

УДК 662.613.12:62.112

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ І МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ  
ГАЗИФІКАЦІЇ БІОМАСИ**

В. А. Колієнко

*У статті викладено результати експериментальних досліджень процесу термохімічної обробки біомаси (газифікації). Удосконалено метод математичного моделювання процесу газифікації біомаси на основі термодинамічної моделі мінімізації вільної енергії Гіббса. Отримане рішення функції Лагранжа дало можливість визначити склад генераторного газу та ефективність процесу. Здійснено перевірку точності розробленої моделі що засвідчила коректний вплив параметрів газифікації на його результат. Отримані результати роботи можуть бути використані при пошуку оптимальних умов газифікації та при розробленні установок з газифікації біомаси.*

**Ключові слова:** біомаса, газифікація, математичне моделювання, склад генераторного газу, ефективність, вільна енергія Гіббса.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ**

В. А. Колиенко

*В статье изложены результаты экспериментальных исследований процесса термохимической обработки биомассы (газификации). Усовершенствован метод математического моделирования процесса газификации биомассы на основе термодинамической модели минимизации свободной энергии Гиббса. Полученное решение функции Лагранжа дало возможность, определить состав генераторного газа и эффективность процесса. Выполнена проверка точности разработанной модели, что завершила корректное влияние параметров газификации на его результат. Полученные результаты работы могут быть использованы при поиске оптимальных условий газификации и при разработке установок по газификации биомассы.*

**Ключевые слова:** биомасса, газификация, математическое моделирование, состав генераторного газа, эффективность, свободная энергия Гиббса.

**THE RESULTS OF BIOMASS GASIFICATION EXPERIMENTAL INVESTIGATION  
AND MODELLING**

V. Koliienko

*In this article the results of experimental investigation have been stated. The method of biomass thermochemical conversion (gasification) modelling based on Gibbs free energy minimization method has been improved. The result of solving the Lagrange function made possible to estimate syngas composition and efficiency of the process. The verification of the model demonstrated proper impact of gasification parameters on modelling results. The obtained results can be used for gasification rigs designing and gasification process optimisation.*

**Keywords:** biomass, gasification, modelling, syngas composition, efficiency, Gibbs free energy.

**Вступ**

Відповідно до Енергетичної стратегії України [1] на період до 2030 року, планується зменшити витрати природного газу на 13 % та збільшити частку відновлювальних джерел енергії, в тому числі не викопних видів палива, у загальному енергетичному балансі країни. Україна має достатньо великий потенціал біомаси, яка в першу чергу складається з відходів власного сільськогосподарського комплексу та відходів лісозаготівлі. Так, у 2008 році економічний потенціал сухої біомаси в Україні оцінювався у 16 млн т у.п./рік [2], що становить близько 10 % від загального енергоспоживання України.

Однією із ефективних технологій використання біомаси є її термохімічна переробка і отримання горючого газу (синтез газу). Використання біомаси шляхом її газифікації має ряд переваг у порівнянні з прямим спалюванням, як то:

- можливість використання широкого спектру видів біомаси та горючих відходів, у тому числі з високим вмістом вологи;
- спрощений перехід з роботи існуючого паливоспалювального обладнання джерел теплоти на природний газ при диверсифікації палива, особливо в умовах необхідності впровадження «гіб-ридних» котельних і джерел теплоти на біомасі і дублюючому виді палива – природному газі [3];
- суттєве зменшення забруднення атмосфери при використанні біопалива;
- можливість підвищення ефективності використання паливоспалювального обладнання.

### Постановка проблеми

На сьогодні, установки і технологічні системи вироблення синтез газу шляхом газифікації біомаси потребують вдосконалення, як і методики прогнозування складу синтез газу та параметрів роботи обладнання.

Питання процесу газифікації досліджувались у наукових установах НАНУ України, Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, Національному університеті харчових технологій (м.Київ), Санкт Петербургском государственном политехническом университете (Росія), Royal Institute of Technology (Швеція) та ін., висвітлені в роботах таких вчених: Канторовича Б. В. [6], Лаврова Н.В. [7], Z.A. Zainal [8], Weihong Yang [9] та інших. В цих роботах висвітлені результати експериментальних досліджень газифікації твердих видів палив, але прогнозування складу синтез газу і визначення оптимальних параметрів роботи газифікаторів на біомасі досліджено недостатньо.

В цій роботі подані результати експериментальних досліджень газифікації біомаси в умовах одно факторного і багатфакторного експериментів і результати математичного моделювання процесів газифікації.

### Мета роботи

**Мета роботи** – розробити математичну модель процесу газифікації біомаси для можливості прогнозування складу генераторного газу і технологічних параметрів роботи газифікаційної установки за комплексним параметром максимальної термодинамічної ефективності. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести дослідження процесів, які відбуваються у ході газифікації біомаси в установках з киплячим шаром;
- виконати фізико-хімічний аналіз процесів газифікації, удосконалити термодинамічну модель, яка характеризує направленість процесу, скласти енергетичний баланс установок газифікації за різних умов роботи (підведення зовнішньої енергії, рециркуляції генераторного газу, продуктів згорання і енергії, різних способів дуття);
- розробити методику і виконати порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень.

### Розроблення математичної моделі та її рішення

Реальний процес газифікації залежить від багатьох факторів. Різні способи моделювання цього процесу лише враховують ті чи інші чинники. Через що їх точність залишається доволі низькою. Значна частина моделей ґрунтується на експериментальних даних або гіпотезах і є коректними лише для певних умов протікання процесу.

Серед усіх існуючих способів математичного моделювання процесу газифікації варто виокремити метод мінімізації вільної енергії Гіббса.

Метод мінімізації енергії Гіббса системи не потребує конкретизації і вибору певних реакцій газифікацій [10] і розглядає лише початкові та кінцеві продукти процесу. Через що цей метод є більш прийнятним для розгляду складних систем, в яких має місце велика кількість реакцій. Метод базується на дослідженні рівноважного стану між усіма учасниками реакцій процесу газифікації.

Суть методу полягає у використанні термодинамічного потенціалу системи зміна якого за умови її рівноваги прагне до мінімального значення [10] Запишемо загальне рівняння для визначення загального ізобарно-ізотермічного потенціалу (енергії Гіббса) системи ідеальних газів:

$$G_{\text{tot}} = \sum x_i \cdot \mu_i, \quad (1)$$

де  $G_{\text{tot}}$  – загальна енергія Гіббса системи, кДж/кмоль;  
 $\mu_i$  – хімічний потенціал і-го компонента системи, кДж/кмоль;  
 $x_i$  – кількість речовини і-го компонента системи, кмоль.

$$\mu_i = G_{fi}^0 + RT \ln P_i, \quad (2)$$

де  $P_i$  – парціальний тиск і-го компонента системи, Па;  
 $R$  – універсальна газова стала, кДж/(кмоль·°C);  
 $T$  – температура системи, К;  
 $G_{fi}^0$  – стандартна вільна енергія Гіббса формування і-го компонента, кДж/кмоль.  
 Припустивши, що тиск у камері газифікації буде рівними 1 ата властивості газів близькі до властивостей ідеального газу запишемо рівняння (2) у розгорнутому вигляді:

$$G_{\text{tot}} = \sum x_i \cdot (H_{fi}^0 - T \cdot S_i^0) + RT \sum x_i \ln \frac{x_i}{\sum x_i}, \quad (3)$$

де  $H_{fi}^0$  – ентальпія утворення і-го компонента системи, кДж/кмоль;  
 $S_i^0$  – ентропія і-го компонента системи, кДж/(кмоль·К).

Задача з визначення складу генераторного газу за умови рівноважного стану системи зводиться до пошуку такого складу за мінімального значення функції вираженої рівнянням (3) ( $G_{\text{tot}} \rightarrow \min$ ) та умови дотримання певних обмежуючих умов. Обмежуючими умовами для такого методу моделювання процесу газифікації будуть слугувати рівняння балансів мас елементів системи та енергії.

**Спрощуючі умови розгляду задачі.** Використання методу термодинамічної рівноваги передбачає ряд спрощень, основні з яких наступні:

- час проходження усіх реакцій газифікації достатній для встановлення рівноважного стану між усіма продуктами газифікації;
- всі гази що приймають участь у процесі газифікації мають властивості ідеального газу;
- складові біомаси, частка яких не перевищує 1% та зола не приймаються до уваги;
- компонентами згенерованого синтез-газу є лише  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{N}_2$ .

### Особливості розробленої моделі

1) Врахування вологи дуттьового повітря. В більшості досліджень процесу газифікації, автори не враховують вологу дуттьового повітря що подається в газогенератор посилаючись на те що її частка буде не значною. Проте кількість вологи що надходить разом з дуттьовим повітрям може досягати 7% відносно 1кг палива. Така кількість вологи матиме суттєвий вплив на ефективність процесу газифікації та має бути врахована у математичній моделі процесу газифікації.

Величина  $w_{\text{air}}$  визначається за залежністю:

$$w_{\text{air}} = d_{\text{air}} \cdot \alpha_{\text{bio}} \cdot m_{\text{bio}} \cdot (M_{\text{O}_2} + 3,76 \cdot M_{\text{N}_2}) / (M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 1000). \quad (4)$$

де  $d_{\text{air}}$  – вологовміст вологого дуттьового повітря, г/кг;  
 $\alpha_{\text{bio}}$  – коефіцієнт надлишку повітря процесу газифікації;  
 $m_{\text{bio}}$  – кількість кисню для стехіометричного спалювання 1 кмоль біомаси, кмоль.  
 $M_i$  – молекулярна маса і-го компонента, кг/кмоль.

2) Наявність неконвертованого вуглецевого залишку. В роботі [11] експериментально

доведено, що збільшення температури у процесі газифікації при збереженні решти параметрів процесу концентрація CO<sub>2</sub> зменшується на користь CO. Оскільки для утворення 1 кмоль CO потрібно удвічі менше кисню ніж для утворення 1 кмоль CO<sub>2</sub>, але однакова кількість вуглецю, можна зробити висновок, що для дотримання закону збереження маси, кисень який при цьому звільнився має увійти до складу інших компонентів газу (H<sub>2</sub>O) або залишитись у вільному вигляді (O<sub>2</sub>). Але продукти газифікації практично не містять у своєму складі вільного кисню за різних умов газифікації [11], а концентрація H<sub>2</sub>O з підвищенням температури лише зменшується на користь H<sub>2</sub>. То ж доцільно говорити про збільшення показника конверсії вуглецю при збільшенні температури проведення процесу. Також, підвищення показника конверсії вуглецю спостерігається і при збільшенні кількості вологи що надходить до реактору [12].

В запропонованій моделі кількість не газифікованого вуглецевого залишку пропонується визначати за емпіричними залежностями складеними за результатами проведених експериментальних досліджень. Отримана залежність має наступний вигляд:

$$\gamma = 1 - [0,603 \cdot (0,589 \cdot \alpha_{\text{bio}} + 0,641) \cdot (0,001 \cdot T + 0,51) \cdot (0,0003 \cdot W' + 0,963)], \quad (5)$$

де W' – загальна маса H<sub>2</sub>O приведена до 1кг сухого палива що газифікується, кг (H<sub>2</sub>O)/кг (сухої біомаси);

$\gamma$  – кількість вуглецю що не газифікувалася та залишилась у зольному залишку, кмоль.

3) Емпіричне визначення виходу вуглеводнів. Вихід таких компонентів як метан та інші вуглеводні (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) неможливо точно спрогнозувати за допомогою стехіометричної моделі. Але нехтування навіть відносно не значним виходом вуглеводневих сполук суттєво впливає на прогнозування виходу інших компонентів генераторного газу. Через те що частина гідрогену (H) та карбону (C) йде не на утворення молекул типу (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), а на утворення інших компонентів генераторного газу, це призводить до завищення концентрації горючих компонентів генераторного газу у стехіометричній моделі газифікаційного процесу. Тому в роботі запропоновано визначати вихід деяких вуглеводнів за емпіричними залежностями що складені за результатами експериментальних досліджень. Отримана залежність для мольного виходу CH<sub>4</sub> має вигляд:

$$\text{CH}_4 = 0,0678 \cdot (-0,0314 \cdot \alpha_{\text{bio}} + 0,0722) \cdot (-0,0097 \cdot T + 23,34) \cdot (0,0003 \cdot W' + 0,9626). \quad (6)$$

4) Не адіабатні умови проведення процесу. Більшість робіт розглядають процес газифікації за адіабатних умов (без втрат теплоти чи додаткових надходжень). Але за реальних умов експлуатації втрати теплоти є неминучими, та за не великої потужності газогенератору можуть суттєво впливати на його ефективність. В розробленій моделі в рівняння енергетичного балансу введені такі складові як втрати теплоти від газогенератора на додаткові надходження теплоти, що дає можливість точніше та ширше оцінювати процес газифікації.

**Рівняння масових балансів.** Як зазначалося вище, процес газифікації можна розглядати не розділяючи його на етапи а приймаючи до розгляду лише початкові та кінцеві продукти процесу. Для цього складемо загальне рівняння процесу газифікації.

Запишемо загальне рівняння процесу газифікації:

$$\text{CH}_b\text{O}_c\text{N}_d + \alpha_{\text{bio}} \cdot m_{\text{bio}} \cdot (\text{O}_2 + 3,76 \cdot \text{N}_2) + w\text{H}_2\text{O} + q \cdot V_{\text{SG}} + f \cdot (V_{\text{FG}} + (\alpha_{\text{sg}} - 1) \cdot m_{\text{sg}} \cdot (\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2)) = \quad (7)$$

$$= \gamma\text{C} + x_1\text{H}_2 + x_2\text{CO} + x_3\text{CO}_2 + x_4\text{H}_2\text{O} + x_5\text{CH}_4 + x_6\text{C}_2\text{H}_4 + x_7\text{C}_6\text{H}_6 + z\text{N}_2,$$

де  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, z$  – прогнозований вихід H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, відповідно, кмоль;

V<sub>SG</sub> – загальний вихід синтезу у процесі газифікації, кмоль;

q – коефіцієнт рециркуляції синтез-газу до газогенератору, част. од.;

m<sub>sg</sub> – кількість кисню для стехіометричного спалювання 1 кмоль синтез-газу, кмоль;

V<sub>FG</sub> – кількість прод. згоряння при стехіометричному спалюванні 1 кмоль синтез-газу, кмоль;

$w$  – загальна кількість  $H_2O$  що надходить до газогенератору, кмоль.

У загальному вигляді рівняння масового балансу для кожного  $j$ -го елемента з  $M$  елементів системи матиме вигляд:

$$\sum_{i=1}^N h_{ji} n_i^{out} + A_j^{out} = \sum_{i=1}^N h_{ji} n_i^{in} + A_j^{in}, \quad (8)$$

де  $h_{ji}$  – кількість атомів  $j$ -го елемента в  $i$ -му газовому чи рідкому компоненті системи;  
 $n_i^{in}$ ,  $n_i^{out}$  – кількість речовини  $i$ -го газового чи рідкого компоненту на вході в систему та на виході з системи, відповідно, кмоль;  
 $A_j^{in}$ ,  $A_j^{out}$  – кількість атомів  $j$ -го елемента в твердому виді що припадає на 1 кмоль біомаси що газифікується на вході в систему на виході з системи, відповідно.

**Рівняння енергетичного балансу.** Узагальнене рівняння енергетичного балансу процесу газифікації має наступний вигляд:

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{in} = \sum_{i=1}^n Q_i^{out}, \quad (9)$$

де  $Q_i^{in}$  – енергетичний потік на вході до газифікаційної установки, Вт;  
 $Q_i^{out}$  – енергетичний потік на виході з газифікаційної установки, Вт.  
 У розгорнутому вигляді рівняння (9) має вигляд:

$$H_{bio}^{in} + w_{bio} \cdot H_{w_{bio}}^{in} + w_{air} \cdot H_{w_{air}}^{in} + w_{steam} \cdot H_{w_{steam}}^{in} + \alpha_{bio} \cdot m_{bio} \cdot (H_{O_2}^{in} + 3,76 \cdot H_{N_2}^{in}) + q \cdot H_{SG}^{in} + f \cdot H_{FG}^{in} + Q_{ex} = \\ = \gamma H_C^{out} + x_1 H_{H_2}^{out} + x_2 H_{CO}^{out} + x_3 H_{CO_2}^{out} + x_4 H_{H_2O}^{out} + x_5 H_{CH_4}^{out} + x_6 H_{C_2H_4}^{out} + x_7 H_{C_6H_6}^{out} + z H_{N_2}^{out} + Q'_{ash} + Q_{loss}; \quad (10)$$

де  $H_{bio}^{in}$  – повна енергія сухої частини біомаси, кДж;  
 $H_{w_{bio}}^{in}$  – повна енергія води біомаси, кДж;  
 $H_{w_{air}}^{in}$  – повна енергія води дуттьового повітря що подається в газогенератор кДж;  
 $H_{w_{steam}}^{in}$  – повна енергія водяної пари для потреб газифікації, кДж;  
 $H_{O_2}^{in}$ ,  $H_{N_2}^{in}$  – повна енергія  $O_2$  та  $N_2$  дуттьового повітря, відповідно, кДж;  
 $H_{SG}^{in}$  – повна енергія синтез-газу що рециркулюється, кДж;  
 $H_{FG}^{in}$  – повна енергія продуктів згоряння що вводять в газогенератор, кДж;  
 $Q_{ex}$  – додаткова енергія що надходить до газогенератору від зовнішніх інших джерел, кДж;  
 $H_{C}^{out}$  – повна енергія вуглецевого залишку, кДж;  
 $H_{H_2}^{out}$ ,  $H_{CO}^{out}$ ,  $H_{CO_2}^{out}$ ,  $H_{H_2O}^{out}$ ,  $H_{CH_4}^{out}$ ,  $H_{C_2H_4}^{out}$ ,  $H_{C_6H_6}^{out}$  – повна енергія  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_6H_6$  як продуктів газифікації, відповідно, кДж;  
 $Q'_{ash}$  – втрати теплоти з золою, кДж;  
 $Q_{loss}$  – втрати теплоти у навколишнє середовище (від корпусу газогенератору), кДж.  
 Повна енергія елемента системи складається з його енергії формування та фізичної теплоти:

$$H_i = \Delta H_{fi}^0 + Q'_i, \quad (11)$$

де  $\Delta H_{fi}^0$  – стандартна ентальпія формування 1 кмоль  $i$ -го компоненту, кДж/кмоль. Стандартна ентальпія формування речовини;  
 $Q'_i$  – фізична теплота 1 кмоль  $i$ -го компоненту системи, кДж/кмоль.  
 Запишемо у загальному вигляді функцію Лагранжа що складається з визначення функції Гіббса та обмежуючих умов у загальному вигляді:

$$L = G_{tot} - \sum_{j=1}^M \lambda_j \left( \sum_{i=1}^N h_{ji} x_i^{out} + A_j^{out} - \sum_{i=1}^N h_{ji} x_i^{in} - A_j^{in} \right), \quad (12)$$

де  $L$  – функція Лагранжа системи;  
 $\lambda_j$  – множник Лагранжа при  $j$ -му елементі.

Частинні похідні по кожному компоненту генераторного газу що рівні нулю утворюють систему рівнянь (12) рішення якої дає можливість склад генераторного газу за певних умов газифікації. Оскільки мольний вихід  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  та  $\text{C}_6\text{H}_6$  визначається за емпіричними залежностями, то у систему (13) вони будуть входити як постійні значення для визначених умов газифікації.

В системі рівнянь (13) окрім змінних  $x_1, x_2, x_3, x_4$  також присутня величина вільної енергії Гіббса ( $G_{fi}^0$ ), величина якої залежить від температури. При цьому температура системи може бути визначена з загального рівняння енергетичного балансу (10) та є функцією кінцевого складу генераторного газу.

Рішення даної задачі виконуємо методом ітерацій за алгоритмом, що приведений на рис. 1.

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x_1} = RT \cdot \ln\left(\frac{x_1}{\sum x_i + z}\right) + G_{fH_2}^0 + \lambda_H(2q-2) = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} = RT \cdot \ln\left(\frac{x_2}{\sum x_i + z}\right) + G_{fCO}^0 + \lambda_C(q-1) + \lambda_O(q-1) = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial x_3} = RT \cdot \ln\left(\frac{x_3}{\sum x_i + z}\right) + G_{fCO_2}^0 + \lambda_C(q-1) + \lambda_O(2q-2) = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial x_4} = RT \cdot \ln\left(\frac{x_4}{\sum x_i + z}\right) + G_{fH_2O}^0 + \lambda_H(2q-2) + \lambda_O(q-1) = 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} 1 - \gamma + q(1 - \gamma) + f(1 - \gamma) &= x_2 + x_3 + x_5 + 2x_6 + 6x_7; \\ (b + 2w) \cdot (1 + q + f) &= 2x_1 + 2x_4 + 4x_5 + 4x_6 + 6x_7; \\ c + 2\alpha_{bio} m_{bio} + w + q(c + 2\alpha_{bio} m_{bio} + w) + f(c + 2\alpha_{bio} m_{bio} + w + 2 \cdot \alpha_{sg} \cdot m_{sg}) &= x_2 + 2x_3 + x_4. \end{aligned}$$

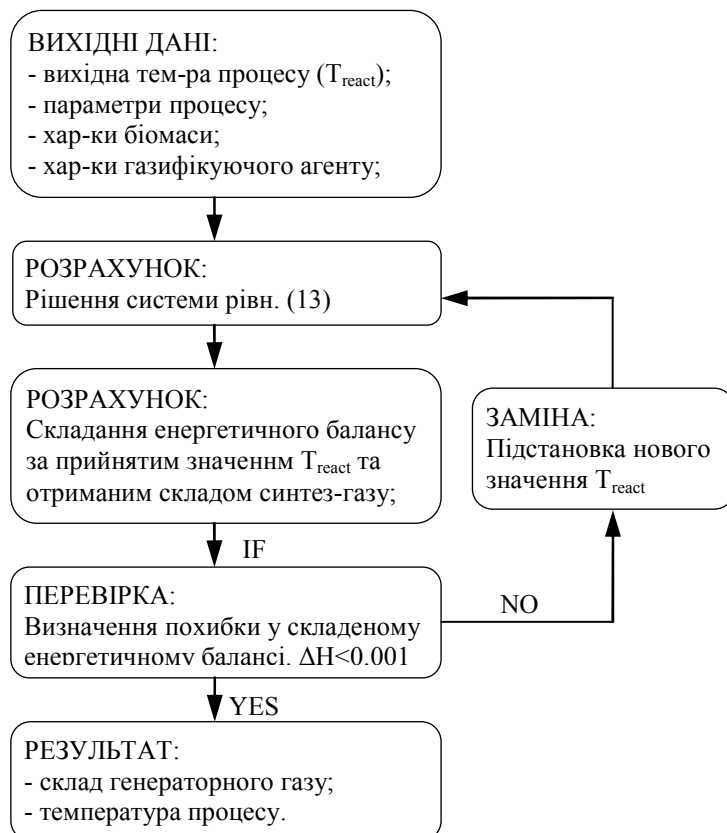


Рисунок 1 – Алгоритм рішення математичної моделі процесу газифікації біомаси

Експериментальне дослідження процесу газифікації.

З метою експериментального дослідження процесу газифікації біомаси був проведений ряд досліджень. Дослідження проводилися на базі лабораторії газифікації біомаси Королівського технологічного інституту (КТН), Швеція. Для досліджень використовувалась газифікаційна установка з газогенератором зі зрідженим киплячим шаром.

За результатами експериментальних досліджень, був складений матеріальний та енергетичний баланс газифікаційного процесу для різних умов газифікації, що дало можливість повною мірою оцінити ефективність роботи газогенератору та якість термохімічної обробки біомаси.

Після математичної обробки результатів досліджень побудовані криві, що зображені на рис. 2 – рис. 5. Лінії що відмічені літерою "S" характеризують вологість біомаси 14%, "S+" – вологість 35%.

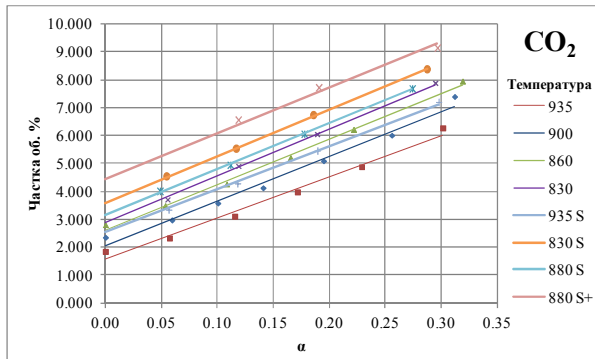


Рисунок 2 – Графіки виходу CO<sub>2</sub> у складі генераторного газу

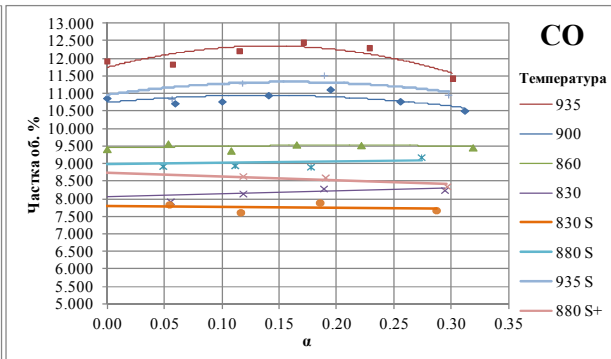


Рисунок 3 – Графіки виходу CO у складі генераторного газу

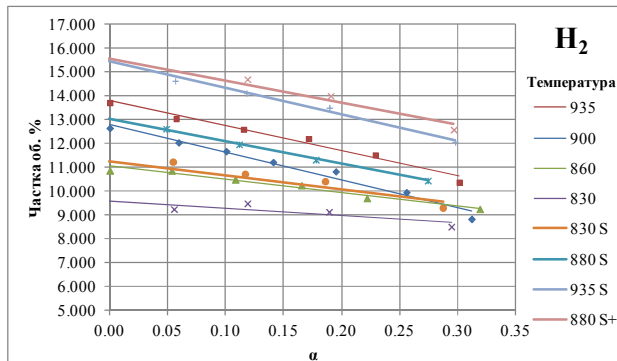


Рисунок 4 – Графіки виходу H<sub>2</sub> у складі генераторного газу

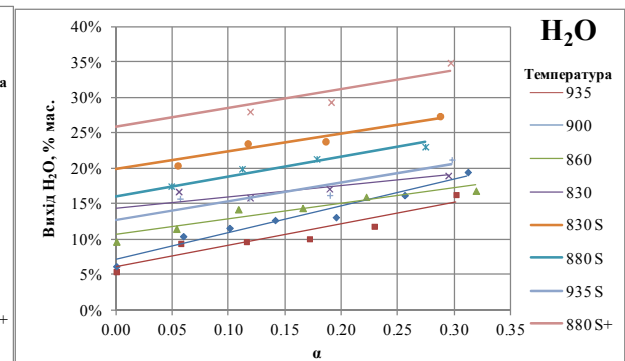


Рисунок 5 – Графіки виходу H<sub>2</sub>O у складі генераторного газу

**Перевірка точності моделювання**

Перевірка точності складеної моделі процесу газифікації була перевірена з використанням експериментальних даних дослідження процесу газифікації. Для цього були визначені коефіцієнти кореляції між результатами експерименту та моделювання за однакових крайових умов газифікації та відносна похибка отриманих даних.

Вихідні дані що прийняті для моделювання ідентичні умовам проведення експериментальних досліджень газифікації біомаси. Результати порівняння зображені на рис.6 – рис. 9.

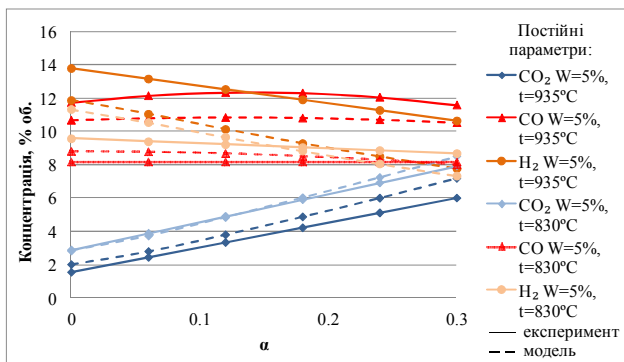


Рисунок 6 – Графіки виходу компонентів генераторного газу при змінних  $\alpha$

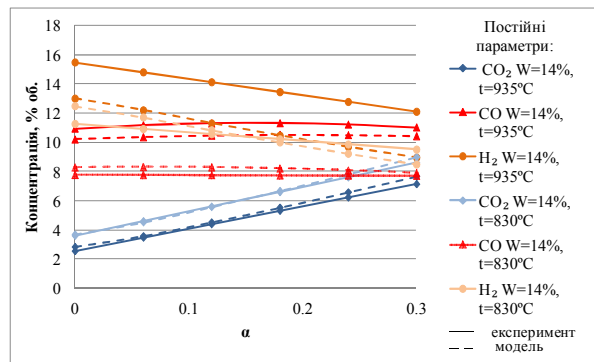


Рисунок 7 – Графіки виходу компонентів генераторного газу при змінних  $\alpha$

Аналіз отриманих результатів, показує що коефіцієнти кореляції між масивами експериментальних даних та масивами результатів моделювання для абсолютної більшості досліджень становить 0,99 і вище, і лише для деяких 0,85...0,95. Варто відзначити високу точність моделювання для низьких температур проведення процесу, відносна похибка моделювання виходу компонентів генераторного газу становить 5...10 %. Та дещо вищу похибку при високих температурах – 15...20 %. Характерним є деяке заниження виходу горючих компонентів генераторного газу за високих температур за результатами моделювання.

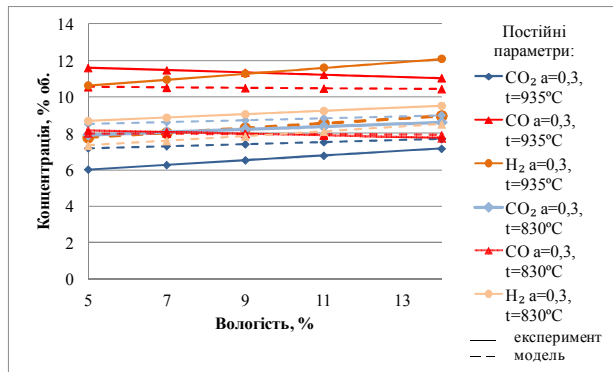


Рисунок 8 – Графіки виходу компонентів генераторного газу при змінній вологості

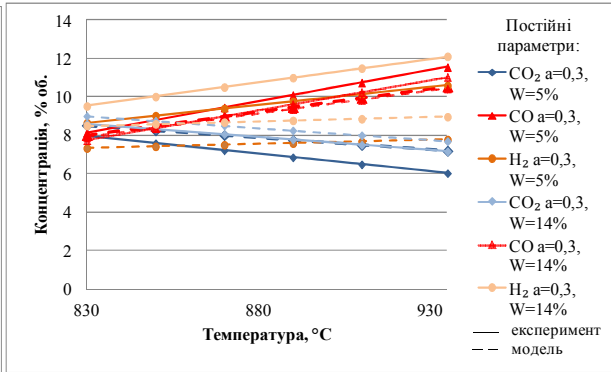


Рисунок 9 – Графіки виходу компонентів генераторного газу при змінній температурі

Така точність є достатньо високою та дозволяє об'єктивно оцінювати вплив параметрів процесу газифікації на його результат.

### Висновки

- Виконано широкий спектр одно і багатофакторних експериментальних досліджень газифікації біомаси за різних параметрів здійснення процесу. Експериментальна установка з компенсацією енергетичних втрат газогенератора і урахуванням динаміки екзотермічних реакцій окиснення горючих компонентів біомаси дала можливість дослідити відокремлений вплив окремих режимних факторів газогенератора на склад генераторного газу.
- Розроблено математичну модель процесу газифікації біомаси на основі мінімізації функції ізобарно-ізотермічного потенціалу (енергії Гіббса) для можливості прогнозування складу генераторного газу і технологічних параметрів роботи газифікаційної установки. Отримана модель дає високу достовірність об'єктивного прогнозування складу генераторного газу, температури, процесу і коефіцієнту надлишку повітря в реакційній зоні газогенератора, що добре корелює з результатами експериментальних досліджень.
- Отримані результати можуть бути використані при розробленні промислових установок газифікації біомаси.

### Використана література

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Текст]: Схвалено Кабінетом Міністрів України 24.07.2013. – Київ, 2013. – 166 с.
2. Гелетуха Г. Г. Енергетичний потенціал біомаси в Україні [Текст] / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна, М. М. Жовмір, Ю. Б. Матвеев // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2010. – Вип. 153. – С. 36-41.
3. Колиенко В. А. Оптимизация тепловой мощности котлов на биотопливе в составе комбинированных котельных централизованных систем теплоснабжения / В. А. Колиенко, А. И. Куприян // Международная научно-практическая конференция «Энергосбережение и экология в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве городов». – 2013. – С. 246-250.
4. Колиенко В. А. Экологический аспект использования синтез газа из твердого топлива и горючих отходов в жилищно-коммунальном хозяйстве / В. А. Колиенко // Международная научно-практическая конференция «Энергосбережение и экология в жилищно-коммунальном хозяйстве и строительстве городов». – 2012. – С. 346-350.
5. Алешина А. С. Моделирование процесса газификации растительной биомассы в газогенераторах кипящего слоя / С. А. Иванов, А. С. Алешина // Вестник ЗабГУ. – 2013. – № 3. – С. 78–89
6. Канторович Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива [Текст] / Б. В. Канторович. – М. : Издательство академии наук СССР, 1958. – 593 с.
7. Лавров, Н. В. Физико-химические основы горения и газификации топлива [Текст] / Н. В. Лавров. – М. : Metallurgizdat, 1957. – 288 с.
8. Zainal Z. A. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for



- different biomass materials [Text] / Z. A. Zainal, R. Ali, C. H. Lean, K. N. Seetharamu // Energy Conversion and Management. – 2001. – Iss. 42. – P.1499-1515.
9. Yang W. Performance analysis of a fixed-bed biomass gasifier using high-temperature air [Text] / W. Yang, A. Ponzio, C. Lucas, W. Blasiak // Fuel Processing Technology. – 2006. – № 87. – P. 235-245.
  10. Jarunghammachote S. Equilibrium modeling of gasification: Gibbs free energy minimization approach and its application to spouted bed and spout-fluid bed gasifiers [Text] / S. Jarunghammachote, A. Dutta // Energy Conversion and Management. – 2008. – Iss. 49. – P. 1345–1356.
  11. Li X. Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier [Текст] / X. Li, J. R. Grace, A. P. Watkinson, C. J. Lim, A. Ergudenler // Fuel. – 2001. – Vol. 80, Iss. 2. – P.195-207.
  12. Skoulou V. Syngas production from olive tree cuttings and olive kernels in a downdraft fixed-bed gasifier [Text] / V. Skoulou, A. Zabaniotou, G. Stavropoulos, G. Sakelaropoulos // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – Iss. 33. – P.1185 – 1194.
  13. Miao Q. Modeling biomass gasification in circulating fluidized beds : Model sensitivity analysis [Text] / Q. Miao, J. Zhu, Sh. Barghi, Ch. Wu, X. Yin, Zh. Zhou // International Journal of Energy and Power. – 2013. – Vol. 2, Iss. 3. – P. 57-63.

**Колієнко Володимир Анатолійович** – асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

**Колиенко Владимир Анатольевич** – ассистент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и теплоэнергетики Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка.

**Volodymyr Koliienko** – assistant of department of heat, gas supply, ventilation, heat and power engineering at Poltava national technical university Yuri Kondratyuk.