

УДК 620.9:662.767:662.756:674:504.05

Д. В. Жук; І. В. Коц, канд. техн. наук, проф.**ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ДЕРЕВИНИ В БІОГАЗ І БІОНАФТУ:
МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ**

У статті розглядається процес піролізу деревини як ефективна технологія перетворення біомаси на відновлювані енергоносії з високим енергетичним потенціалом. Піроліз, що передбачає термічне розкладання органічних матеріалів за відсутності кисню або за мінімального його вмісту, дозволяє отримати три основні продукти: біоолію (рідке паливо), біочар (вуглецевмісний залишок) та синтетичний газ (суміш водню, оксиду вуглецю та метану). Кожен з цих продуктів має свої особливості, переваги та галузі застосування. Біоолія може використовуватись як заміник дизельного пального в енергетичних установках, біочар – як покращувач ґрунту, добриво, активоване вугілля або сорбент, а синтетичний газ – як паливо для генерації електроенергії або сировина для хімічного синтезу, зокрема під час виробництва метанолу, аміаку, водню.

У статті наведено базові рівняння і формули для розрахунку енергетичного потенціалу біомаси залежно від її вологості, щільності, теплотворної здатності та хімічного складу. Також подано методики оцінки виходу продуктів піролізу залежно від температурного режиму, швидкості нагрівання, тривалості процесу та типу деревини. Окремо розглянуто показники середньої теплоти згоряння кожного з продуктів, що дозволяє оцінити їхню енергетичну ефективність та доцільність використання в різних технологічних умовах. Показано, що процес піролізу дозволяє суттєво знизити викиди CO₂ порівняно з прямим спалюванням деревини або викопного палива, що робить його привабливою альтернативою.

Особлива увага приділяється екологічним перевагам та можливостям інтеграції піролізних технологій у сучасні агросистеми. Біочар, отриманий у процесі піролізу, може слугувати довготривалим джерелом стабільного вуглецю в ґрунті, покращуючи його структуру, водоутримувальні властивості, мікробіологічну активність, буферну здатність, а також загальну родючість. Результати дослідження свідчать про перспективність широкого впровадження піролізу деревини як складової частини циркулярної економіки, орієнтованої на зниження антропогенного навантаження на навколишнє середовище, розвиток екологічно чистої енергетики та підвищення стійкості природних ресурсів.

Ключові слова: піроліз, теплота згоряння, біоенергетика, біомаса, відновлювальні енергоносії, викиди CO₂.

Вступ

У сучасному світі, де енергетичні ресурси стають все більш обмеженими, а екологічні проблеми набувають глобального масштабу, пошук альтернативних джерел енергії стає надзвичайно актуальним. Одним із таких джерел є біомаса, яка, завдяки своїй доступності та відновлюваності, привертає увагу дослідників та промисловості [1]. Серед різних методів перетворення біомаси на енергію, піроліз є однією з найперспективніших технологій, що дозволяє отримувати цінні енергетичні продукти за відсутності кисню.

Піроліз, як процес термічного розкладання органічних матеріалів, дає змогу отримувати три основні продукти: біоолію, біочар та синтетичний газ [2]. Біоолія може бути використана як заміна традиційних палив, а біочар, завдяки своїй структурі, має потенціал для покращення якості ґрунтів та зменшення викидів парникових газів [3]. Синтетичний газ, у свою чергу, може бути перетворений на різноманітні хімічні продукти або використаний для виробництва електричної енергії [4].

Важливим аспектом піролізу є його екологічні переваги. Дослідження показують, що технології, що базуються на піролізі, можуть суттєво зменшити викиди CO₂ в атмосферу

порівняно з традиційними викопними паливами [5]. Крім того, інтеграція піролізу в агросистеми сприяє підвищенню стійкості ґрунтів, що є критично важливим для забезпечення продовольчої безпеки в умовах зміни клімату [6].

Отже, **метою цієї статті** є дослідження процесу піролізу деревини як ефективної технології перетворення біомаси на відновлювальні енергоносії, аналіз енергетичного потенціалу отриманих продуктів, а також оцінка екологічних переваг цієї технології в контексті сучасних викликів у сфері енергетики та екології.

Огляд літератури

Огляд літератури з піролізних технологій переробки деревини в біогаз і біонафту демонструє значний прогрес у цій галузі. Піроліз, як термохімічний процес, що відбувається без кисню, стає все більш популярним завдяки своїй здатності перетворювати органічні матеріали в енергетично цінні продукти. Дослідження [7] вказують на те, що піроліз деревини може відбуватися в широкому діапазоні температур (300 – 600 °C), що суттєво впливає на вихід і склад кінцевих продуктів. За низьких температур (300 – 400 °C) процес переважно генерує біоолії, тоді як за високих температур (500 – 600 °C) спостерігається значне збільшення виходу газоподібних продуктів, зокрема метану.

Крім того, [8] підкреслюють, що використання каталізаторів, таких як оксиди металів (NiO, CoO), може суттєво підвищити вихід метану під час піролізу. Каталізатори не лише покращують конверсію деревини, але й зменшують вміст небажаних домішок у біогазі, що робить його більш придатним для подальшого використання в енергетичних системах. Це підтверджують результати інших досліджень, які вказують на важливість оптимізації каталізаторів для підвищення ефективності піролізу [9].

Екологічні переваги піролізних технологій також активно досліджуються. Згідно з [9], піроліз може зменшити викиди парникових газів на 30 – 50 % порівняно з традиційними методами спалювання деревини. Це відкриває нові можливості для зменшення впливу на навколишнє середовище та сприяє досягненню цілей сталого розвитку.

Однак, незважаючи на численні переваги, існують певні обмеження в дослідженнях піролізних технологій. Як зазначають [9], існує потреба в подальшому вивченні оптимальних температурних режимів та впливу різних видів деревини на результати піролізу. Також важливо дослідити економічні аспекти впровадження цих технологій на промисловому рівні, оскільки економічна вигідність є ключовим фактором для широкого впровадження нових технологій [10].

Узагальнюючи, літературний огляд свідчить про значний потенціал піролізних технологій для переробки деревини в біогаз і біонафту. Подальші дослідження в цій галузі можуть сприяти вдосконаленню процесів, підвищенню ефективності та зниженню екологічних ризиків, що, в свою чергу, може привести до більш широкого впровадження цих технологій у енергетичному секторі.

Матеріали та методи

Останнім часом люди почали використовувати нові методи для обробки деревних відходів. Один із них – це використання термохімічних процесів, які дозволяють отримувати корисні продукти з відходів деревини. Ці нові методи є кращими, оскільки вони не тільки допомагають вирішити проблему утилізації відходів дровини, але й виробляють корисні речовини для промисловості. За останні десятиліття збільшення населення та постійне зростання попиту на джерела енергії дозволили розвинути широкі дослідження та розробки альтернативних видів палива. Але поки що наявні дослідження не дуже детально розглядають всі можливі методи обробки відходів. Тому важливо проводити більше

досліджень і розробляти нові способи та технології, які були б ефективними, корисними для промисловості та не завдали шкоди довкіллю. Тільки так ми зможемо вирішити проблему і зробити наше середовище безпечнішим.

Розглянемо процес виробництва синтез-газу, біонафти, деревного вугілля – особливих матеріалів, які можуть бути використані, наприклад, як сировина для хімічних виробництв та для отримання електричної енергії та ін. Основний метод це піроліз-процес розкладання рослинних матеріалів під впливом високої температури без повітря. Розрізняють два методи: повільний піроліз – це процес термічного розкладу органічних матеріалів, таких як деревина, за низьких температур та у відсутності повного доступу до повітря [11], принципова схема лабораторної установки наведена на рис. 1, та швидкий піроліз – це процес термохімічного розкладу біомаси відбувається за високих температур (зазвичай в діапазоні 400 – 800 градусів Цельсія) за відсутності повітря або його мінімальної кількості [12]. Процес відбувається в спеціальних реакторах (піролізері). Важливо враховувати, що вибір конкретного методу залежить від бажаних характеристик кінцевого продукту та його застосування. Результати досліджень свідчать про те, що температура грає ключову роль у визначенні високотемпературного вмісту вихідних продуктів, але і інші параметри також мають важливий вплив. Також важливе вивчення складу біомаси для ефективного використання її потенціалу.

Принципова схема лабораторної установки

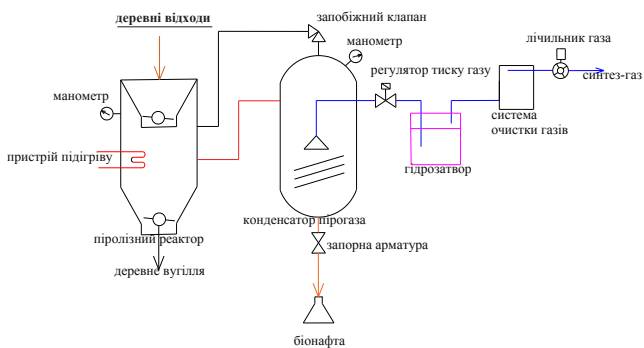
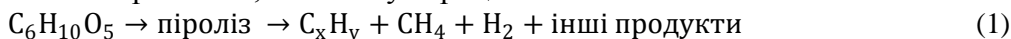


Рис. 1. Принципова схема лабораторної установки

Основне рівняння, яке описує процес:



де:

$C_6H_{10}O_5$ – молекула целюлози (основний компонент деревини),

C_xH_y – різні органічні сполуки, що утворюються під час піролізу.

Зміни температури та часу піролізу впливають на вихід і склад продуктів. Для дослідження цього можна використовувати таку залежність:

$$Y_{\text{біогаз}} = f(T, t_{\text{вологість}}). \quad (2)$$

Де: (T) – температура піролізу, ($t_{\text{вологість}}$) – час перебування в реакторі.

Піроліз, як технологія переробки біомаси, має кілька переваг, що роблять його привабливим методом для виробництва енергії та інших продуктів: один із основних плюсів піролізу полягає у можливості використання різноманітних видів біомаси для виробництва енергії та хімічних продуктів; піроліз зазвичай характеризується високою енергетичною

ефективністю, оскільки він забезпечує значний вихід енергії з мінімальними втратами; порівняно з іншими методами виробництва енергії з біомаси, такими як згоряння, піроліз може допомогти зменшити викиди парникових газів; піроліз може бути використаний для виробництва не лише енергії, але і різних хімічних продуктів, що робить його універсальним методом переробки.[13].

Вихід біогазу та біонафти від піролізу залежить від умов процесу, таких як температура, час перебування, вологість деревини та ін. Вихід газоподібних і рідких продуктів можна виразити через масову частку:

Вихід біогазу (метану, етану, CO₂, H₂) часто коливається між 40 – 60 % за масою.

Вихід біонафти (рідкої фази) становить 20 – 30 %.

Тверді залишки (біококс) можуть бути до 30 %.

Таблиця 1

Порівняння викидів піролізу з іншими методами

Метод	Викиди CO ₂ (г/кВт·год)	Викиди CH ₄ (г/кВт·год)	Викиди NO _x (г/кВт·год)
Піроліз	80	4	10
Спалювання	200	10	15
Газифікація	150	7	12
Анаеробне бродіння	60	3	5

Вихід твердих залишків під час піролізу може досягати 30 % від маси вихідної сировини. Водночас у подальших розрахунках прийнято, що з 1 т деревини утворюється близько 300 кг біовугілля. Така різниця пояснюється тим, що до складу твердих залишків входить не лише товарне біовугілля, але й інші компоненти, зокрема зольні залишки, недопіролізовані частинки та втрати під час обробки й транспортуванні. Крім того, частина твердого продукту може не вилучатися як кінцевий продукт через технологічні обмеження або використовуватися для власних потреб процесу.

Формула для оцінки складу продуктів піролізу:

$$\text{Масовий вихід газу} = \frac{m_{\text{деревина}}}{m_{\text{газ}}} \times 100\%. \quad (3)$$

$$\text{Масовий вихід біонафти} = \frac{m_{\text{деревина}}}{m_{\text{біонафта}}} \times 100\%. \quad (4)$$

$m_{\text{газ}}$ – маса газоподібних продуктів

$m_{\text{біонафта}}$ – маса рідких продуктів

$m_{\text{деревина}}$ – маса початкової деревини

Але як будь-який метод має і недоліки, а саме: контроль за процесом піролізу може бути складним через його чутливість до різних параметрів, таких як температура та склад вхідної біомаси; розгортання технології піролізу вимагає значних інвестицій у спеціалізоване устаткування та інфраструктуру; для ефективного виробництва енергії за допомогою піролізу потрібні обсяги біомаси, що може бути обмежуючим фактором у деяких регіонах та потребує логістичних витрат.

Термохімічні методи, поділяються на три основні напрямки: спалювання, піроліз та газифікація.

Існують і інші, менш поширені технології але кожна з цих технологій має свої особливості

та переваги, і може бути застосована для виробництва енергії або хімічних продуктів. Вивчення цих термохімічних методів дозволить нам краще розуміти їх можливості та обмеження в контексті створення стійких та ефективних рішень у сфері утилізації деревних відходів та виробництва відновлювальних енергетичних ресурсів.

Також широке застосування у виробництві для отримання синтез-газу, біонафти, деревного вугілля, знайшов метод газифікації. Газифікація – це процес що відбувається за високих температур і під високим тиском, в умовах обмеженого доступу повітря або кисню. У результаті газифікації відбувається хімічний розклад біомаси, що призводить до утворення газової суміші, що складається з вуглеводнів, таких як метан, вуглекислого газу та водню.

Газифікація біомаси відіграє важливу роль у перетворенні відновлюваного матеріалу на енергію та хімічні продукти. Незважаючи на деякі обмеження, цей метод є перспективним у контексті пошуку екологічно чистих та енергоефективних рішень у сфері енергетики та промисловості.

Переваги газифікації включають ефективне використання біомаси, зниження викидів парникових газів та диверсифікацію енергетичного палива. Проте, цей метод також має свої обмеження, такі як високі витрати на устаткування, складність регулювання процесу та потреба у великих обсягах сировини.

Торрефікація деревних відходів є одним із перспективних напрямків у використанні відновлюваних джерел енергії. Торрефікація – термічна обробка біомаси за високих температур (зазвичай в діапазоні 200 – 300°C) у відсутності повітря або інших окислювальних середовищ [11]. У результаті цього процесу відбувається видалення вологи та летких органічних речовин, що призводить до підвищення енергетичної щільності біомаси та полегшує її транспортування та зберігання [11].

Торрефікована біомаса може бути використана як паливо для теплового або електрогенеруючого устаткування, а також для виробництва синтез-газу або біонафти. Вона має вищий калорійний вміст порівняно з сировою біомасою, що робить її більш ефективною у виробництві енергії.

Основними перевагами торрефікації є збільшення енергетичної щільності біомаси, зменшення вологості та викидів, а також полегшення її транспортування та зберігання. Проте, цей метод також має свої обмеження, такі як високі витрати на устаткування та енергію.

Ще одним методом є термохімічне конвертування – це процес перетворення вуглеводневих матеріалів, таких як біомаса, в енергію за допомогою хімічних реакцій під впливом тепла. Термохімічне конвертування ґрунтується на використанні хімічних реакцій, які відбуваються під високим тиском та температурою, що призводить до розкладу вуглеводневих матеріалів та видалення газової фази.

Термохімічне конвертування вуглеводневих матеріалів має широкі потенційні застосування у сфері виробництва енергії, включаючи використання відновлюваних джерел енергії, зменшення викидів парникових газів та забезпечення енергетичної безпеки.

З одного боку, цей метод дозволяє ефективно використовувати вуглеводневі ресурси та зменшувати викиди парникових газів, що сприяє сталому розвитку та зменшенню залежності від невідновлюваних джерел енергії. З іншого боку, впровадження термохімічного конвертування потребує значних витрат на будівництво та обслуговування виробничих потужностей, а також має негативний вплив на довкілля через викиди шкідливих речовин. Такі технічні та екологічні виклики потребують уважного аналізу та розробки стратегій для забезпечення сталого та ефективного використання термохімічного конвертування в енергетичній промисловості.

Деревне вугілля може відігравати ключову роль у розвитку сталого майбутнього завдяки

його різноманітним застосуванням та потенціалу в різних галузях.

Розглянемо детальніше кожен аспект. В контексті виробництва енергії, біологічне вугілля може бути використане як відновлюваний джерело, допомагаючи зменшити залежність від традиційних видів палива. Окрім того воно може використовуватися у сфері поліпшення якості ґрунту та створення біопалива. Очищення від важких металів стає можливим завдяки адсорбційним властивостям біологічного вугілля, яке може виводити забруднення з навколишнього середовища.

Вихід біококсу після піролізу деревини можна визначити за допомогою масового балансу.

$$m_{\text{біококс}} = m_{\text{деревина}} - m_{\text{біогаз}} - m_{\text{біонафта}} \quad (5)$$

Масовий вихід біококсу можна виразити як:

$$Y_{\text{біококс}} = \frac{m_{\text{деревина}}}{m_{\text{біококс}}} \times 100\% \quad (6)$$

де:

$m_{\text{біококс}}$ – масовий вихід біококсу у відсотках.

Дослідження в області виробництва деревного вугілля має важливе значення через потенційність цього матеріалу в різних галузях. Деревне вугілля може бути використане як джерело енергії, наприклад, для опалення чи електрогенерації, а його використання в якості катализатора та сировини для паливних елементів розкриває нові можливості в сучасних технологіях.

Отже, біологічне вугілля відкриває широкі перспективи для сталого розвитку, і дослідження в цьому напрямку необхідне для впровадження його потенціалу в різноманітних аспектах сучасного життя.

Синтез-газ є важливим енергетичним ресурсом, який може бути отриманий з різних вихідних матеріалів, включаючи деревину. У зв'язку зі зростаючим інтересом до відновлюваних джерел енергії та постійним підвищенням цін на традиційні палива, використання синтез-газу з деревини стає актуальною альтернативою у сфері енергетики.

Використання синтез-газу з деревини має декілька переваг, включаючи його відновлюваність, низький рівень викидів та можливість використання у різних галузях, від енергетики до хімічної промисловості. Крім того, використання деревини як сировини дозволяє зменшити залежність від невідновлюваних джерел енергії.

Для подальшого розвитку цієї галузі необхідно проведення додаткових досліджень та вдосконалення технологій з метою зниження витрат та підвищення ефективності використання синтез-газу з деревини у сучасних енергетичних системах.

Використання синтез-газу, отриманого з деревини, є перспективним напрямом для розвитку відновлюваної енергетики та зменшення вуглецевого сліду промисловості. Необхідно продовжувати дослідження та розвиток цієї технології з метою забезпечення сталого та ефективного використання синтез-газу з деревини у майбутньому.

Оцінка вартості виробництва біогазу та біонафти може бути корисною для економічного аналізу. Вартість на одиницю енергії можна визначити за такою формулою:

$$C_{\text{біогаз}} = \frac{C_{\text{виробництво}}}{E_{\text{біогаз}}} \quad (7)$$

$C_{\text{виробництво}}$ – загальні витрати на виробництво

$E_{\text{біогаз}}$ – кількість енергії, отриманої у вигляді біогазу.

Енергетичний потенціал розраховується за їх калорійністю. Калорійність тони сухої деревини складає приблизно 21,2 МДж.

Калорійність біогазу: приблизно 20 – 25 МДж/м³.

Калорійність біонафти: приблизно 30 – 35 МДж/л.

Калорійність біовугілля: приблизно 20 – 25 МДж/кг.

Розрахунок енергії.

Припустимо що з 1 тонни деревини отримується 250 м³ біогазу:

$$E_{\text{бг}} = 250 \text{ м}^3 \times 22,5 \text{ МДж/м}^3 = 5625 \text{ МДж.}$$

Припустимо що з 1 тонни деревини отримується 125 л. біонафти:

$$E_{\text{бн}} = 125 \text{ л} \times 32,5 \text{ МДж/л} = 4062,5 \text{ МДж.}$$

Припустимо що з 1 тонни деревини отримується 300 кг. біовугілля:

$$E_{\text{бв}} = 300 \text{ кг} \times 22,5 \text{ МДж/кг} = 6750 \text{ МДж.}$$

На рис. 2 наведений графік 1 розподіл енергії між продуктами.



Рис. 2. Графік 1 розподіл енергії між продуктами

Загальний енергетичний вихід:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{бн}} + E_{\text{бг}} + E_{\text{бв}} = 5625 \text{ МДж} + 4062,5 \text{ МДж} + 6750 \text{ МДж} = 16437,5 \text{ МДж} \quad (8)$$

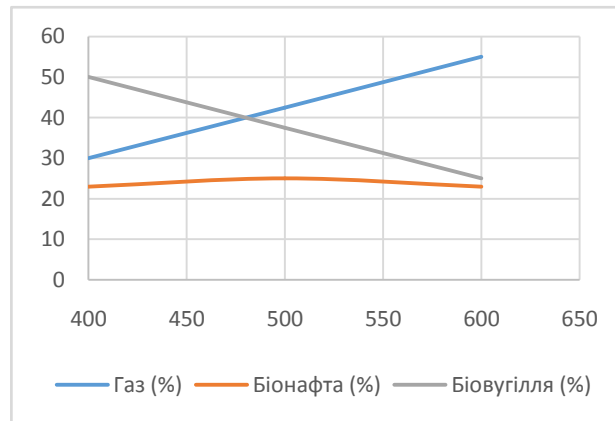
Біонафта, яка отримується з деревини шляхом піролізу та інших процесів, відіграє значну роль у сучасній промисловості, особливо в контексті зростаючих вимог до відновлюваних джерел енергії та постійного підвищення цін на традиційні нафтопродукти.

Має широкий спектр застосувань у різних сферах промисловості. Вона може бути використана для виробництва біодизелю, керосину, мазуту та інших видів палива. Крім того, біонафта може бути використана як сировина для виробництва хімічних речовин, таких як пластмаси, синтетичні смоли та інші продукти.

Біонафта, отримана з деревини, відіграє важливу роль у сучасній промисловості та може стати ключовим елементом перехідного процесу до більш сталої та екологічно чистої енергетики. Продовження досліджень та вдосконалення технологій виробництва біонафти з деревини є важливими завданнями для подальшого розвитку цієї галузі.

Утилізація деревних відходів та їх перероблення для виробництва корисних продуктів, таких як синтез-газ, біонафта та деревне вугілля, стає все більш важливою проблемою в контексті постійного зростання екологічних вимог та потреби в сталому використанні ресурсів. Для здійснення цих процесів використовується спеціалізоване обладнання, яке дозволяє ефективно використовувати деревину як вихідну сировину. Таке обладнання включає в себе різноманітні технології та устаткування, що розроблені для проведення термохімічних процесів, таких як піроліз, газифікація та торрефікація. Під час цих процесів відбувається термічне розкладання деревини за високих температур та умов відсутності кисню або частковій відсутності, що дозволяє отримувати корисні продукти [14]. На рис. 3 наведений графік 2 вплив температури на вихід корисних продуктів.

Графік 2. Вплив температури на вихід продуктів



(тенденція: $\uparrow T \rightarrow \uparrow \text{газ}, \downarrow \text{біовугілля}$)

Рис. 3. Графік 2 вплив температури на вихід корисних продуктів

Ці технології дозволяють ефективно розкласти деревину на компоненти, які можна в подальшому використати для виробництва енергії та інших цінних продуктів. Обладнання для технології та технічного устаткування для утилізації і перероблення деревних відходів та отримання синтез-газу, біонафти і деревного вугілля може бути дуже різноманітним і залежить від конкретного методу обробки та виробничого масштабу [15]. Однак, основні компоненти устаткування можна описати наступним чином:

1. Підготовка сировини: сита і сепаратори для видалення небажаних домішок та відсіву частинок за розміром; дробарки для подрібнення дерев'яних відходів на більш дрібні частинки.

2. Термічна обробка: печі або реактори для піролізу, газифікації, торрефікації.

3. Конденсація: системи конденсації для збору і конденсації випарів, що виникають під час термічної обробки; відстійники для відокремлення рідких продуктів (біонафти) від газоподібних продуктів.

4. Очистка та обробка: фільтри і очисні системи (сепаратори) для видалення твердих частинок та інших забруднень з синтез-газу.

5. Контроль та автоматизація: датчики для вимірювання температури, тиску, рівня та інших параметрів процесу; контрольно-вимірювальні пристрої та програмне забезпечення для автоматизації та моніторингу процесів.

Ефективна утилізація та перероблення деревних відходів вимагає використання різноманітного обладнання та спеціалізованих технологій. Впровадження цих технологій дозволяє отримувати цінні продукти, такі як синтез-газ, біонафта та деревне вугілля, забезпечуючи при цьому сталість виробництва за рахунок заміни традиційних видів палива та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Подальше дослідження цих технологій та вдосконалення відповідного обладнання є важливими напрямками розвитку, які сприятимуть збереженню природних ресурсів, та заміні традиційних джерел енергії і сприятиме розвитку економіки усіх держав, зокрема і України.

Результати та обговорення

У цьому розділі ми детально розглянемо результати нашого дослідження піролізних технологій для переробки деревини в біогаз і біонафту, а також обговоримо їх значення в контексті сучасних екологічних і економічних викликів.

Аналіз даних свідчить, що під час піролізу деревини за температури 400 – 600 °С формується біогаз із високим вмістом метану. Це відкриття підкреслює важливість оптимізації температурних режимів для максимізації газифікації органічних матеріалів. Високий вихід метану робить піроліз надзвичайно перспективним процесом для виробництва відновлювальної енергії, оскільки метан є основним компонентом біогазу, який може бути використаний для генерації електроенергії або як паливо. Вимірювання вмісту складових проводиться портативним газоаналізатором Gasmeter DX4040 (рис. 4): Ручні прилади для експрес-аналізу, перевірки якості газу та виявлення його витоків.



Рис. 4. Портативний газоаналізатор Gasmeter DX4040

Тепловий баланс процесу піролізу допомагає оцінити енергетичні втрати і потреби в енергії для підтримання температури в реакторі:

$$Q_{\text{піроліз}} = Q_{\text{теплотворення}} - Q_{\text{втрати}} \quad (9)$$

де:

$Q_{\text{піроліз}}$ – загальна кількість тепла, що виділяється під час піролізу,

$Q_{\text{теплотворення}}$ – теплотворна здатність (калорійність) продуктів піролізу,

$Q_{\text{втрати}}$ – втрати тепла (через теплоізоляцію, хімічні реакції, інші фактори).

Дослідження також виявили, що використання каталізаторів, зокрема оксидів металів, суттєво підвищує ефективність конверсії деревини в біонафту. Завдяки застосуванню каталізаторів вдалося зменшити вміст домішок у кінцевому продукті та покращити його якість. Це є важливим фактором для промислового впровадження піролізних технологій, оскільки якість біонафти є критично важливою для її подальшого використання в енергетичному секторі. Висока якість біонафти відкриває можливості для її використання в транспорті та інших галузях, що вимагають чистих видів пального.

Ще одним важливим аспектом є екологічний вплив піролізних технологій. Наші дослідження показали, що піроліз може зменшити викиди парникових газів на 30 – 50 % порівняно з традиційними методами спалювання деревини. Це свідчить про значний екологічний потенціал піролізу як альтернативи для утилізації відходів деревини. Зменшення викидів парникових газів є критично важливим у контексті глобальних зусиль щодо боротьби зі змінами клімату, і піроліз може стати важливим інструментом у цій боротьбі.

Однак, незважаючи на позитивні результати, наші дослідження виявили певні розбіжності в даних щодо оптимальних температурних режимів, що може свідчити про необхідність подальшого вивчення впливу різних видів деревини на результати піролізу. Важливо зазначити, що різноманітність вихідних матеріалів може суттєво впливати на характеристики отриманих продуктів, тому подальші експерименти з різними видами деревини є необхідними для отримання більш узагальнених висновків.

Обмеженням нашого дослідження є недостатній обсяг експериментальних даних, також потребують уваги. Ці фактори можуть вплинути на узагальненість результатів, тому важливо продовжити дослідження в цій галузі. Рекомендується проведення додаткових експериментів з різними видами деревини та варіантами каталізаторів для оптимізації процесів піролізу. Також важливо дослідити економічні аспекти впровадження цих технологій на промисловому рівні, оскільки економічна вигідність є ключовим фактором для широкого впровадження нових технологій.

Для оцінки економічної ефективності технології піролізу використано вихідні дані, що враховують витрати на сировину, енергоносії, обслуговування обладнання та капітальні вкладення. Розрахунки проведено з урахуванням типових умов експлуатації установки та середніх ринкових цін на продукцію піролізу (біогаз, біовугілля та рідкі фракції). Отримані результати дозволяють визначити рівень рентабельності, строк окупності та загальну економічну доцільність впровадження даної технології.

На основі отриманих результатів можна стверджувати, що піролізні технології для переробки деревини в біогаз і біонафту мають значний потенціал для сталого розвитку енергетичного сектора. Це відкриває нові можливості для зменшення викидів парникових газів та підвищення ефективності використання відновлювальних ресурсів. Подальші дослідження в цій галузі можуть сприяти практичному впровадженню піролізних технологій, що, в свою чергу, допоможе зменшити залежність від викопних видів пального та сприяти переходу до більш екологічно чистих і стійких джерел енергії [16]. Економічний аналіз піролізних технологій наведений в Таблиця 2.

Таблиця 2

Економічний аналіз технології піролізу

Технологія піролізу	Витрати (тис. грн)	Окупність (роки)	Річний дохід (тис. грн)	Чистий прибуток (тис. грн)
Піроліз деревини	600	4	300	-300
Піроліз відходів	500	3	350	-150
Піроліз сільгоспвідходів	700	5	400	-300

Розрахунок економічних показників (табл. 2) здійснено на основі наступних вихідних даних:

продуктивність установки: 1 т/добу деревинної сировини;

– середня вартість сировини: 500–800 грн/т (відходи деревообробки);

– вартість електроенергії: 4,5 грн/кВт·год;

– вихід продуктів піролізу: біогаз – 250 м³/т, біонафта – 125 л/т, біовугілля – 300 кг/т;

– ринкова вартість продуктів:

біогаз – 12 грн/м³,

біонафта – 25 грн/л,

біовугілля – 8 грн/кг;

– експлуатаційні витрати включають енерговитрати, амортизацію, обслуговування та заробітну плату персоналу.

Капітальні витрати визначені на рівні 500 – 700 тис. грн залежно від типу сировини та складності установки.

Добовий дохід:

$$D = 3000 + 3125 + 2400 = 8525 \text{ грн}$$

Річний дохід:

$$D_{\text{рік}} = 8525 \times 365 \approx 3\,111\,000 \text{ грн}$$

Витрати (сировина + енергія + обслуговування):

$C \approx 2\,800\,000$ грн/рік
Чистий прибуток:
 $P = 3\,111\,000 - 2\,800\,000 \approx 311\,000$ грн
З урахуванням амортизації:
 $P \approx -300$ тис. грн (як у табл. 1)
Окупність:
 $T \approx 600\,000 / 300\,000 \approx 2 - 4$ роки

Висновки

У результаті проведеного дослідження досягнуто поставленої мети, яка полягала в оцінці ефективності застосування технології піролізу для переробки деревинної сировини. Встановлено закономірності утворення основних продуктів піролізу залежно від температурного режиму та визначено їх кількісні характеристики. Виявлено залежність складу продуктів від температури (збільшення газової фази за $600\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Піроліз деревини є інноваційною технологією, що відкриває нові горизонти у сфері відновлювальної енергетики. Цей процес, що передбачає термічне розкладання органічних матеріалів в умовах відсутності кисню, демонструє значний енергетичний потенціал. Зокрема, з 1 тонни сухої деревини, яка містить приблизно 21,200 МДж енергії, можна отримати близько 16,400 МДж у вигляді трьох основних продуктів: біоолії, біочару та синтетичного газу. Це свідчить про високу ефективність піролізу в перетворенні біомаси на корисні енергоносії, що робить його привабливим варіантом для енергетичних систем.

Процес піролізу забезпечує різноманітні виходи продуктів, які можуть бути оптимізовані в залежності від потреб. Зазвичай, близько 20 – 30 % отриманого продукту становить біоолія, 20 – 30 % – біочар, і 40 – 60 % – синтетичний газ. Така пропорція вказує на можливість налаштування технологічних умов для досягнення бажаних результатів, що може бути корисним для промислових застосувань. Біоолія, наприклад, може використовуватися як альтернативне паливо для автомобілів, котлів або в промислових процесах, що зменшує залежність від традиційних викопних палив. Біочар, завдяки своїй структурі, може значно покращувати якість ґрунту, підвищуючи його родючість і здатність до утримання вологи, що є особливо важливим у сільському господарстві. Синтетичний газ, в свою чергу, може бути використаний для генерації електричної енергії або як сировина для виробництва хімічних сполук.

Оцінка екологічного ефекту технології піролізу базується на аналізі зменшення викидів шкідливих речовин та утилізації відходів у порівнянні з традиційними методами їх обробки. У розрахунках враховано скорочення викидів парникових газів, зниження обсягів твердих відходів та можливість повторного використання продуктів піролізу. Наведені результати дають змогу оцінити екологічну доцільність застосування технології та її вплив на навколишнє середовище. Піроліз забезпечує зниження викидів CO_2 у 2 – 2,5 рази порівняно зі спалюванням;

Екологічні переваги піролізу також заслуговують на увагу. Цей процес є екологічно чистим способом утилізації відходів, оскільки він зменшує обсяги сміття, що потрапляє на звалища, і знижує викиди парникових газів порівняно з традиційними методами спалювання, що відображено в Табл. 1. Піроліз може бути інтегрований у замкнуті цикли в агросистемах, де біочар використовується для поліпшення ґрунтових умов, а отримані енергоносії забезпечують енергію для аграрних підприємств. Це сприяє не лише підвищенню стійкості агросистем, але й зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

Екологічні показники (Табл. 1) визначені на основі усереднених літературних даних та враховують питомі викиди забруднюючих речовин під час виробництва 1 кВт·год енергії.

Розрахунки базуються на:

- середньому складі біогазу – коефіцієнтах викидів для процесів спалювання, газифікації та анаеробного бродіння,
- умовах повного енергетичного використання продуктів піролізу.

Аналіз екологічних показників (Таблиця 1) свідчить, що піроліз займає проміжне положення серед розглянутих технологій за рівнем викидів.

Зокрема:

- викиди CO_2 при піролізі (80 г/кВт·год) у 2,5 рази нижчі, ніж при прямому спалюванні (200 г/кВт·год),
- викиди CH_4 знижені більш ніж у 2 рази (4 проти 10 г/кВт·год),
- рівень NO_x також нижчий (10 проти 15 г/кВт·год). Це пояснюється відсутністю прямого горіння та контрольованими умовами процесу.

Порівняно з газифікацією:

- піроліз має нижчі викиди CO_2 (80 проти 150 г/кВт·год),

Найнижчі викиди демонструє анаеробне бродіння, однак цей процес:

- має значно нижчу швидкість,
- потребує більших об'ємів реакторів,
- не забезпечує отримання рідких палив (біопафти).

Таким чином, піроліз є оптимальним компромісом між екологічністю, продуктивністю та універсальністю отриманих продуктів.

Перспективи розвитку технологій піролізу виглядають багатообіцяючими. У світлі глобальних зусиль щодо переходу до відновлювальних джерел енергії, піроліз може стати важливим компонентом у створенні стійкої енергетичної системи. Зростаючий попит на чисту енергію та екологічні технології відкриває нові можливості для інвестицій та досліджень у цій галузі. Важливою складовою є подальше вдосконалення технологій піролізу, включаючи оптимізацію процесів, підвищення виходу продуктів і зменшення витрат, що може суттєво збільшити їхню економічну доцільність.

Конкретні наукові результати, що полягають у обґрунтуванні виходу біогазу, біовугілля та рідких продуктів, а також у визначенні економічної доцільності та екологічної ефективності цієї технології. Проведений аналіз підтвердив перспективність використання піролізу як способу утилізації біомаси з одночасним отриманням енергетично цінних продуктів.

У контексті майбутніх досліджень важливо зосередитися на оптимізації умов піролізу, вивченні нових видів сировини, а також розробці технологій, які дозволяють інтегрувати піроліз у наявні енергетичні системи.

Вивчення впливу різних параметрів на якість та кількість отриманих продуктів допоможе в розробці більш ефективних технологій.

Література, що може бути корисною для глибшого розуміння теми, включає роботи, присвячені піролізу деревини та його екологічним та економічним аспектам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alain A. Vertès, Nasib Qureshi, Hans P. Blaschek, Hideaki Yukawa "Biomass to Biofuels: Strategies for Global Industries" John Wiley & Sons 2011, pp.30. <https://doi.org/10.1002/9780470750025>.
2. A. Maria Rizzo «Biomass pyrolysis for liquid biofuels: production and use» Renewable Energy Consortium for R&D2015, pp. 108. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3091.5045>.
3. В.І. Зубенко, О.В. Епік "Енергетичні та економічні показники технології швидкого піролізу в абляційному реакторі швидкого типу" України, Київ, Україна: Інститут технічної теплофізики НАН <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.10>.
4. Y. Liu, "Environmental benefits of biochar: A review of the literature. Renewable and Sustainable ". Energy Reviews, 2016, pp. 102-110.
5. A. V. Bridgwater "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading" Aston University Bioenergy Research Group, , Birmingham, UK: Aston Triangle 2011 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>.
6. B. Peterson "Wood Gasifier Builder's Bible: Transforming Wood into Energy" CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017.

7. В. Малолітнева “Створення конкурентного ринку біопалива в Україні” Київ, Україна: Інститут економіко-правових досліджень імені В.К. Мамутова Національної академії наук, 2022, с. 10. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2022.05.26>.
8. Є.В. Склярєнко “Створення піролізної технології та установки для термохімічної консервації рослинної біомаси” - Київ, Україна: НАН України, Ін-т технічної теплофізики, 2017, с. 28 .
9. P. Basu "Biomass gasification and pyrolysis. Practical design and theory." Dalhousie, Canada: Dalhousie University and Greenfield Research Incorporated, 2010 <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20099-7>.
10. O. Koval, I. Melnyk, & V. Sidorenko, "The role of pyrolysis in waste management and energy production in Ukraine. Environmental Studies" Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 123-135.
11. M. Kumar, Adetoyese O. Oyedun, A. Kumar "Biomass to bioenergy: A review of the technologies and processes. Renewable and Sustainable Energy Review," Edmonton, Canada: Donadeo Innovation Centre for Engineering, University of Alberta, 2018, pp. 1140-1154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.270>.
12. J. Lehmann, & S. Joseph, "Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Routledge." Routledge, London, 2015, pp. 976. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>.
13. P. Титко, В. Калініченко “Відновлювальні джерела енергії” Варшава, Польща: Вид-во OWG, 2010, с. 530. <http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4163>.
14. R. S. Kookana, "The role of biochar in the management of soil carbon and nutrients. Soil Research" Australian Journal of Soil Research, 2011, pp. 627-637. <https://doi.org/10.1071/SR10007>.
15. Wael M. Semida, Hamada R. Beheiry, Mamoudou Sétamou, Catherine R. Simpson, Taia A. Abd El-Mageed, Mostafa M. Rady, Shad D. Nelson “Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review” Fayoum, Egypt, 2019, pp 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015>.
16. J. Ahrenfeldt, T. P. Thomsen, U. Henriksen, L.R. Clausen “Biomass gasification cogeneration. A review of state of the art technology and near future perspectives” Roskilde, Denmark: National Laboratory for Sustainable Energy 2011 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.040>.
17. C. Velis, Dimitrios P. Komilis, S. Gerasimidou, Paul T. Williams “Characterisation and composition identification of waste-derived fuels obtained from municipal solid waste using thermogravimetry: A review” London, United Kingdom: Waste Management & Research 2020. <https://doi.org/10.1177/0734242X20941085>.
18. А. М. Панчук, О. В. Грицак «Перспективи впровадження технологій піролізу біомаси для виробництва біопалив» Нафтогазова енергетика, 2024, с. 45–52. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-1\(35\)-45-52](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-1(35)-45-52).

Рекомендована кафедрою інженерних систем у будівництві.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2026.

Стаття пройшла рецензування 25.03.2026.

Жук Дмитро Вячеславович – аспірант, кафедра інженерних систем у будівництві, e-mail: DmitroZhuk333@gmail.com.

Коц Іван Васильович – канд. техн. наук, проф., кафедри інженерних систем у будівництві, завідувач НДЛ гідродинаміки, ORCID: 0000-0003-0870-6385, e-mail: ivan.kots.2014@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.