахунках процесів часткової газифікації біомаси можна скористатися експериментальними даними, що опубліковані в роботах [1, 2, 10], а при випробуваннях та дослідженнях ро-

боти газогенераторів необхідно виконувати аналіз хімічного складу генераторного газу.

В роботі [10] описані результати досліджень процесу часткової газифікації різних видів біопалива, за якими були визначені оптимальні режимні параметри процесу, за яких газ містив найменшу кількість смол, що конденсуються. За оптимальних параметрів проводили карбонізацію пелет деревинних і кубиків березових та за допомогою спеціального пробовідбірника відбирали на аналіз газ, а потім визначали його склад газовим хроматографом 6890 N фірми Agilent. Експериментальні дані, що характеризують процес часткової газифікації біомаси, наведені в таблиці 1. Питомий вихід біовугілля і конденсату віднесено до 1 кг робочої маси палива. У цій же таблиці 1 (колонки 4 і 5) наведено дані Інституту газу НАНУ щодо складу газу з деревини, які отримані на тому ж хроматографі [1]. Як видно з таблиці 1, склад сухого газу в процесі карбонізації різних видів деревини відрізняється несуттєво, а його середні значення можуть бути прийняті за основу для розрахунків. Нижчу теплоту згоряння сухого газу визначали розрахунковим методом за стандартною методикою [11].

Таблиця 1. Експериментальні дані часткової газифікації біомаси

Параметри	Пелети деревинні Ø8мм, $W^*=14,2\%$	Кубики березові Ø8 мм, $W^*=16,0\%$	Пелети деревинні [1]	Тріска деревна $W^*=15,0\%$ [1]	Середній склад сухого газу
Питома витрата дуттьового повітря q , $\text{нм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	45,0	50,0	–	–	–
Маса палива $m_{\text{паль}}$, кг	2,138	0,795			
Питомий вихід біовугілля $m_{\text{вуг}}$, кг/кг	0,209	0,122			
Питомий вихід конденсату $m_{\text{кон}}$, кг/кг	0,321	0,331			
Температура процесу, °C	650-750	680-800			
Склад сухого газу, % об.					
H ₂	8,71	6,83	11,30	13,35	10,05
N ₂	47,01	49,02	49,45	48,83	48,58
CO	14,40	17,65	12,59	16,03	15,17
CH ₄	7,65	7,07	6,71	5,57	6,75
CO ₂	17,59	14,46	15,84	12,49	15,10
C ₂ H ₄	0,80	1,43	0,95	0,77	0,98
C ₂ H ₂	0	0,04	0,34	0,16	0,13
C ₂ H ₆	1,16	0,85	0,21	0,11	0,58
C ₃ H ₆	0,42	0,39	0	0	0,20
C ₃ H ₈	0,10	0,09	0,13	0,07	0,10
C ₄ H ₁₀	0,22	0,22	0	0	0,11
H ₂ O	1,94	1,95	2,48	2,62	2,25
Сума	100	100	100	100	100
Нижча теплота згоряння газу, МДж/нм ³	7,40	7,58	6,22	6,14	6,84

У генераторному газі повної газифікації біомаси з оберненим дуттям вищі вуглеводні містяться у незначних кількостях, а тому при розрахунках ними нехтували або їх відносили до метану [3, 5, 6]. З наведених у таблиці 1 власних та літературних даних [1] видно, що вуглеводневі компоненти генераторного газу часткової газифікації біомаси, крім метану, є також етан, етилен, ацетилен, пропан, пропілен та бутан, об'ємний вміст яких становить понад 30% від метану, а їх вклад у теплоту згоряння становить понад 60% від вкладу метану. Тому важкі вуглеводні необхідно враховувати у подальших розрахунках процесів часткової газифікації біомаси.

Таким чином, маючи дані щодо складу біомаси і горючого газу, можна розрахувати основні параметри процесу.

Вихід газу. Питомий вихід сухого газу на 1 кг робочої маси палива визначаємо за балансом вуглецю [3, 6]. Елементарний склад 1 кг робочої маси палива виражається наступним рівнянням:

$$C^r + H^r + O^r + N^r + W^r + A^r = 1, \quad (1)$$

де C^r , H^r , O^r , N^r , W^r , A^r – вміст вуглецю, водню, кисню, азоту, вологи, золи на робочу масу палива, частка за масою.

Із C^r кг вуглецю, що міститься в 1 кг палива, в газ переходить:

$$C_r = C^r - C_{\text{вуг}} - C_{\text{см}}, \quad (2)$$

де $C_{\text{вуг}}$, $C_{\text{см}}$ – маса вуглецю у біовугіллі та смолі відповідно у перерахунку на 1 кг робочого палива.

В свою чергу:

$$C_{\text{вуг}} = C^t \cdot m_{\text{вуг}}, \quad (3)$$

$$C_{\text{см}} = q_{\text{см}} \cdot m_{\text{см}}, \quad (4)$$

де C^t – вміст вуглецю у біовугіллі, частка за масою; $q_{\text{см}}$ – вміст вуглецю у смолі, частка за масою; $m_{\text{вуг}}$ – маса отриманого біовугілля, кг/кг; $m_{\text{см}}$ – маса отриманої смоли, кг/кг.

В 1 нм^3 сухого генераторного газу міститься вуглецю (кг) [3]:

$$C_r = \frac{12(\text{CO} + \text{CO}_2 + \sum m C_m H_n)}{22,4}, \quad (5)$$

де 12 – молекулярна маса вуглецю; 22,4 нм^3 – об'єм 1 кг-моля газу при 0°C і 760 мм рт. ст.; CO, CO₂, $C_m H_n$ – вміст вуглецевмісних газів у генераторному газі, частка за об'ємом.

Поділивши кількість вуглецю в паливі, який перейшов у газ, на вміст вуглецю в 1 нм^3 газу, отримаємо вихід сухого генераторного газу на 1 кг робочої маси палива ($\text{нм}^3/\text{кг}$) [3]:

$$V_g = \frac{1,867(C^r - C_{\text{вуг}} - C_{\text{см}})}{(\text{CO} + \text{CO}_2 + \sum m C_m H_n)}. \quad (6)$$

Густина газу. Густина сухого генераторного газу ($\text{кг}/\text{нм}^3$) за нормальних умов визначається в залежності від його складу за формулою [3]:

$$\rho_r = 1,25\text{CO} + 0,09\text{H}_2 + 0,72\text{CH}_4 + 1,26\text{C}_2\text{H}_4 + 1,17\text{C}_2\text{H}_2 + 1,34\text{C}_2\text{H}_6 + 1,91\text{C}_3\text{H}_6 + 2,02\text{C}_3\text{H}_8 + 2,67\text{C}_4\text{H}_{10} + 1,98\text{CO}_2 + 1,25\text{N}_2, \quad (7)$$

де CO, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₂, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈, C₄H₁₀, CO₂, N₂ – вміст відповідних газів у сухому генераторному газі, частка за об'ємом; числові коефіцієнти при вмісті компонентів газу означають густину відповідного газу при 0°C і 760 мм рт. ст.

Вологість газу. Вологість газу, що виходить із газогенератора, визначається з балансу водню. Так, у процесі газифікації водень вноситься з паливом. Тому кількість водяної пари в газі, який виходить із газогенератора, складається з гігроскопічної вологи палива і пірогенетичної вологи, яка утворилася із водню палива, за вирахуванням водню у складі смоли і газів. Маса вологи ($\text{кг}/\text{нм}^3$), яка міститься в 1 нм^3 газу:

$$d_r = \frac{1}{V_g} \left(W^r + 9H^r - 9h_{\text{см}} m_{\text{см}} - 0,804(H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n) \right), \quad (8)$$

де $h_{\text{см}}$ – вміст водню у смолі, частка за масою; 0,804 – умовна густина водяної пари при 0°C і 760 мм рт. ст., $\text{кг}/\text{нм}^3$.

Вихід вологого газу. Загальний об'єм вологого газу ($\text{нм}^3/\text{кг}$), що утворюється з 1 кг робочої маси палива, складається із об'єму сухого газу і об'єму водяної пари [3]:

$$V'_g = V_g (1 + 1,245d_r). \quad (9)$$

Витрата повітря. Витрата повітря на газифікацію 1 кг палива визначається на основі матеріального балансу азоту, який при газифікації палива переходить із повітря у газ (азотом палива нехтуємо внаслідок його незначності).

Приймаючи, що вміст азоту в повітрі становить 0,79 від його об'єму, а виміряна об'ємна частка азоту в генераторному газі становить N_2 , тоді на утворення 1 нм^3 газу витрачається повітря $N_2/0,79$. Відповідно на газифікацію 1 кг робочої маси палива потрібно забезпечити витрату повітря ($\text{нм}^3/\text{кг}$):

$$L = V_g \cdot \frac{N_2}{0,79}. \quad (10)$$

Перевірка правильності та достовірності визначення параметрів процесу часткової газифікації здійснюється шляхом складання матеріального і теплового балансів процесу.

Матеріальний баланс на 1 кг робочої маси палива. У відповідності із законом збереження матерії маса речовин, витрачених при газифікації палива, повинна дорівнювати масі речовин, одержаних у результаті процесу газифікації. Рівняння матеріального балансу в розрахунку на 1 кг робочої маси палива має вигляд:

$$1,000 + \rho_{\text{п}} \cdot L = \rho_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}} + m_{\text{вуг}} + m_{\text{кон}} + m_{\text{см}}, \quad (11)$$

де 1,000 – маса робочого палива; $\rho_{\text{п}} \cdot L$ – маса витраченого дуттьового повітря; $\rho_{\text{п}}$ – густина дуттьового повітря, $\text{кг}/\text{нм}^3$; $\rho_{\text{г}} \cdot V_{\text{г}}$ – маса сухого газу; $\text{кг}/\text{кг}$; $m_{\text{вуг}}$, $m_{\text{кон}}$, $m_{\text{см}}$ – маса отриманого вугілля, конденсату і смоли відповідно, $\text{кг}/\text{кг}$.

Тепловий баланс на 1 кг робочої маси палива складають з метою встановлення рівності вхідних у газогенератор потоків потенційної (хімічної) теплоти палива та теплової енергії палива і окислювача, теплоти реакції термічного розпаду біомаси вихідним потокам хімічної теплоти та фізичної теплоти біовугілля, смол, генераторного газу та вологи, що в ньому міститься, а також втрат теплоти в оточуюче середовище. Тепловий баланс будемо складати за нижчою теплоотою згоряння горючих речовин:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}, \quad (12)$$

де у *прихідній частині теплового балансу*: Q_1 – потенційна (хімічна) теплота палива на робочу

масу, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_2 – фізична теплота палива, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_3 – фізична теплота дуттьового повітря, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_4 – теплота реакції термічного розпаду біомаси, $\text{кДж}/\text{кг}$;

у *витратній частині теплового балансу*: Q_5 – потенційна (хімічна) теплота сухого газу, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_6 – фізична теплота сухого газу, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_7 – потенційна (хімічна) теплота біовугілля, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_8 – фізична теплота біовугілля, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_9 – фізична теплота водяної пари, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_{10} – потенційна (хімічна) теплота смоли, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_{11} – фізична теплота смоли, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q_{12} – втрата теплоти в навколишнє середовище.

Розрахунок статей теплового балансу.

1. Потенційна (хімічна) теплота палива на робочу масу приймається рівною його нижчій теплоті згоряння $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$, яку визначають за елементарним складом палива за відомою стандартизованою залежністю [11]:

$$Q_1 = Q_{\text{пал}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}}. \quad (13)$$

2. Фізична теплота палива:

$$Q_2 = C_6 t_6, \quad (14)$$

де C_6 – теплоємність біопалива, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_6 – температура біопалива, $^\circ\text{C}$.

3. Фізична теплота повітря:

$$Q_3 = L C_{\text{п}} t_{\text{п}}, \quad (15)$$

де $C_{\text{п}}$ – теплоємність повітря, $\text{кДж}/(\text{нм}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{п}}$ – температура дуттьового повітря, $^\circ\text{C}$.

4. Теплота термічного розпаду біомаси Q_4 .

За літературними даними реакції термічного розпаду палив із великим вмістом кисню є екзотермічними, а теплота реакції становить біля 1173 $\text{кДж}/\text{кг}$ [15], а за іншими даними [16] – біля 6% від теплоти згоряння деревини. Для подальших розрахунків приймаємо, що теплота екзотермічних реакцій розпаду біомаси становить 5% від нижчої теплоти згоряння палива на робочу масу, тобто $Q_4 = 0,05 Q_1$.

5. Потенційна (хімічна) теплота сухого газу визначається за нижчою теплоотою згоряння сухого генераторного газу $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$, яку розраховують за відомою залежністю [11] на основі виміряного його хімічного складу та визначеним виходом сухого газу $V_{\text{г}}$:

$$Q_5 = Q_{\text{газ}} = V_g \cdot Q_{\text{н}}^c \quad (16)$$

6. Фізична теплота сухого газу:

$$Q_6 = V_g \cdot t_{\text{г}} \Sigma(v \cdot C_{pi}), \quad (17)$$

де $t_{\text{г}}$, °C – температура газу на виході з газогенератора; v – вміст окремих складових газу, частка за об'ємом; C_{pi} – теплоємність складових газу, кДж/(нм³·°C).

7. Потенційна (хімічна) теплота біовугілля:

$$Q_7 = Q_{\text{вуг}} = m_{\text{вуг}} \cdot Q_{\text{н,вуг}}^p \quad (18)$$

де $Q_{\text{н,вуг}}^p$ – нижча теплота згоряння біовугілля, розраховується за даними про його елементарний склад за залежністю, наведеною в [11], або визначена шляхом спалювання проби біовугілля у калориметричній бомбі, кДж/кг.

8. Фізична теплота біовугілля:

$$Q_8 = m_{\text{вуг}} C_{\text{вуг}} t_{\text{вуг}}, \quad (19)$$

де $C_{\text{вуг}}$ – теплоємність біовугілля, кДж/(кг·°C); $t_{\text{вуг}}$ – температура біовугілля, °C.

9. Фізична теплота водяної пари, що міститься у генераторному газі:

$$Q_9 = m_{\text{кон}} \frac{22,4}{18} C_{\text{пар}} t_{\text{пар}}, \quad (20)$$

де $C_{\text{пар}}$ – теплоємність водяної пари; кДж/(нм³·°C); $t_{\text{пар}}$ – температура пари, °C.

10. Потенційна (хімічна) теплота смоли:

$$Q_{10} = m_{\text{см}} Q_{\text{см}} \quad (21)$$

де $Q_{\text{см}}$ – нижча теплота згоряння смоли, що розраховується за залежністю для рідкого палива [11] на основі даних про її елементарний склад, або визначена методом її спалювання у калориметричній бомбі, кДж/кг.

11. Фізична теплота смоли:

$$Q_{11} = m_{\text{см}} C_{\text{см}} t_{\text{см}}, \quad (22)$$

де $C_{\text{см}}$ – теплоємність смоли, кДж/(кг·°C); $t_{\text{см}}$ – температура смоли, °C.

12. Втрати теплоти відбуваються через бічну циліндричну поверхню газогенератора, кришку та днище. Зовнішню поверхню газогенератора умовно розділяють на n зон площею F_i з однаковими умовами променевого та конвективного

теплообміну. Для кожної зони визначають питомий тепловий потік втрат теплоти (Вт/м²) конвекцією та випромінюванням за відомою залежністю для складного теплообміну:

$$q_i = \varepsilon_i C_0 \left[\left(\frac{T_{pi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{ki} (t_{pi} - t_o), \quad (23)$$

де ε_i – ступінь чорноти зовнішньої поверхні газогенератора в i -й зоні; $C_0 = 5,67$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К⁴); α_{ki} – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від поверхні газогенератора в i -й зоні, Вт/(м²·К); T_{pi} , t_{pi} – температура поверхні газогенератора в i -й зоні, К, °C; T_o , t_o – середня температура навколишнього повітря, К, °C.

Сумарні втрати теплоти через зовнішні поверхні газогенератора віднесені до 1 кг робочої маси палива, кДж/кг:

$$Q_{12} = \left(\sum_{i=1}^n q_i \cdot F_i \right) \tau / m_{\text{пал}}, \quad (24)$$

де F_i – площа зовнішньої поверхні газогенератора в i -й зоні, м²; τ – тривалість процесу газифікації наважки біопалива, с; $m_{\text{пал}}$ – маса наважки робочого палива, що газифікована, кг.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) часткової газифікації. ККД визначаємо як відношення суми потенційної (хімічної) теплоти газу і біовугілля, які отримані з 1 кг робочої маси палива, до нижчої теплоти згоряння палива:

$$\eta = \frac{Q_{\text{газ}} + Q_{\text{вуг}}}{Q_{\text{пал}}} \cdot 100 \%. \quad (25)$$

Приклад визначення основних параметрів процесу часткової газифікації біомаси (пелет деревних та кубиків березових) за даними дослідів, описаних у роботі [10].

Для розрахунків приймаємо склад деревини на суху масу за роботою [7] ($C^d = 50\%$; $O^d = 42\%$; $H^d = 6\%$; $N^d = 1\%$; $A^d = 1\%$) та розраховуємо склад палива на робочу масу з урахуванням даних [10] про фактичні значення вмісту вологи та золи у досліджених паливах.

При охолодженні газу утворювався конденсат. Конденсат, що отриманий при частковій газифікації кубиків березових, мав прозорий кори-

чневий колір без маслянистих плівок, а з пелет деревних (соснових) – мав темний колір із незначними слідами маслянистих речовин. Склад газу і питомі виходи біовугілля та конденсату приймали за табл. 1. Склад смол прийняли за джерелом [12]: (C = 70,41%; O₂ = 21,5%; H₂ = 6,79%; N₂ = 0,5%; A = 0,8%). Дані щодо вмісту смоли в генераторному газі оберненого процесу газифікації деревини (0,1-1,2 г/нм³) прийняли за джерелом [13].

Вміст вуглецю у біовугіллі приймали залежно від температури карбонізації деревини за

даними [14], що наведені у таблиці 2.

Використовуючи залежності (2)-(10), визначили параметри процесу, які наведені у таблиці 3. Результати розрахунку матеріальних балансів наведені в табл. 4.

Необхідні для розрахунку статей теплового балансу довідкові дані щодо теплоємностей біопалива, біовугілля, смоли і газів приймалися за джерелами [2, 4]. Результати розрахунку теплових балансів наведені в табл. 5 і 6.

Таблиця 2. Елементарний склад біовугілля залежно від температури карбонізації [14]

Температура, °C	Елементний склад біовугілля, % мас.			
	C'	H	O	A
350	73,3	5,0	19,7	2,0
400	77,3	4,7	15,9	2,1
450	81,6	4,3	11,7	2,4
500	85,9	4,0	7,4	2,7
550	88,1	3,6	5,4	2,9
600	90,3	3,3	3,4	3,0
650	91,4	3,0	2,5	3,1
700	92,3	2,8	1,7	3,2
750	92,7	2,5	1,6	3,2
800	93,4	1,8	1,5	3,3
850	93,9	1,6	1,2	3,3
900	94,4	1,2	1,0	3,4

Таблиця 3. Параметри процесу часткової газифікації біомаси

Біомаса	Вихід сухого газу, V_g , нм ³ /кг	Питома вага газу ρ_g , кг/нм ³	Вологість газу d_g , кг/нм ³	Вихід вологого газу V'_g , нм ³ /кг	Витрати повітря L , нм ³ /кг
Пелети деревинні	0,97	1,22	0,373	1,42	0,58
Кубики березові	1,25	1,22	0,255	1,65	0,78

Таблиця 4. Матеріальний баланс часткової газифікації біомаси

Прихід		Витрата	
Пелети деревинні			
1. Маса робочого палива.....1,000 кг		1. Маса сухого газу1,183 кг	
2. Маса повітря0,750 кг		2. Маса біовугілля0,209 кг	
Разом.....1,750 кг		3. Маса конденсату0,321 кг	
		4. Маса смоли.....0,0017 кг	
		Разом..... 1,714 кг	
Нев'язка матеріального балансу 2,0%			
Кубики березові			
1. Маса робочого палива.....1,000 кг		1. Маса сухого газу1,525 кг	
2. Маса повітря1,008 кг		2. Маса біовугілля0,122 кг	
Разом.....2,008 кг		3. Маса конденсату0,331 кг	
		4. Маса смоли0,0012 кг	
		Разом.....1,979 кг	
Нев'язка матеріального балансу 1,4%			

Таблиця 5. Тепловий баланс часткової газифікації пелет деревинних

Прихід	кДж/кг	%	Витрата	кДж/кг	%
Хімічна теплота робочого палива Q_1	15932	94,9	Хімічна теплота сухого газу Q_5	7178	45,2
Фізична теплота палива Q_2	44	0,2	Фізична теплота газу Q_6	436	2,7
Фізична теплота повітря Q_3	15	0,1	Хімічна теплота біовугілля Q_7	7124	44,9
Теплота термічного розпаду біомаси Q_4	797	4,8	Фізична теплота біовугілля Q_8	289	1,8
Разом	16788	100	Фізична теплота водяної пари Q_9	184	1,2
Нев'язка теплового балансу 5,4% ККД=89,8%			Хімічна теплота смоли Q_{10}	51	0,285
			Фізична теплота смоли Q_{11}	2,4	0,015
			Втрати теплоти Q_{12}	614	3,9
			Разом	15878	100

Таблиця 6. Тепловий баланс часткової газифікації кубиків березових

Прихід	кДж/кг	%	Витрата	кДж/кг	%
Хімічна теплота робочого палива Q_1	15140	94,9	Хімічна теплота сухого газу Q_5	9475	60,7
Фізична теплота палива Q_2	44	0,2	Фізична теплота газу Q_6	556	3,6
Фізична теплота повітря Q_3	20,3	0,1	Хімічна теплота біовугілля Q_7	4173	26,7
Теплота термічного розпаду біомаси Q_4	757	4,8	Фізична теплота біовугілля Q_8	196	1,2
Разом	15961	100	Фізична теплота водяної пари Q_9	190	1,2
Нев'язка теплового балансу 2,2% ККД = 90,1%			Хімічна теплота смоли Q_{10}	36	0,23
			Фізична теплота смоли Q_{11}	1,7	0,07
			Втрати теплоти Q_{12}	978	6,3
			Разом	15606	100

Аналіз статей матеріального балансу показує, що при частковій газифікації пелет вихід біовугілля становив 21% мас., а з кубиків березових лише 12,2% мас. від маси палива. З березових кубиків отримували більше газу, причому цей газ мав вищу теплоту згоряння. Це може вказувати на те, що для виробництва біовугілля більш прийнятним є процес, реалізований при частковій газифікації пелет, а для виробництва генераторного газу – процес, реалізований при частковій газифікації кубиків березових.

Незважаючи на викладені відмінності теплових статей теплового балансу для розглянутих процесів часткової газифікації пелет та кубиків березових, значення коефіцієнтів корис-

ної дії є близькими за величиною і становлять біля 90%, що вище, ніж для процесів повної газифікації біомаси.

Висновки. 1. Уточнено методику визначення параметрів процесу часткової газифікації біомаси врахуванням теплоти екзотермічних реакцій термічного розкладання біомаси.

2. Показано, що при частковій газифікації біомаси отриманий газ, крім метану, має підвищений вміст вищих вуглеводнів – етану, етилену, ацетилену, пропану та бутану, об'ємний вміст яких становить понад 30% від вмісту метану, а їх вклад у теплоту згоряння газу становить понад 60% від вкладу метану, а тому ними не можна нехтувати при визначенні теплоти згоряння газу.

Наявність цих компонентів збільшує теплоту згоряння газу до 7,5 МДж/нм³.

3. Достовірність методики підтверджена шляхом складання матеріальних і теплових балансів процесу на основі експериментально визначеного складу газу, виходу біовугілля і конденсату. Нев'язка матеріальних балансів становила 1,4-2,0%, а теплових – 2,2-5,4%.

4. Коефіцієнт корисної дії процесу часткової газифікації біомаси, із врахуванням теплоти згоряння газу і біовугілля, становить біля 90%, що значно більше, ніж для класичної повної газифікації.

1. *Карп І.Н., Марцовой Е.П., Пьяных К.Е., Антошчук Т.А., Пьяных К.К.* Исследование и внедрение процессов газификации углей и биомассы с целью замещения природного газа // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – № 4. – С. 3–11.

2. *Кремнева К.В.* Підвищення ефективності двостадійного процесу газифікації дрібнодисперсної біомаси для когенераційних установок малої потужності: автореф. дис. Підвищення ефективності двостадійного процесу газифікації дрібнодисперсної біомаси для когенераційних установок малої потужності, канд.техн.наук 05.14.06: Кремнева К.В. Національна металургійна академія України. – Дніпропетровськ, 2015. – 21 с.

3. *Токарев Г.Г.* Газогенераторные автомобили. – М.: Машгиз, 1958. – 206 с.

4. *Хмельницкий Р.З.* Методика расчета показателей газификации твердых топлив. – М.: МЭИ, 1962 – 29 с.

5. *Черномордик Б.М.* Теория и расчет транспортных газогенераторов. – М.: НКТМ, 1943. – 176 с.

6. *Юдушкин Н.Г.* Газогенераторные тракторы: Теория, конструкция и расчет. – М.: Машгиз, 1955. – 242 с.

7. *Горбов В.М.* Енергетичні палива. – Миколаїв: Видавництво УДМТУ, 2003. – 328 с.

8. *Гроо А.А.* Интенсификация процессов тепло- и массообмена при слоевой газификации угля с использованием обратного дутья: автореф. дисс. Интенсификация процессов тепло- и массообмена при слоевой газификации угля с использованием обратного дутья, канд.техн.наук 05.14.14: Гроо А. А.; Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск, 2007. – 20 с.

9. *Исламов С.Р.* Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции "Термококс": автореф. дисс. Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции "Термококс", докт.техн. наук 05.14.04: Исламов С. Р.; Сибирский федеральный университет. – Красноярск. 2010. – 32 с.

10. *Клюс С.В.* Експериментальні дослідження процесів енерготехнологічного перетворення біомаси в реакторах щільного шару палива // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 3 – С. 85–92.

11. *ДСТУ 3581-97 (ГОСТ 30517-97).* Энергоэкономия. Методы измерения теплоты сгорания топлива. Общие положения. – К. Мінекономрозвитку України, 1999. – 30 с.

12. *Левин Э.Д.* Теоретические основы производства древесного угля. – М.: изд. Лесная промышленность, 1980. – 153 с.

13. *Братцев А.Н., Кузнецов В.А., Лернер А.С., Попов В.Е., Субботин Д.И., Уфимцев А.А., Штенгель С.В.* Определение содержания смол в синтез-газе, полученном при воздушно-плазменной газификации древесных отходов // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 5 – С. 33–36.

14. *Юджевич Ю.Д., Васильев С.Н., Ягодин В.И.* Получение химических продуктов из древесных отходов. – СПб.: изд. СПб ЛТА, 2002. – 85 с.

15. *Лавров Н.В., Шурыгин А.П.* Введение в теорию горения и газификации топлива. – М.: АН СССР, 1962. – 215 с.

16. *В.И. Корякин.* Термическое разложение древесины. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 296 с.

REFERENCES

1. *Karp I.N., Martsevov Ye.P., Pyanykh K.Ye., Antoshchuk T.A., Pyanykh K.K.* Research and implementation of coal gasification processes and biomass to replace natural gas // Energotekhnologii i resursosberezhenie. – 2014. – № 4. – Pp. 3–11. (Rus)

2. *Kremneva K.V.* Improving the efficiency of two-stage gasification process for fine biomass low powered cogeneration plants: Extended abstract of candidate's thesis 05.14.06: Improving the efficiency of two-stage gasification process for fine biomass low powered cogeneration plants: Kremneva K.V. Natsionalna metalurhiina akademiia Ukrain. – Dnipropetrovsk, 2015. – 21 p. (Ukr)

3. *Tokarev G.G.* Gasified vehicles. – M.: Mashgiz, 1958. – 206 p. (Rus)

4. *Khmelitskiy R.Z.* Method of calculation of solid fuel gasification indicators. – M.: MEI, 1962 – 29 p. (Rus)

5. *Chernomordik B.M.* Theory and calculation of transport of gas generators. – M.: NKTM, 1943. – 176 p. (Rus)

6. *Yudushkin N.G.* Gas generator tractors: The theory, design and calculation. – M.: Mashgiz, 1955. – 242 p. (Rus)

7. *Horbov V.M.* Energy fuels. – Mykolaiv: Vydavnytstvo UDMTU, 2003. – 328 p. (Ukr)

8. *Hroo A.A.* The intensification of heat and mass transfer with the layer of coal gasification using a reverse blast: Extended abstract of candidate's thesis 05.14.14.: The intensification of heat and mass transfer with the layer of coal gasification using a reverse blast: Hroo A.A.; Institut teplofiziki im. S.S.Kutateladze SO RAN. – Novosibirsk, 2007. – 20 p.

9. *Islamov S.R.* Energy efficient use of brown coal on the basis of "TERMOKOKS" concept: Extended abstract of Doctor's thesis 05.14.04: Energy efficient use of brown coal on the basis of "TERMOKOKS" concept: Islamov S. R.; Sibirskiy federalnyy universitet. – Krasnoyarsk. 2010. – 32 p. (Rus)

10. *Klius S.V.* Experimental studies of energy conversion processes of biomass in thick layer fuel reactors // Vidnovliuvana enerhetyka. – 2015. – № 3 – Pp. 85–92. (Ukr)

11. DSTU 3581-97 (HOST 30517-97). Energy saving. Methods for determining the heat of combustion. General terms. – K. Minekonomrozyvtyku Ukrainy, 1999. – 30 p. (Ukr)
12. Levin E.D. Theoretical basis of the production of charcoal. – M.: Lesnaya promyshlennost, 1980. – 153 p. (Rus)
13. Brattsev A.N., Kuznetsov V.A., Lerner A.S., Popov V.Ye., Subbotin D.I., Ufimtsev A.A., Shtengel S.V. Determination of tar content in synthesis gas obtained at the air-plasma gasification of waste wood // Energotekhnologii i resursosberezhenie. – 2012. – № 5 – Pp. 33–36. (Rus)
14. Yudkevich Yu.D., Vasilev S.N., Yagodin V.I. Production of chemical products from wood waste. – SPb.: izd. SPb LTA, 2002. – 85 p. (Rus)
15. Lavrov N.V., Shurygin A.P. Introduction to the theory of combustion and gasification of fuel. – M.: AN SSSR, 1962. – 215 p. (Rus)
16. Koryakin V.I. Thermal decomposition of wood. – M.: Goslesbumizdat, 1962. – 296 p. (Rus)

С.В.Клюс, Н.Н.Жовмир, канд.техн.наук, З.В.Маслюкова (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев), **В.П.Демчина** (Институт газа НАН Украины, Киев)

Определение основных показателей и эффективности частичной газификации биомассы в газогенераторе плотного слоя с возвратным дутьем

Изложена уточненная методика определения параметров процесса частичной газификации биомассы, составления материального и теплового балансов. Эффективность процесса частичной газификации характеризуется коэффициентом полезного действия, который представляет собой отношение теплоты сгорания полученных количеств горючего газа и биомассы к низшей теплоте сгорания биомассы. Для исследованных режимов частичной газификации биомассы коэффициент полезного действия составляет около 90%. Библ. 16, табл. 6.
Ключевые слова: биомасса, карбонизация, газификация, тепловой баланс.

Klius S., Zhovmir M., Maslyukova Z., (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv), **Demchyna V.** (Gas Institute, NAS of Ukraine, Kyiv)

Evaluation of main parameters and efficiency of partial biomass gasification in fixed bed gasifier with inverse blowing

Improved method of parameters evaluation of partial biomass gasification, compiling material and heat balances are described. Efficiency of partial gasification process is characterized by ratio of heat values of received quantities of combustible gas and biochar to the low heat value of biomass. For the studied modes of partial biomass gasification efficiency is about 90%. References 16, tables 6.

Keywords: biomass, carbonation, gasification, heat balance.

SYNOPSIS

Recent years attention of many researchers is aimed at development of new technology for solid fuels gasification,

including biomass, which is known as: partial gasification, pyrolysis, carbonization, oxidative pyrolysis, autothermal oxidative pyrolysis, partial gasification with inverse blowing and counter moving thermal wave. Technology products are coke residue (biochar) and flammable low-tar gas, whereas at classical complete gasification the combustible gas is the only target product.

Published data obtained at different regime conditions, differ by yield of gas and biochar, composition of gas, which complicate comparison the technology efficiency for fuels processing at different modes of operation. Objectively, this is because direct measurement of some variables (consumption of hot gas, resin content in gas, ultimate fuel and products composition) are technically complex and expensive. Therefore, on the basis of limited list of measured values it is necessary to determine the main parameters of partial fuel gasification and estimate its efficiency. Appropriate procedure is not published yet.

It is described method of main parameters calculation for partial gasification of biomass which is based on experimentally measured values of some variables and modified known method for complete gasification. It is based on material balances and thermal balance taking into account exothermic heat of biomass pyrolysis reaction.

Initial data are the ultimate fuel composition, yields of biochar, resin and condensate, the chemical composition of the generator gas. The chemical composition of gas was determined by means of gas chromatograph Agilent 6890 N. The main flammable components of gas at biomass partial gasification are hydrogen, carbon oxide, methane. In addition to methane hydrocarbons available in gas: ethane, ethylene, acetylene, propane, propylene and butane, and their total content by volume more than 30% of methane, and their contribution to the gas heat value is over 60% of methane input. Their presence increases the gas heating value up to 7.5 MJ / Nm³.

Making a carbon balance equation the yield of dry gas per 1 kg of fuel can be calculated. Making hydrogen balance the moisture in gas can be calculated, and from nitrogen balance volume of blowing air can be found. The correctness of all calculations can be checked making mass balance of substances spent and received at partial fuel gasification.

Thermal balance per 1 kg of fuel is made to check equality of the incoming energy with chemical energy of fuel and heat of fuel, air, and exothermal heat of biomass thermal decay to outgoing chemical energy and heat with biochar, resins, gas and moisture, which it contains, as well as heat loss into environment.

Based on results of the heat balance the energy efficiency of partial gasification can be calculated as ratio of the amount of potential (chemical) energy of gas and biochar, which were obtained from 1 kg of fuel, to the lower heat value of fuel.

Results of the main parameters and efficiency calculations for two processes of partial gasification of wood pellets and birch cubes are presented. The yield of biochar from pellets comprises 21%wt, and that from birch cubes is only 12.2%wt. With birch cubes more gas generated, and this gas has higher low heat value. This may indicate that for biochar production the process implemented at partial gasification of pellets is more favorable, and for gas production – the process of partial gasification birch cubes. Despite this for the examined processes the efficiency value are almost equal and makes about 90%.

Стаття надійшла до редакції 17.03.16

Остаточна версія 21.04.16