

УДК 662.7: 681.3

doi:10.20998/2413-4295.2026.01.10

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ ПРОГРАМНИХ СЕРЕДОВИЩ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ В РОЗРОБЛЕНОМУ ГАЗОГЕНЕРАТОРІ ДЛЯ ВОЛОГОГО ПАЛИВА

С. С. ЛИС\*, Ю. З. ВАШКУРАК

Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА

\*e-mail: Lysss@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Застосування сучасних програмних середовищ значно спрощує процес дослідження газифікації в розроблених газогенераторах, особливо для вологих видів палива. Завдяки комплексним можливостям моделювання, стає можливим врахування різних факторів (температури, складу палива, вологості тощо) для досягнення високої ефективності і екологічної безпеки процесу. Розглянуто особливості моделювання з використанням сучасних програмних середовищ процесу газифікації в розробленому газогенераторі для вологого палива. Проаналізовано результати моделювання, визначено ключові фактори, що впливають на продуктивність та ефективність процесу. Модель можна використовувати для прогнозування складу та властивостей синтез-газу, оптимізації параметрів процесу, розрахунку енергетичної ефективності, проектування газифікаторів. Розроблено конструкцію газогенератора, яка вигідна з експлуатаційної точки зору, оскільки газ з камери піролізу поступає через заслонки в камеру і через трубу, яка розміщена в середині корпусу газогенератора, всмоктується інжектором і подається через зону високих температур над колосниковою решіткою, через яку проходять смоли (розпадаючись на прості сполуки) та пари води, збільшуючи процентний вміст горючих газів CO та H<sub>2</sub> в синтез-газі. Використання газогенераторів для вологого палива запропонованої конструкції дозволить підвищити ефективність роботи шляхом збільшення швидкості та інтенсивності газифікації відходів деревини та вирішити проблеми промислових та побутових відходів, отримання дешевої енергії та екологічного стану довкілля. Розроблена фізико-хімічна модель дозволяє створити досить точне уявлення про процес газифікації деревини в умовах змінної вологості та різних температурних режимів. Врахування хімічних реакцій, матеріального і теплового балансів, а також кінетики реакції дає змогу оптимізувати процес для досягнення високої енергоефективності та отримання бажаного складу газу. Така модель є ефективним інструментом для вдосконалення газогенераторів і підвищення ефективності використання вологих видів палива.

**Ключові слова:** моделювання, програмне забезпечення, процес газифікації, синтез-газ, енергетична ефективність, вологе паливо, газогенератор.

## MODELING OF THE GASIFICATION PROCESS IN A DEVELOPED GASIFIER FOR WET FUEL USING MODERN SOFTWARE

S. LYS\*, Y. VASHKURAK

Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

**ABSTRACT** The use of modern software environments significantly simplifies the process of studying gasification in the developed gas generators, especially for wet fuels. Thanks to the comprehensive modeling capabilities, it becomes possible to take into account various factors (temperature, fuel composition, humidity, etc.) to achieve high efficiency and environmental safety of the process. The features of modeling the gasification process in a developed gasifier for wet fuel using modern software environments are examined. The simulation results are analyzed, and key factors influencing the performance and efficiency of the process are identified. The model can be used to predict the composition and properties of syngas, optimize process parameters, calculate energy efficiency, and design gasifiers. A gasifier design has been developed that is advantageous from an operational standpoint, as gas from the pyrolysis chamber enters through dampers into the chamber and, via a pipe located inside the gasifier body, is drawn by an injector and fed through a high-temperature zone above the grate. Through this zone, tars pass (decomposing into simpler compounds) along with water vapor, which increases the percentage of combustible gases CO and H<sub>2</sub> in the syngas. The use of gasifiers for wet fuel with the proposed design will improve efficiency by increasing the speed and intensity of gasification of wood waste, addressing industrial and household waste disposal issues, and providing low-cost energy while enhancing environmental conditions. The developed physicochemical model allows to create a fairly accurate representation of the process of wood gasification under conditions of variable humidity and different temperature regimes. Taking into account chemical reactions, material and heat balances, as well as reaction kinetics, allows to optimize the process to achieve high energy efficiency and obtain the desired gas composition. Such a model is an effective tool for improving gas generators and increasing the efficiency of using wet fuels.

**Keywords:** modeling, software, gasification process, syngas, energy efficiency, wet fuel, gasifier.

### Вступ

Сучасні тенденції у сфері енергетики вимагають пошуку ефективних методів перетворення

відновлюваних і нетрадиційних видів палива в екологічно чисті джерела енергії. Одним із перспективних методів є газифікація, яка забезпечує перетворення твердого та вологого палива в горючий

газ, що може бути використаний як паливо для двигунів, електростанцій або промислових установок [1-3].

Процес газифікації вимагає точного налаштування параметрів, особливо при використанні вологих видів палива [3,4], що значно ускладнює управління технологічним процесом. Використання сучасного програмного забезпечення для моделювання процесу газифікації дозволяє досліджувати різноманітні параметри та сценарії роботи газогенератора, зокрема, визначити оптимальні умови для ефективного протікання реакцій, регулювати тепловий баланс, мінімізувати викиди та збільшувати продуктивність установки.

Газогенераторні установки відносяться до пристроїв для термічної переробки твердого палива, безпосередньо до виробництва синтез-газу з відходів деревини, а також швидкоростучої та вживаної деревини, для подальшого використання в паливних водогрійних і парових котлів, двигунах внутрішнього згоряння, газотурбінних установках, та ін.

#### **Аналіз літературних джерел та постановка проблеми дослідження**

Останні дослідження у сфері газифікації зосереджуються на пошуку оптимальних параметрів процесу для різних типів палива, включаючи вологі види палива, такі як біомаса та органічні відходи. Моделювання процесу газифікації з використанням сучасного програмного забезпечення, як-от Aspen Plus, ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics та інших [4-12], дозволяє значно підвищити ефективність розробки газогенераторів, оскільки вони враховують складні тепло- та масообміни, а також кінетичні характеристики реакцій.

Згідно з дослідженнями, Aspen Plus широко використовується для моделювання термодинамічних аспектів газифікації [4,5]. Це програмне середовище дозволяє створювати математичні моделі процесів для оцінки теплових витрат, визначення складу продуктів газифікації та розрахунку теплових балансів. Зокрема, для вологих видів палива в Aspen Plus модель може враховувати додаткові етапи сушіння та пароутворення, що підвищує точність розрахунків.

Інше поширене ПЗ, ANSYS Fluent, використовується для моделювання динамічних характеристик реакційного середовища у газогенераторі. З допомогою CFD-методів (методів обчислювальної гідродинаміки) [6], реалізованих у ANSYS Fluent, дослідники можуть моделювати поведінку потоку газу та твердих часток, враховуючи вплив вологості на кінетику реакцій. Цей підхід особливо корисний для аналізу роботи газогенераторів, які використовують біомасу або інші типи вологого палива, де необхідно врахувати параметри випаровування води та вплив її на об'ємний склад продуктів реакції.

COMSOL Multiphysics дозволяє проводити багатофізичне моделювання, де одночасно розглядаються теплопередача, масоперенос і хімічна кінетика [7]. Це забезпечує більш комплексний підхід до моделювання процесу газифікації, дозволяючи інтегрувати усі фізичні аспекти системи. Згідно з літературними джерелами, використання COMSOL Multiphysics ефективно для розробки моделей, де високий рівень вологості палива потребує точної оцінки теплових втрат і фазових переходів.

Отже, наукові праці показують, що вологість палива є одним з головних факторів, який впливає на ефективність процесу газифікації. Деякі дослідження рекомендують проводити попереднє сушіння палива, інші ж зосереджуються на оптимізації теплового режиму всередині газогенератора для мінімізації теплових витрат на випаровування вологи. Моделювання в цьому контексті допомагає визначити, який підхід є оптимальним для конкретного типу палива, зменшуючи викиди та збільшуючи кількість корисного газу.

#### **Мета роботи**

Метою роботи є розроблення моделі процесу газифікації для прогнозування складу та властивостей синтез-газу, оптимізації параметрів процесу, розрахунку енергетичної ефективності, проектування газифікаторів та розробити газогенератор для вологого палива, в якому за рахунок нового конструктивного виконання було б досягнуте підвищення ефективності його роботи.

#### **Розроблення конструкції газогенератора для вологого палива**

Відомим є газогенератор для вологого палива [13], недоліком якого є неефективна робота, неможливість в обслуговуванні. Найбільш близьким за сукупністю технологічних ознак і конструктивним виконанням є газогенератор для вологого палива [14], проте відсутність пристрою для подачі палива у верхній частині корпусу знижує ефективність його роботи.

Тому поставлено завдання розробити газогенератор для вологого палива рис. 1 [15], в якому за рахунок нового конструктивного виконання було б досягнуте підвищення ефективності його роботи.

В газогенераторі для вологого палива рис. 1 камера піролізу містить камеру, яка з'єднана трубою з інжектором в корпусі газогенератора. Інжектор, який встановлений під колосниковою решіткою для циркуляції синтез-газу, який проходить через шар розжареного палива, дає можливість збільшити його калорійність і дає можливість газифікувати вологе паливо. Пристрій для подачі повітря, виконаний з кожухом, всередині якого встановлена труба відводу синтез-газу з верхньої частини корпусу до споживача та для зливу сконденсованих речовин. Пристрій для

подачі палива виконаний у вигляді шлюзового затвору, який дозволяє автоматично подавати необхідну кількість палива в камеру піролізу.

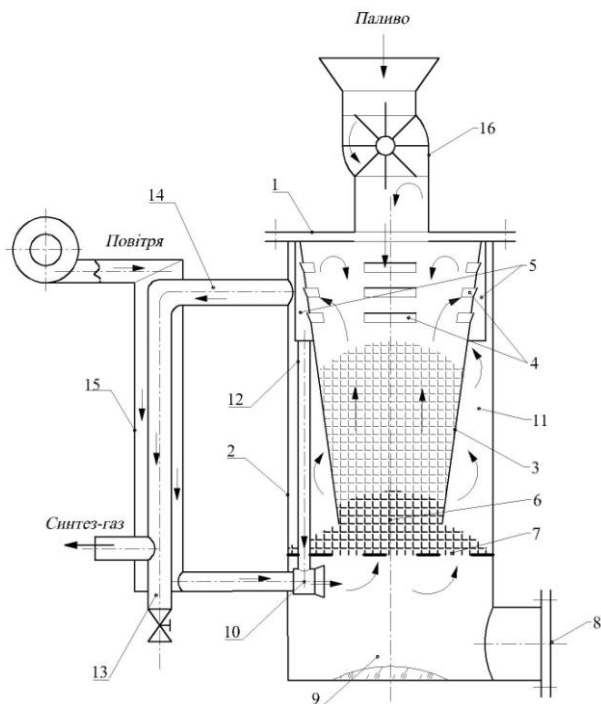


Рис. 1 – Газогенератор для вологого палива: 1 – кришка, 2 – корпус, 3 – зрізаний конус, 4 – заслонки, через які з камери піролізу поступає газ, 5 – камера, в яку поступає газ, 6 – камера піролізу, яку утворює зрізаний конус концентрично розміщений в корпусі, 7 – колосникова решітка, 8 – люк, 9 – золоуловлююча камера, 10 – інжектор, розміщений під колосниковою решіткою, 11 – камера, в яку поступає синтез-газ, повторно пройшовши через шар розжареного палива, 12 – труба, яка з'єднує камеру, в яку поступає газ, з інжектором, 13, 14 – зігнута труба на одному з кінців якої є вентиль і яка розміщена в кожусі, 15 – кожух, через який поступає повітря в середину газогенератора, 16 – пристрій для подачі палива у вигляді шлюзового затвору

Така конструкція вигідна з експлуатаційної точки зору, оскільки газ з камери піролізу поступає через заслонки в камеру і через трубу, яка розміщена в середині корпусу газогенератора, всмоктується інжектором і подається через зону високих температур над колосниковою решіткою, через яку проходять смоли (розпадаючись на прості сполуки) та пари води, збільшуючи процентний вміст CO та H<sub>2</sub> в синтез-газі. Пристрій для подачі палива виконаний у вигляді шлюзового затвору, який дозволяє автоматично подавати необхідну кількість палива в камеру піролізу. Пристрій для подачі повітря, виконаний з кожухом, всередині якого встановлена труба для відводу синтез-газу з верхньої частини корпусу до споживача та для зливу сконденсованих

речовин, що дозволяє нагрівати повітря, яке поступає в камеру піролізу, і охолоджувати синтез-газ.

### Моделювання процесу газифікації деревини

Математична модель процесу газифікації деревини

1. Основними припущеннями моделі є те, що процес розглядається в стаціонарному режимі, реактор працює в ізобарному режимі при атмосферному тиску, а температура в зоні газифікації вважається рівномірною, деревина розглядається як композиція целюлози, геміцелюлози та лігніну.

2. Матеріальний баланс  
Загальний матеріальний баланс

$$G_{вх} = G_{вих} + G_{втрат}$$

де G<sub>вх</sub> - масова витрата вхідної сировини [кг/год];

G<sub>вих</sub> - масова витрата продуктів [кг/год];

G<sub>втрат</sub> - масові втрати [кг/год].

Баланс по сухій речовині

$$M_{с.р.} = M_{дер} \times (1 - W)$$

де M<sub>с.р.</sub> - маса сухої речовини [кг];

M<sub>дер</sub> - загальна маса деревини [кг];

W - вологість деревини [частка].

3. Кінетика процесу піролізу

Швидкість розкладання компонентів деревини

$$da/dt = k_0 \times \exp(-E/RT) \times (1 - a)^n$$

де a - ступінь конверсії

k<sub>0</sub> - передекспоненційний множник [с<sup>-1</sup>];

E - енергія активації [кДж/моль];

R - газова стала [кДж/(моль×К)];

T - температура [К];

n - порядок реакції.

4. Теплові процеси

Тепловий баланс

$$Q_{вх} + Q_p = Q_{вих} + Q_{втрат}$$

де Q<sub>вх</sub> - теплота вхідних потоків [кДж/год];

Q<sub>p</sub> - теплота реакцій [кДж/год];

Q<sub>вих</sub> - теплота вихідних потоків [кДж/год];

Q<sub>втрат</sub> - теплові втрати [кДж/год].

Теплота згоряння синтез-газу

$$Q_n = \sum(x_i \times q_i)$$

де Q<sub>n</sub> - нижча теплота згоряння суміші [МДж/м<sup>3</sup>];

x<sub>i</sub> - об'ємна частка i-го компонента;

q<sub>i</sub> - нижча теплота згоряння i-го компонента [МДж/м<sup>3</sup>].

5. Склад синтез-газу

Залежність складу від температури

$$[CO] = 20 + k_1(T - 600)$$

$$[H_2] = 15 + k_2(T - 600)$$

$$[CH_4] = 5 - k_3(T - 600)$$

$$[CO_2] = 10 + k_4(T - 600)$$

$$[N_2] = 100 - ([CO] + [H_2] + [CH_4] + [CO_2])$$

де [ ] - концентрація компонента [% об.];

T - температура [°C];

k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>, k<sub>4</sub> - емпіричні коефіцієнти.

## 6. Вихід газу

Питомий вихід газу

$$V = V_0 + k_v(T - 600)$$

де  $V$  - питомий вихід газу [м<sup>3</sup>/кг];

$V_0$  - базовий вихід газу при 600°C [м<sup>3</sup>/кг];

$k_v$  - температурний коефіцієнт виходу газу [м<sup>3</sup>/(кг×°C)].

## 7. Енергетична ефективність

Коефіцієнт корисної дії процесу

$$\eta = (Q_r \times V \times M_{c.p.}) / (Q_{дер} \times M_{дер})$$

де  $\eta$  - ККД процесу;

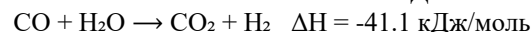
$Q_r$  - теплота згорання газу [МДж/м<sup>3</sup>];

$V$  - питомий вихід газу [м<sup>3</sup>/кг];

$Q_{дер}$  - теплота згорання деревини [МДж/кг].

## 8. Основні рівняння хімічних реакцій

Основні реакції газифікації



## 9. Обмеження моделі

- Температура процесу: 600-1200°C.
- Вологість сировини: 5-30%.
- Розмір частинок деревини: 10-50 мм.
- Час перебування в реакторі: 0.5-2.0 год.

## 10. Параметри оптимізації

Цільова функція оптимізації

$$F = w_1\eta + w_2(Q_H/Q_{H,max}) + w_3(V/V_{max}) \rightarrow \max$$

де  $w_1, w_2, w_3$  - вагові коефіцієнти;

$\eta$  - ККД процесу;

$Q_H$  - теплота згорання отриманого газу;

$V$  - вихід газу.

Частина розробленого в Python (коду)

алгоритму розрахунку процесу газифікації:

```
class WoodGasificationCalculator:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("Калькулятор газифікації деревини")

        # Вхідні параметри
        ttk.Label(main_frame, text="Вхідні параметри:").grid(row=0,
            column=0, columnspan=2, pady=5)

        # Маса деревини
        ttk.Label(main_frame, text="Маса деревини (кг):").grid(row=1,
            column=0, sticky=tk.W)
        self.wood_mass = ttk.Entry(main_frame)
        self.wood_mass.grid(row=1, column=1, padx=5, pady=2)

        # Вологість деревини
        ttk.Label(main_frame, text="Вологість деревини
            (%):").grid(row=2, column=0, sticky=tk.W)
        self.moisture = ttk.Entry(main_frame)
        self.moisture.grid(row=2, column=1, padx=5, pady=2)

        # Температура газифікації
        ttk.Label(main_frame, text="Температура газифікації
            (°C):").grid(row=3, column=0, sticky=tk.W)
        self.temperature = ttk.Entry(main_frame)
        self.temperature.grid(row=3, column=1, padx=5, pady=2)

        # Результати
        result_frame = ttk.LabelFrame(main_frame, text="Результати
            розрахунку", padding="5")
        result_frame.grid(row=5, column=0, columnspan=2, sticky=(tk.W,
            tk.E), pady=5)

        self.result_text = tk.Text(result_frame, height=12, width=50)
        self.result_text.grid(row=0, column=0, padx=5, pady=5)

    def calculate_gas_composition(self, temperature):
        """Розрахунок складу газу при заданій температурі"""
        co_percent = 20 + (temperature - 600) * 0.02
```

```
        h2_percent = 15 + (temperature - 600) * 0.015
        ch4_percent = 5 - (temperature - 600) * 0.002
        co2_percent = 10 + (temperature - 600) * 0.005
        n2_percent = 100 - (co_percent + h2_percent + ch4_percent +
            co2_percent)

        return co_percent, h2_percent, ch4_percent, co2_percent,
            n2_percent

    def calculate_heating_value(self, co, h2, ch4):
        """Розрахунок нижчої теплоти згорання (МДж/м³)"""
        # Використовуємо стандартні значення теплоти згорання
        # компонентів (МДж/м³)
        co_heat = 12.64
        h2_heat = 10.79
        ch4_heat = 35.88

        return (co/100 * co_heat + h2/100 * h2_heat + ch4/100 *
            ch4_heat)

    def calculate(self):
        try:
            # Отримання вхідних даних
            wood_mass = float(self.wood_mass.get())
            moisture = float(self.moisture.get())
            temperature = float(self.temperature.get())

            # Перевірка валідності даних
            if moisture < 0 or moisture > 100:
                raise ValueError("Вологість повинна бути між 0 та
                    100%")

            if temperature < 600 or temperature > 1200:
                raise ValueError("Температура повинна бути між 600 та
                    1200°C")

            # Розрахунки
            dry_mass = wood_mass * (1 - moisture/100)
            water_mass = wood_mass * (moisture/100)

            # Склад газу
            co, h2, ch4, co2, n2 =
                self.calculate_gas_composition(temperature)

            # Теплота згорання
            heating_value = self.calculate_heating_value(co, h2, ch4)
            # Вихід газу
            gas_yield = 1.2 + (temperature - 600) * 0.001
            total_gas = gas_yield * dry_mass

            # Загальна теплова потужність
            total_heat = heating_value * total_gas
```

Калькулятор газифікації деревини

Рис. 2 – Розроблена програма для розрахунку процесу газифікації на основі представленого алгоритму (коду)

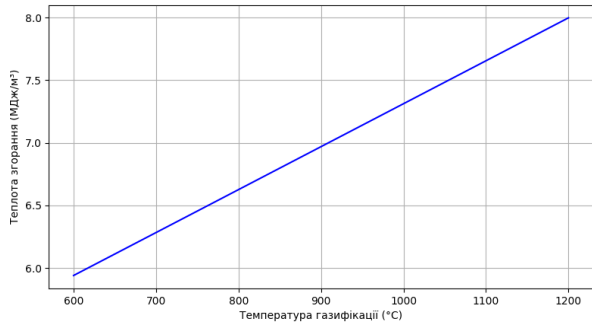


Рис. 3 – Розрахункова крива залежності нижчої теплоти згорання від температури

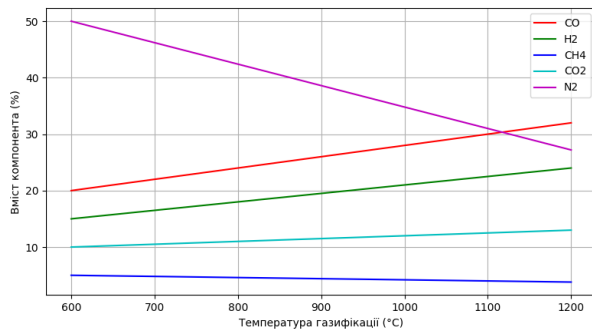


Рис. 4 – Розрахункові криві залежності складу синтез-газу від температури

*Фізико-хімічна модель процесу газифікації*

Фізико-хімічна модель процесу газифікації деревини враховує:

1. Основні хімічні реакції:

- Піроліз деревини
- Горіння вугілля
- Парова газифікація
- Реакція Будуара

2. Матеріальний баланс:

- Зміна маси твердої фази (деревина, вугілля)
- Зміна концентрацій компонентів газової фази

(O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)

- Врахування вологості матеріалу

3. Тепловий баланс:

- Теплові ефекти всіх реакцій
- Теплоємності компонентів
- Загальний тепловий потік

4. Кінетику процесу:

- Константи швидкості реакцій за рівнянням

Арреніуса

- Енергії активації
- Предекспоненційні множники

Частина розробленого в Python (коду) алгоритму фізико-хімічної моделі процесу газифікації:

```
class WoodGasificationModel:
    def __init__(self):
        # Константи для розрахунків
        self.R = 8.314 # Універсальна газова стала, Дж/(моль·К)

        # Теплофізичні властивості
        self.cp_wood = 1500 # Питома теплоємність деревини, Дж/(кг·К)
        self.cp_char = 1100 # Питома теплоємність вугілля, Дж/(кг·К)
```

```
self.cp_gas = 1200 # Середня питома теплоємність газу, Дж/(кг·К)

# Теплоти реакцій (кДж/моль)
self.dH_pyrolysis = 200 # Теплота піролізу
self.dH_combustion = -400 # Теплота горіння вуглецю
self.dH_steam = 130 # Теплота парової газифікації
self.dH_boudouard = 170 # Теплота реакції Будуара

# Кінетичні параметри
self.A_pyrolysis = 1.2e4 # c^-1
self.E_pyrolysis = 88000 # Дж/моль
self.A_combustion = 3.3e4 # c^-1
self.E_combustion = 125000 # Дж/моль
self.A_steam = 4.4e3 # c^-1
self.E_steam = 105000 # Дж/моль
self.A_boudouard = 3.4e3 # c^-1
self.E_boudouard = 129000 # Дж/моль

def reaction_rates(self, state, t, T):
    """
    Розрахунок швидкостей реакцій
    state: [wood, char, moisture, O2, H2O, CO, CO2, H2, CH4]
    """
    wood, char, moisture, O2, H2O, CO, CO2, H2, CH4 = state

    # Розрахунок констант швидкості реакцій за рівнянням Арреніуса
    k_pyrolysis = self.A_pyrolysis * np.exp(-self.E_pyrolysis/(self.R * T))
    k_combustion = self.A_combustion * np.exp(-self.E_combustion/(self.R * T))
    k_steam = self.A_steam * np.exp(-self.E_steam/(self.R * T))
    k_boudouard = self.A_boudouard * np.exp(-self.E_boudouard/(self.R * T))

    # Швидкості основних реакцій
    r_pyrolysis = k_pyrolysis * wood # Піроліз деревини
    r_combustion = k_combustion * char * O2 # Горіння вугілля
    r_steam = k_steam * char * H2O # Парова газифікація
    r_boudouard = k_boudouard * char * CO2 # Реакція Будуара

    return [r_pyrolysis, r_combustion, r_steam, r_boudouard]

def mass_balance(self, state, t, T):
    """
    Розрахунок матеріального балансу
    """
    rates = self.reaction_rates(state, t, T)
    r_pyrolysis, r_combustion, r_steam, r_boudouard = rates

    # Зміна концентрацій компонентів
    dwood_dt = -r_pyrolysis
    dchar_dt = 0.3*r_pyrolysis - r_combustion - r_steam - r_boudouard
    dmoisture_dt = -0.2*r_pyrolysis
    dO2_dt = -r_combustion
    dH2O_dt = -r_steam + 0.2*r_pyrolysis
    dCO_dt = r_combustion + r_steam + 2*r_boudouard
    dCO2_dt = r_combustion - r_boudouard
    dH2_dt = r_steam + 0.1*r_pyrolysis
    dCH4_dt = 0.05*r_pyrolysis

    return [dwood_dt, dchar_dt, dmoisture_dt, dO2_dt, dH2O_dt, dCO_dt, dCO2_dt, dH2_dt, dCH4_dt]

def heat_balance(self, state, t, T):
    """
    Розрахунок теплового балансу
    """
    rates = self.reaction_rates(state, t, T)
    r_pyrolysis, r_combustion, r_steam, r_boudouard = rates

    # Теплові ефекти реакцій
    Q_pyrolysis = r_pyrolysis * self.dH_pyrolysis
    Q_combustion = r_combustion * self.dH_combustion
    Q_steam = r_steam * self.dH_steam
    Q_boudouard = r_boudouard * self.dH_boudouard

    # Сумарний тепловий ефект
    Q_total = Q_pyrolysis + Q_combustion + Q_steam + Q_boudouard

    return Q_total

def solve_model(self, initial_state, T, t_span, t_points):
    """
    Розв'язання системи рівнянь моделі
    """
    solution = odeint(self.mass_balance, initial_state, t_points, args=(T,))

    # Розрахунок теплового балансу для кожної точки часу
    Q = np.zeros(len(t_points))
    for i in range(len(t_points)):
        Q[i] = self.heat_balance(solution[i], t_points[i], T)
```

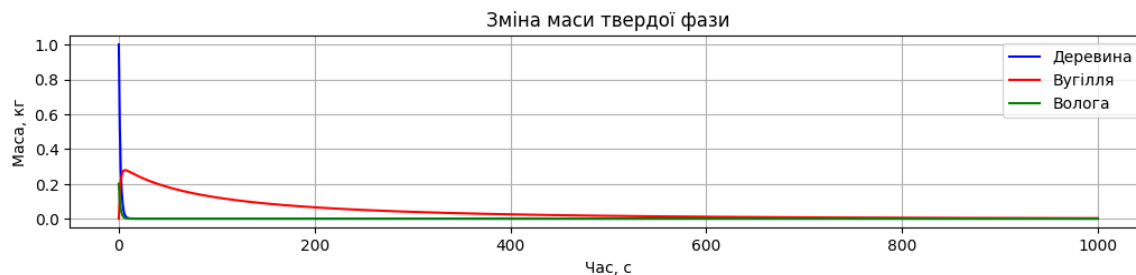


Рис. 5 – Розрахункові графіки зміни маси твердої фази на основі розробленого (коду) алгоритму фізико-хімічної моделі процесу газифікації

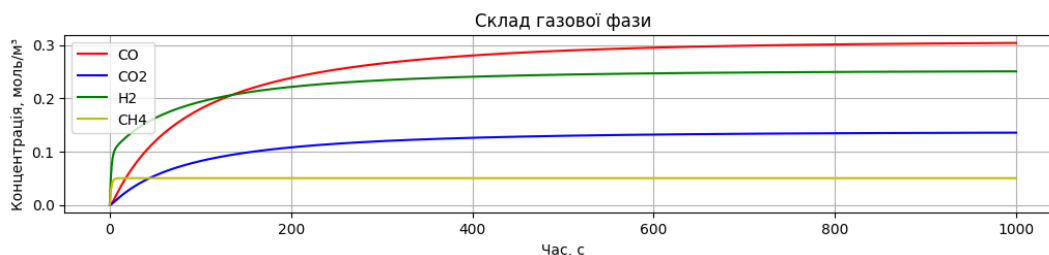


Рис. 6 – Розрахункові графіки зміни складу газової фази на основі розробленого (коду) алгоритму фізико-хімічної моделі процесу газифікації

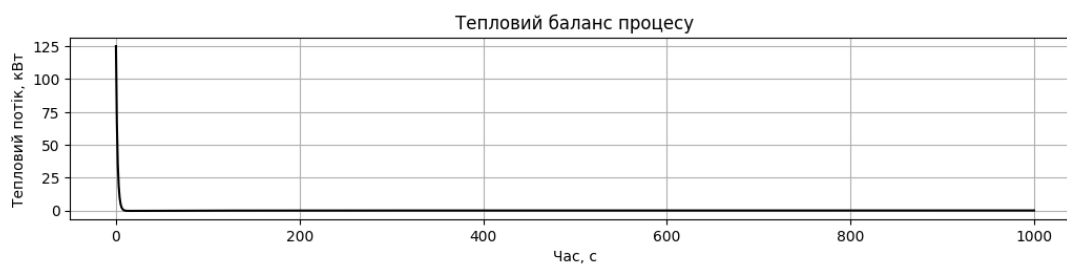


Рис. 7 – Розрахунковий графік зміни теплового балансу на основі розробленого (коду) алгоритму фізико-хімічної моделі процесу газифікації

Фізико-хімічна модель газифікації деревини є комплексною системою, що дозволяє досліджувати взаємодію хімічних, теплових та кінетичних факторів, які впливають на ефективність процесу. Розглянемо основні аспекти моделі:

#### 1. Основні хімічні реакції:

- Модель враховує всі ключові реакції: піроліз деревини, горіння вугілля, парову газифікацію та реакцію Будуара ( $\text{CO} + \text{C} \rightarrow \text{CO}_2$ ), які відповідають за утворення горючого газу.

- Піроліз є початковою стадією процесу, де відбувається термічний розклад деревини з утворенням вугілля, газів і деякої кількості смоли. У наступних етапах відбуваються горіння вугілля та парова газифікація, що забезпечує утворення основних продуктів газифікації ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ).

- Включення реакції Будуара дозволяє моделі враховувати зворотні реакції між вуглицем і продуктами газифікації, що важливо для контролю складу газової суміші.

#### 2. Матеріальний баланс:

- Модель коректно описує зміни маси твердої фази, а також динаміку концентрацій компонентів

газової фази ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), що дає змогу отримувати детальні дані про вихідний склад продуктів газифікації.

- Врахування вологості матеріалу має важливе значення, оскільки вона впливає на енергоефективність процесу та на склад продуктів. Волога потребує додаткових витрат енергії на випаровування, а також впливає на частку водяного газу в кінцевих продуктах.

#### 3. Тепловий баланс:

- Врахування теплових ефектів реакцій і теплоємностей компонентів дозволяє оцінювати загальний тепловий потік, що є критичним для забезпечення стабільного функціонування газогенератора.

- Різні хімічні реакції в процесі газифікації є як ендотермічними (парова газифікація), так і екзотермічними (горіння вугілля), і їхня збалансованість забезпечує підтримання необхідної температури.

- Включення теплового балансу дозволяє моделі адаптуватися до змін умов, таких як вологість

і подача кисню, забезпечуючи ефективність процесу навіть за змінних умов.

#### 4. Кінетика процесу:

- Константи швидкості, розраховані за рівнянням Арреніуса, дозволяють точно прогнозувати швидкість кожної хімічної реакції залежно від температури.

- Врахування енергій активації та предекспоненційних множників дозволяє моделі адаптуватися до різних умов, забезпечуючи можливість коригування швидкостей реакцій в залежності від змінних параметрів.

- Це сприяє підвищенню точності моделі і дозволяє передбачати, як зміни температури і складу сировини впливають на кінцевий вихід газів.

Дану модель можна використовувати для прогнозування складу синтез-газу, оптимізації параметрів процесу, розрахунку теплового балансу та дослідження впливу різних параметрів.

### Висновок

Аналіз літературних джерел свідчить, що застосування сучасних програмних середовищ значно спрощує процес дослідження газифікації в розроблених газогенераторах, особливо для вологих видів палива. Завдяки комплексним можливостям моделювання, стає можливим врахування різних факторів (температури, складу палива, вологості тощо) для досягнення високої ефективності і екологічної безпеки процесу.

Використання газогенераторів для вологого палива запропонованої конструкції дозволить підвищити ефективність роботи шляхом збільшення швидкості та інтенсивності газифікації відходів деревини та вирішити проблеми промислових та побутових відходів, отримання дешевої енергії та екологічного стану довкілля.

Розроблена математична модель описує процес газифікації деревини з урахуванням:

1. Матеріальних та енергетичних балансів
2. Кінетики хімічних реакцій
3. Складу отриманого синтез-газу
4. Теплових ефектів
5. Енергетичної ефективності процесу

Модель можна використовувати для прогнозування складу та властивостей синтез-газу, оптимізації параметрів процесу, розрахунку енергетичної ефективності, проектування газифікаторів.

Розроблена фізико-хімічна модель дозволяє створити досить точне уявлення про процес газифікації деревини в умовах змінної вологості та різних температурних режимів. Врахування хімічних реакцій, матеріального і теплового балансів, а також кінетики реакцій дає змогу оптимізувати процес для досягнення високої енергоефективності та отримання бажаного складу газу. Така модель є ефективним інструментом для вдосконалення газогенераторів і

підвищення ефективності використання вологих видів палива.

### Список літератури

1. Mysak Y., Lys S., Martynyak-Andrushko M. Research on gasification of low-grade fuels in a continuous layer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 2/8 (86). P. 16-23. doi:10.15587/1729-4061.2017.96995.
2. Pereira E. G., da Silva J. N., de Oliveira J. L., Machado C. S. Sustainable energy: a review of gasification technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. 16(7). P. 4753-4762. doi:10.1016/j.rser.2012.04.023.
3. Lys S., Yurasova O., Vashkurak Y. Influence of Humidity of Wood Fuel on the Gasification Process in a Continuous Layer. In: *Blikharskyi Z. (eds) Proceedings of EcoComfort 2020. EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol 100. Springer, Cham. P. 268-276. doi:10.1007/978-3-030-57340-9\_33.
4. Aspen Plus® Documentation. *Aspen Technology Inc*.
5. Guo Z., Wu Y., & Zhang Y. Simulation and Optimization of Biomass Gasification Process Using Aspen Plus: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. 135. P. 110315.
6. Javed M. S., Irfan M. F., Usman M. CFD Simulation of Fluidized Bed Biomass Gasification: Effects of Operating Parameters on Producer Gas Composition. *Journal of Cleaner Production*. 2021. 280. P. 124365.
7. Kumar S., Pathak H. Comprehensive Analysis of Wet Biomass Gasification in a Fluidized Bed Gasifier Using COMSOL Multiphysics. *Fuel Processing Technology*. 2022. 229. P. 107106.
8. Muthukumar P., Renganathan P., Pitchandi K. Modeling and Simulation of Biomass Gasification in Downdraft Gasifier: A Comprehensive Review. *Renewable Energy*. 2022. 180. P. 292-312.
9. Gómez-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. 36(4). P. 444-509.
10. Kumar A., Jones D. D., Hanna M. A. Thermochemical biomass gasification: a review of the current status of the technology. *Energies*. 2009. 2(3). P. 556-581. doi:10.3390/en20300556.
11. Giltrap D. L., McKibbin R., Barnes G. R. A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier. *Solar Energy*. 2003. 74(1). P. 85-91.
12. Sikarwar V. S., Zhao M. Recent Advances in Modeling of Biomass and Waste Gasification: Insights into Reactor Designs and Operating Conditions. *Energy Conversion and Management*. 2023. 267. P. 115903.
13. Патент України на корисну модель № 23573, МКП С10J 3/00. Газогенератор для вологого палива / Ключ В.П., Ключ С.В.; Опубл. 25.05.2007, Бюл. № 7.
14. Патент України на корисну модель № 50488, МКП С10J 3/00. Газогенератор для вологого палива / Гнатишин Я.М., Лис С.С.; Опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.
15. Патент України на корисну модель № 154569, МКП С10J 3/00. Газогенератор для вологого палива / Лис С.С., Вашкурак Ю.3.; Опубл. 22.11.2023, Бюл. № 47.

### References (transliterated)

1. Mysak Y., Lys S., Martynyak-Andrushko M. Research on gasification of low-grade fuels in a continuous layer.

- Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 2/8 (86), pp. 16-23, doi:10.15587/1729-4061.2017.96995.
- Pereira E. G., da Silva J. N., de Oliveira J. L., Machado C. S. Sustainable energy: a review of gasification technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(7), pp. 4753-4762, doi:10.1016/j.rser.2012.04.023.
  - Lys S., Yurasova O., Vashkurak Y. Influence of Humidity of Wood Fuel on the Gasification Process in a Continuous Layer. In: *Blikharsky Z. (eds) Proceedings of EcoComfort 2020. EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, vol 100. Springer, Cham, pp. 268-276, doi:10.1007/978-3-030-57340-9\_33.
  - Aspen Plus® Documentation. *Aspen Technology Inc.*
  - Guo Z., Wu Y., Zhang Y. Simulation and Optimization of Biomass Gasification Process Using Aspen Plus: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135, pp. 110315.
  - Javed M. S., Irfan M. F., Usman M. CFD Simulation of Fluidized Bed Biomass Gasification: Effects of Operating Parameters on Producer Gas Composition. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280, pp. 124365.
  - Kumar S., Pathak H. Comprehensive Analysis of Wet Biomass Gasification in a Fluidized Bed Gasifier Using COMSOL Multiphysics. *Fuel Processing Technology*, 2022, 229, pp. 107106.
  - Muthukumar P., Renganathan P., Pitchandi K. Modeling and Simulation of Biomass Gasification in Downdraft Gasifier: A Comprehensive Review. *Renewable Energy*, 2022, 180, pp. 292-312.
  - Gómez-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(4), pp. 444-509.
  - Kumar A., Jones D. D., Hanna M. A. Thermochemical biomass gasification: a review of the current status of the technology. *Energies*, 2009, 2(3), pp. 556-581, doi:10.3390/en20300556.
  - Giltrap D. L., McKibbin R., Barnes G. R. A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier. *Solar Energy*, 2003, 74(1), pp. 85-91.
  - Sikarwar V. S., Zhao M. Recent Advances in Modeling of Biomass and Waste Gasification: Insights into Reactor Designs and Operating Conditions. *Energy Conversion and Management*, 2023, 267, pp. 115903.
  - Klius V. P., Klius S. V. Gasifier for Wet Fuel. Patent of Ukraine No. 23573, IPC C10J 3/00, published on 25.05.2007, Bulletin No.7.
  - Hnatyshyn Y. M., Lys S. S. Gasifier for Wet Fuel. Patent of Ukraine No. 50488, IPC C10J 3/00, published on 10.06.2010, Bulletin No.11.
  - Lys S. S., Vashkurak Yu. Z. Gasifier for Wet Fuel. Patent of Ukraine No. 154569, IPC C10J 3/00. Published on 22.11.2023, Bulletin No.47.

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Лис Степан Степанович** – кандидат технічних наук, доцент; Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, тел.: (032) 258-23-15; ORCID: 0000-0002-7359-1177; e-mail: lysss@ukr.net

**Stepan Lys** – Assoc. Prof., Ph.D., Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, Tel. 0038 032 258 25 15; ORCID: 0000-0002-7359-1177; e-mail: lysss@ukr.net

**Вашкурар Юрій Зіновійович** – кандидат технічних наук, доцент; Інститут комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, тел.: (032) 258-23-15; ORCID: 0000-0002-2554-8131; e-mail: yurii.z.vashkurak@lpnu.ua

**Yurii Vashkurak** – Assoc. Prof., Ph.D., Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, Tel. 0038 032 258 25 15; ORCID: 0000-0002-2554-8131; e-mail: yurii.z.vashkurak@lpnu.ua

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Лис С. С., Вашкурар Ю. З. Моделювання за допомогою сучасних програмних середовищ процесу газифікації в розробленому газогенераторі для вологого палива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 74-81. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.10.

*Please cite this article as:*

Lys S., Vashkurak Y. Modeling of the gasification process in a developed gasifier for wet fuel using modern software. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 74–81, doi:10.20998/2413-4295.2026.01.10.

*Надійшла (received) 09.02.2026  
Прийнята (accepted) 20.03.2026  
Опублікована (published) 02.04.2026*