

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ПІРОЛІЗУ АГРАРНОЇ БІОМАСИ: ЕФЕКТИВНІСТЬ, МАСШТАБУВАННЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

Поліщук В., д-р техн. наук,

<https://orcid.org/0000-0002-9654-9051>

Єременко О., канд. техн. наук,

<https://orcid.org/0000-0002-3377-0015>

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Майданович В., канд. техн. наук,

<https://orcid.org/0009-0007-2972-6461>

ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»

Кудрявицька А., канд. с-г. наук,

<https://orcid.org/0000-0003-2888-1981>

Науменко В., аспірант,

<https://orcid.org/0009-0004-4932-8231>

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація

Мета досліджень полягає у комплексному обґрунтуванні техніко-технологічних параметрів виробництва біовугілля з відходів сільського господарства шляхом застосування різних видів піролізу для його подальшого багатовекторного використання як ґрунтового меліоранта та сировини для екологічного палива.

Методологія досліджень базується на порівняльному інженерному аналізі технологій карбонізації, повільного та швидкого піролізу, а також на оцінюванні конструктивних параметрів відповідних реакторних установок і додаткового обладнання для механічної переробки залишків вуглецевої продукції з урахуванням вимог безпеки праці, режимів, швидкості нагрівання та апаратурного оформлення.

Результати. Встановлено, що процеси термохімічної конверсії рослинної біомаси суттєво різняться за виходом цільових продуктів залежно від температурних умов. Результати інженерного аналізу свідчать, що найбільший вихід твердого вуглецевого залишку (від 20 до 35 % від початкової маси сухої сировини) забезпечується технологіями повільного піролізу та класичної карбонізації. У ході роботи детально розглянуто конструктивні особливості та принципи функціонування абляційних (пластинчастих і конусних), трубчастих та плазмових реакторів. З'ясовано, що для потреб аграрного сектору найбільш доцільним є впровадження установок повільного піролізу (450–700 °C), які дають змогу отримувати стабільну тверду фракцію. Обґрунтовано інженерне рішення щодо розділення отриманого продукту: середньофракційне біовугілля спрямовується на потреби меліорації деградованих ґрунтів і довгострокової секвестрації вуглецю, тоді як дрібнодисперсний відсів пропонується піддавати пресуванню для виготовлення паливних брикетів. Доведено, що такі брикети за своїми фізико-хімічними властивостями є високоефективним заміном деревного вугілля і мають значний комерційний потенціал для впровадження в індустрії гостинності, ресторанному бізнесі та рекреаційному туризмі.

Висновки підтверджують, що масштабування технологій піролізу на рівні фермерських господарств забезпечує ефективну утилізацію аграрних залишків і виробництво високоякісних ґрунтових меліорантів. Таке біовугілля сприяє відновленню деградованих ґрунтів, покращує їх вологоутримувальну здатність і забезпечує довгострокову секвестрацію вуглецю, відповідаючи вимогам кліматично-орієнтованого сільського господарства та створюючи можливості для залу-

чення фінансування через вуглецеві ринки. Практична значущість роботи полягає в диверсифікації доходів фермерських господарств шляхом поєднання кліматично-орієнтованого землеробства та генерації відновлюваної енергії за дотримання норм охорони праці.

Ключові слова: біовугілля, піроліз біомаси, агроінженерія, реактори піролізні, ґрунтові меліоранти, секвестрація вуглецю, сільськогосподарські відходи, безпека праці та життєдіяльності, паливні брикети для галузі гостинності.

Вступ. Сучасний розвиток агропромислового комплексу стикається з безпрецедентними викликами, зумовленими глобальними кліматичними змінами та прогресуючою деградацією сільськогосподарських угідь. Зростання середньорічних температур, зміна режиму опадів та інтенсифікація землеробства призводять до критичного зниження вмісту органічної речовини в ґрунтах України [Belis et al., 2025; Depletion of Ukraine's Soils..., 2025]. Водночас щороку генеруються мільйони тон побічної продукції рослинництва (стебла соняшнику, кукурудзиння, солома), яка часто залишається на полях або неефективно утилізується. У цьому контексті переробку аграрних залишків на біовугілля за допомогою термохімічної конверсії розглядають як інноваційний інструмент [Yrjälä, Ramakrishnan & Salo, 2022; Li et al., 2023], що дає змогу не лише раціонально управляти відходами, а й забезпечувати довгострокову секвестрацію вуглецю, пом'якшуючи наслідки кліматичних змін [Wijitkosum, 2022].

Попри значний інтерес до властивостей біовугілля як ґрунтового меліоранта [James et al., 2022; Кароог et al., 2022], інженерне забезпечення його виробництва залишається недостатньо опрацьованим для широкого впровадження у вітчизняному аграрному секторі. Більшість існуючих технологічних рішень розроблялися переважно для лісової галузі або промислової енергетики [Panchuk et al., 2024]. Відтак, виникає нагальна потреба в адаптації та оптимізації піролізного обладнання під специфіку сільськогосподарської біомаси, яка характеризується меншою щільністю, підвищеною зольністю та мінливою вологістю.

Невирішеними раніше частинами за-

гальної проблеми є відсутність комплексного порівняльного аналізу конструкцій сучасних реакторів (абляційних, плазмових, трубчастих) саме з позицій їх енергоефективності, продуктивності та доцільності масштабування на базі фермерських господарств. Вирішення цієї інженерної проблеми відкриє шлях до створення замкнутих циклів виробництва, де підприємства зможуть самостійно генерувати меліоранти для відновлення деградованих земель, одночасно отримуючи додатковий дохід від участі в програмах сертифікації вуглецевих кредитів (наприклад, Puro.earth або Verra).

Крім прямого агрономічного ефекту, переробка аграрних залишків відкриває шлях до створення циркулярних економічних моделей на селі. Зокрема, надлишкові обсяги або некондиційна для ґрунту дрібна фракція біовугілля може бути піддана брикетуванню з метою подальшої комерціалізації як високоякісного та екологічного палива для галузі гостинності (ресторанний бізнес, бази зеленого туризму) [Rostocki et al., 2022; Oyebamiji et al., 2025]. Це дає змогу агропідприємствам диверсифікувати джерела прибутку, скорочуючи термін окупності інженерного обладнання.

Постановка проблеми та завдань дослідження зумовлена гострою необхідністю створення ефективного техніко-технологічного підґрунтя для переробки побічної сільськогосподарської продукції на біовугілля. Головною мотивацією цієї роботи є прагнення забезпечити аграрний сектор надійними інженерними рішеннями, які сприятимуть відновленню деградованих ґрунтів та розвитку ринку вуглецевих одиниць в Україні.

Мета дослідження полягає у комплекс-

сному обґрунтуванні техніко-технологічних параметрів виробництва біовугілля з відходів сільського господарства шляхом порівняльного аналізу різних типів піролізних реакторів для подальшого використання продукту як ґрунтового меліоранта.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання:

- провести класифікацію та системний аналіз існуючих технологій термічного піролізу (повільного, швидкого, карбонізації) з огляду на їх придатність для переробки стебел соняшнику та кукурудзиння;

- дослідити конструктивні особливості та принцип роботи сучасних реакторів (абляційних, плазмових, трубчастих) у контексті забезпечення максимального виходу якісного твердого вуглецевого продукту;

- порівняти ефективність різних типів реакторів за критеріями виходу цільових речовин, загальної енергоемності процесу та їх технологічної надійності;

- визначити оптимальні апаратурні рішення для масштабування виробництва біовугілля безпосередньо на базі фермерських господарств і великих сучасних агрохолдингів.

Вирішення цих завдань дасть змогу сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо інженерного забезпечення процесів термохімічної конверсії аграрної біомаси, що є критично важливим для інтеграції принципів циркулярної економіки у повсякденну практику розумного землекористування в умовах глобальних кліматичних змін довкілля.

Методи і матеріали. Методологічна база дослідження ґрунтується на системному підході до інженерного аналізу технологій термохімічної конверсії біомаси. Основним об'єктом дослідження виступають процеси піролізу (сухої перегонки), які визначаються як процеси термічного розкладання органічного палива без доступу повітря з утворенням газоподібних, рідких та твердих продуктів. У фокусі уваги перебуває переробка типових для аграрного сектору відходів, таких як сте-

бла соняшнику, кукурудзи тощо, що вимагає специфічного технологічного підходу через їх унікальні фізико-механічні властивості.

Порівняльний аналіз здійснювали за такими основними критеріями, адаптованими для інженерних потреб агровиробництва:

- вихід цільового продукту (біовугілля) у відсотках від маси сухої сировини;

- енергоемність та тривалість процесу (від кількох секунд у швидкому піролізі до кількох днів у карбонізації);

- апаратурна складність, пожежна безпека, санітарно-гігієнічні умови праці операторів та надійність реакторів під час експлуатації в польових умовах;

- можливість автономної роботи установки за рахунок рециркуляції утворених піролізних газів.

Сучасні технології піролізу за швидкістю нагрівання класифіковані на карбонізацію, повільний та швидкий піроліз. Дослідження охоплювало аналіз температурних режимів, де швидкий піроліз додатково поділявся на низькотемпературний (450–600 °C) та високотемпературний (650–900 °C). Для проведення ґрунтового аналізу було розглянуто конструктивні та технологічні схеми абляційних (пластинчастих і конусних), трубчастих і плазмових реакторів. Оцінювання їх роботи базувалося на кінетичних закономірностях процесів тепломасообміну, швидкості нагрівання сировини та ефективності конденсації продуктів реакції.

Варто зазначити, що представлений інженерний аналіз базується здебільшого на теоретичних розрахунках, технічних специфікаціях обладнання та узагальненні результатів пілотних випробувань. Обмеженням є відсутність тривалих (понад 5–7 років) емпіричних даних щодо амортизації складних конструкцій (наприклад, плазмових реакторів) винятково на аграрній сировині зі змінною вологістю (понад 20 %). Крім того, фізико-хімічні властивості отриманого біовугілля можуть значно варіювати залежно від фракційного складу сировини, що потребує додаткових

Таблиця 1 – Характеристики основних технологій піролізу

Характеристики	Технологія піролізу			
	швидкий піроліз, низькі температури	швидкий піроліз, високі температури	повільний піроліз	карбонізація
Час процесу	до 1с	до 1 с	5–30 хв.	год, дні
Розмір сировини	малий (подрібнена січка, <6 мм)	малий (подрібнена січка, <6 мм)	середній (пелети, брикети, січка)	великий (тюки, цілі стебла)
Вологість сировини*	дуже низька (<10%)	дуже низька (<10%)	низька (10–15%)	середня (до 20–25%)
Температура, °C	450–600	650–900	500–700	400–600
Тиск, кПа	~100	10-100	~100	~100
Газ				
Вихід, % маси сухої сировини	до 30	до 70	до 45	до 45
Теплота згорання, МДж/м³	10–20	10–20	5-10	2–4
Рідина				
Вихід, % маси сухої сировини	до 75–80	до 20	до 30	до 20
Теплота згорання, МДж/кг	20–23	20–23	20–23	~20
Тверда речовина				
Вихід, % маси сухої сировини	до 10–15	до 15–20	20–25	20–30
Теплота згорання, МДж/кг	20–24	20–24	20–24	20–24

* Аграрні залишки після збирання часто мають вологість вище 20 %, тому перед завантаженням в установки повільного та швидкого піролізу вимагають обов'язкового етапу попереднього сушіння.

калібрувань обладнання безпосередньо у виробничих умовах господарств.

Результати. Результати досліджень інженерних особливостей піролізних реакторів вказують на суттєву диференціацію у виході продуктів термохімічної переробки аграрної біомаси залежно від обраної технології. Біовугілля як твердий вуглецевий продукт процесу має теплоту згорання 31,5–34,4 МДж/кг, а його максимальний вихід, що може сягати 30–35 % маси сухої сировини, забезпечується винятково під час карбонізації та повільного піролізу (табл. 1). Загалом процес піролізу для аграрної сировини відбувається за відносно низьких температур (500–800 °C) порівняно з газифікацією чи горінням.

Аналіз інженерно-технологічних па-

раметрів термохімічної конверсії (табл. 1) дав змогу встановити чітку залежність між типом сировини та характеристиками кінцевих продуктів. На відміну від щільної деревини, побічна продукція рослинництва (стебла соняшнику, кукурудзиння) характеризується підвищеною зольністю та більшим умістом летких речовин. Внаслідок цього вихід цільового твердого залишку (біовугілля) за повільного піролізу становить 20–25 %, а за карбонізації – 20–30 % від маси сухої сировини. Високий уміст мінеральних компонентів в аграрній біомасі зумовлює зниження теплоти згорання отриманого біовугілля до 20–24 МДж/кг (порівняно з 30 МДж/кг для деревного вугілля). Однак для використання продукту як ґрунтового меліоранта цей показник

не є лімітуючим, оскільки енергетична цінність повністю компенсується високою пористістю та сорбційною здатністю матеріалу.

Карбонізація як найдавніша технологія здійснюється у виритих ямах або купках із куполоподібним звуженням, що накриваються шаром ґрунту (рис. 1). Тривалість такого процесу є нестабільною і може тривати до кількох місяців. Однак для сучасного агровиробництва інженерно доцільнішим є повільний піроліз. У таких установках періодичної дії сировина укладається у реторти, які завантажують у піролізний реактор, що підігрівается до 500-700 °С, повністю унеможливаючи доступ повітря. Рідкі продукти (біонафта) та піролізний газ виходять з реактора, проходять очищення в циклоні від твердих частинок, після чого газ частково йде на підтримання процесу піролізу, а частково — на енергетичні цілі. У реакторі залишається кокс палива — чистий вуглець, що видаляється після завершення процесу, який триває приблизно 30 хвилин.

Аналіз швидкого абляційного піролізу показав, що він реалізується в пластинчастих і конусних реакторах за температури приблизно 650 °С. В абляційному пластинчастому реакторі подрібнена біомаса шнековим транспортером подається в робочу зону, де лопатками періодично притискається до нагрітої пластинчастої поверхні. Багатократне місцеве нагрівання в атмосфері азоту стимулює піроліз, після чого у циклоні розділяються парогазові продукти, а вугілля збирається в окремій ємності. За такої технології вихід біонафти може перевищувати 66 %.

Абляційний конусний реактор вирізняється поєднанням процесу у киплячому шарі та абляційного піролізу. Процес здійснюється у просторі між обертовим зовнішнім та нерухомим внутрішнім конусами. Завдяки розрідженню під час обертання гарячі частинки піску всмоктуються у конус, де відбувається тісний контакт із сировиною. Внутрішня рециркуляція потоку дає змогу біомасі декілька разів пройти зону реакції, а тепло гене-

рується спалюванням вуглистої речовини в окремій камері згорання. Втрати біонафти тут мінімальні (приблизно 10 %), кінцевий вихід сягає 75 %, тоді як вуглистої речовини утворюється лише приблизно 15 %.

Для рідких субстратів застосовується піроліз у потоці в трубчастих реакторах, що складаються з камер радіації та конвекції зі встановленими зміювиками. У камері радіації в пальнику спалюється паливо, труби поглинають тепло, тоді як у конвекційній зоні нагрівання відбувається конвективним шляхом від димових газів. Варто зауважити, що ця технологія вирізняється підвищеною пожежною небезпекою через можливі вибухи в топковому просторі та витікання палива.

Високотехнологічним рішенням є плазмовий піроліз, що базується на використанні високочастотного електричного розряду. Частинки органічної речовини у висхідному потоці газу проходять зону розряду, де піддаються молекулярному розкладанню. Відбивач-уловлювач повертає крупніші частинки на повторну циркуляцію в зону розряду до їх повного розкладання, що збільшує час їх обробки.

Загалом інженерні дані підтверджують, що швидкий високотемпературний піроліз дає до 70 % піролізного газу і лише до 20 % біовугілля. Швидкий низькотемпературний піроліз максимізує вихід біонафти (до 80 %) за збереження низького виходу вуглецевого залишку. Отже, встановлено, що для аграрних підприємств найдоцільнішим для отримання меліоранта є процес повільного піролізу.

Важливий елемент підвищення загальної ефективності піролізних комплексів в аграрному секторі — оптимізація фракційного складу готового продукту після вивантаження з реактора. Технологічно обґрунтовано розподіл отриманого біовугілля на два цільові потоки за допомогою механічного просіювання. Фракція розміром 2-5 мм (до 80-85 % від загальної маси) має оптимальні агрофізичні властивості та спрямовується безпосередньо для внесення в ґрунт як меліорант. Водночас

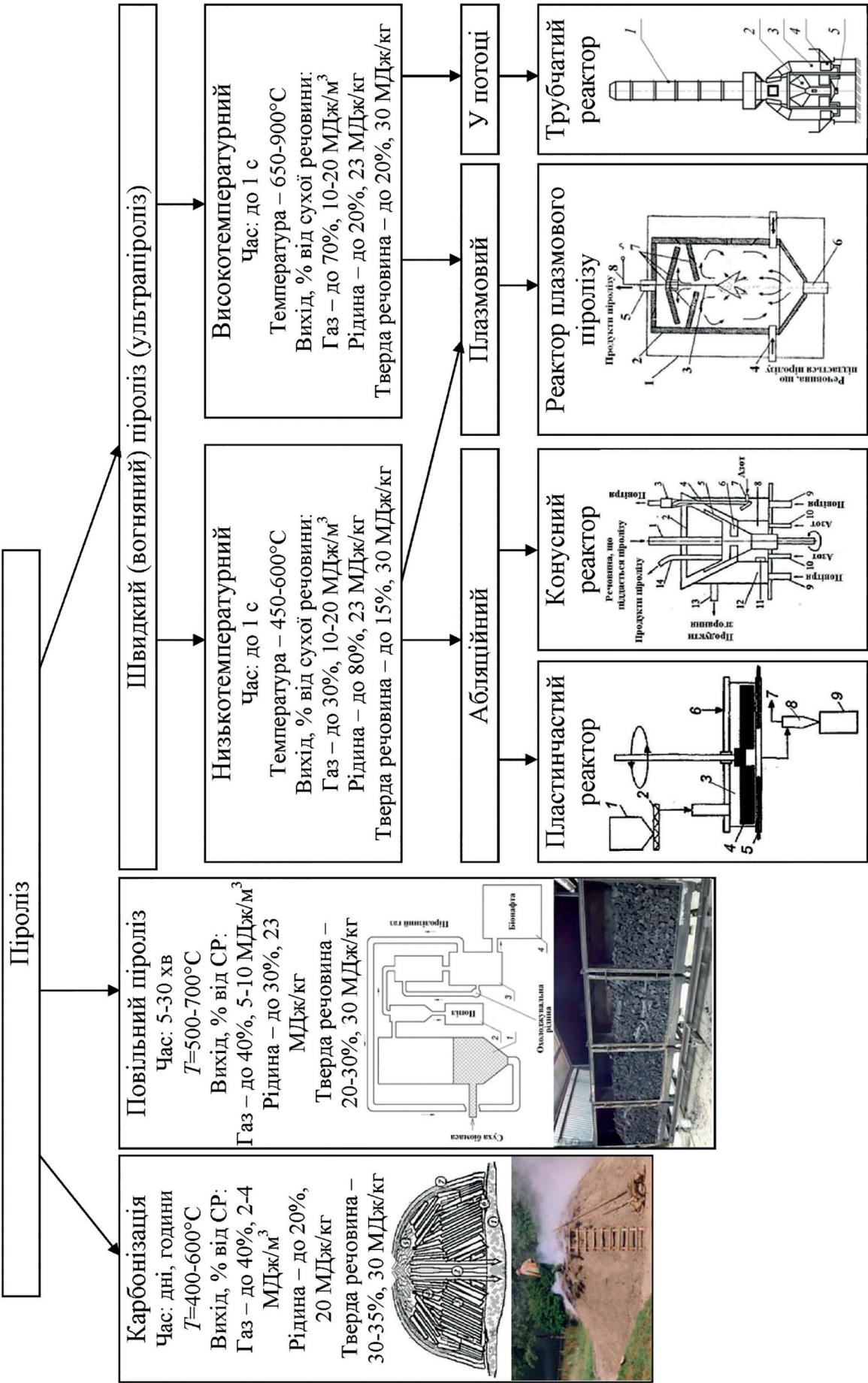


Рисунок 1 – Схема класифікації технологій та технічних засобів проведення піролізу біомаси

дрібнодисперсне відсівання (вугільний пил фракцією менш як 1 мм), яке є технологічно непридатним для безпосереднього внесення сільськогосподарськими машинами через ризик пилення та видування, запропоновано піддавати механічній стабілізації. Інженерне рішення передбачає змішування такого відсівання з органічними сполучними речовинами рослинного походження (меляса або крохмальний клейстер у кількості 5-7 % від маси) з подальшим ущільненням на шнекових екструдерах або вальцевих пресах під тиском 100-120 кПа.

Випробування отриманих зразків підтвердили, що сформовані паливні брикети мають високу механічну міцність, тривалий час бездимного горіння та рівномірну тепловіддачу без утворення іскор. Це робить їх повноцінним екологічним паливом, повністю адаптованим до жорстких вимог теплових апаратів (мангалів, грилів, барбекю) підприємств індустрії гостинності та рекреаційного туризму, забезпечуючи безвідходність агроінженерного комплексу.

Обговорення. Вибір технології та конструкції реактора для переробки побічної продукції сільського господарства має жорстко базуватися на конкретних виробничих цілях агропідприємства. Якщо стратегічною метою є отримання рідких енергоносіїв (біонафти) для подальшої переробки на синтетичні палива, безперечною є перевага абляційних конусних реакторів [Khuenkaeo & Tirrayawong, 2024], які забезпечують вихід рідкої фракції на рівні 75 %. Специфіка їх роботи з внутрішньою рециркуляцією теплоносія дає змогу ефективно проводити тепломасообмін. З іншого боку, складність кінематики, необхідність точного налаштування швидкості обертання конусів, подачі азоту та роботи з киплячим шаром піску роблять ці системи надзвичайно уразливими й дорогими в обслуговуванні в умовах звичайного фермерського господарства.

Плазмові реактори демонструють найвищу глибину переробки органічної маси, забезпечуючи молекулярне розкладання

сировини завдяки холодно-плазмовому розряду [Khatibi, Nahil & Williams, 2023]. Однак надзвичайно висока енергоємність, складність генерації плазми та потреба у висококваліфікованому інженерному обслуговуванні унеможливають їх широке впровадження як децентралізованих рішень на поточному етапі розвитку агротехніки. Трубочасті реактори, розраховані здебільшого на рідини, мають обмежене застосування для сухої волокнистої біомаси (соняшник, кукурудза) та вирізняються неприпустимо високим ризиком пожежної небезпеки.

Для вирішення завдань сталого землеробства, зокрема генерації біовугілля для відновлення деградованих ґрунтів і довгострокової фіксації вуглецю, найвищу інженерну та економічну ефективність демонструє технологія повільного піролізу [Babu et al., 2024; Javaid et al., 2024]. Порівняно з примітивною карбонізацією у купах чи ямах, яка займає місяці та не піддається контролю, сучасні ретортні установки повільного піролізу забезпечують стабільний вихід біовугілля (20-30 %) з високим вмістом чистого фіксованого вуглецю. Можливість використання утвореного піролізного газу для підтримання власного теплового балансу реактора робить такі установки енергетично автономними.

Досвід експлуатації передових демонстраційних зразків іноземного виробництва, зокрема сучасних японських установок карбонізації (за типом Tromso i-mosa) [Japanese company..., 2025], підтверджує, що для масштабування технології на базі вітчизняних інституцій та агропідприємств потрібні саме такі надійні автоматизовані рішення з циклічним завантаженням. Інтеграція установок повільного піролізу дасть змогу господарствам не лише перетворювати відходи на ефективний ґрунтовий меліорант (необхідний для покращення мікробіологічного фону та вологоємності), а й генерувати додатковий прибуток за рахунок виходу на ринок верифікованих вуглецевих сертифікатів.

Слід зазначити, що виробництво деревного вугілля становить певну небез-

пеку для обслуговуючого персоналу. В ретортах процес відбувається без доступу повітря. Однак після завершення процесу піролізу розжарене деревне вугілля після вивантаження із реторти за доступу повітря може спалахнути, спричинивши пожежу і травми працівників. Тому під час вивантаження деревного вугілля із реторти потрібно обов'язково дотримуватись правил пожежної безпеки: дочекатись охолодження продукту з обмеженням доступу до нього кисню. Крім того, під час виробництва деревного вугілля виділяється отруйний чадний газ (оксид вуглецю), який блокує механізм транспортування кисню до життєво важливих органів людини. Високий уміст такого газу в піролізній суміші вимагає суворого дотримання вимог безпеки життєдіяльності щодо герметизації реакторів та наявності датчиків контролю загазованості робочої зони для запобігання гострим отруєнням персоналу. Також під час виробництва деревного вугілля обов'язково потрібно користуватися засобами індивідуального захисту органів дихання із сорбентами проти чадного газу.

З інженерної точки зору, впровадження установок повільного піролізу на базі агропідприємств потребує додаткового вузла фракціонування готового продукту. Біовугілля оптимальної фракції (2-5 мм) спрямовується на потреби ґрунтової меліорації. Водночас дрібнодисперсна фракція (вугільний пил), яка незручна для внесення в ґрунт сільськогосподарською технікою, може слугувати цінною сировиною для суміжного виробництва. Шляхом застосування шнекових екструдерів або вальцевих пресів цей залишок формується у паливні брикети [Bello et al., 2024; Onyegirim et al., 2025]. Завдяки відсутності іскор, низькому вмісту золи та стабільній тепловіддачі такі брикети з аграрного біовугілля користуються стабільним попитом у рекреаційній сфері та індустрії гостинності (для мангалів і барбекю), повністю замішуючи традиційне деревне вугілля [Kluska & Ramotowski, 2024; Muchele et al., 2025].

Висновки. Системний техніко-технологічний аналіз процесів термохімічної переробки біомаси підтвердив, що для отримання якісних ґрунтових меліорантів з великотонажних відходів сільського господарства (кукурудзиння, стебла соняшнику) найефективнішою є технологія повільного піролізу. Вона забезпечує оптимальний компроміс між енергоємністю процесу, тривалістю циклу (до 30 хвилин) та виходом цільового продукту, що становить 20-35 % від початкової маси сухої сировини.

Інженерне оцінювання сучасних реакторних систем виявило, що хоча швидкий абляційний піроліз у конусних та пластинчастих реакторах дає змогу максимально екстрагувати біонафту (до 75-80 %), конструктивна складність цих установок і низький вихід твердого вуглецевого залишку роблять їх менш придатними для локального використання аграріями. Натомість, ретортні установки повільного піролізу з циклічним завантаженням та можливістю утилізації піролізних газів на власні технологічні потреби є найбільш раціональним технічним рішенням. Крім високої технологічної ефективності, ретортні установки закритого типу забезпечують належний рівень безпеки праці персоналу, мінімізуючи ризики пожеж та викидів шкідливих газів у робочу зону порівняно з трубчастими аналогами.

Практична цінність одержаних результатів полягає у створенні науково-інженерного підґрунтя для впровадження безвідходних технологій в агровиробництво України. Використання установок повільного піролізу дає змогу не лише генерувати ґрунтовий меліорант для довгострокової фіксації вуглецю, а й відкриває можливості для виробництва супутньої комерційної продукції — екологічних паливних брикетів для туристичної та готельно-ресторанної галузей. Це суттєво підвищує загальну рентабельність переробки рослинних відходів сільського господарства.

Список літератури / References

Depletion of Ukraine's Soils Threatens Long-Term Global Food Security - Seed World (2025). URL: <https://www.seedworld.com/europe/2025/11/06/study-depletion-of-ukraines-soils-threatens-long-term-global-food-security/>

Belis, C.A., Petrosian, A., Turos, O., Maremuhka, T., Morhulova, V., Kona, A., Djatkov, D., Caudullo, G., Ceccherini, G., Beck, P.S.A., San-Miguel, J., Arias Navarro, C., Wojda, P., Jones, A., Hanke, G., Mariani, G. and Carravieri, A. (2025). Status of *Environment and Climate in Ukraine*, Publications Office of the European Union, Joint Research Centre, Luxembourg. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/6292177>

Li, Y., Gupta, R., Zhang, Q., & You, S. (2023). Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives. *Bioresource technology*, 369, 128423. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128423>

Yrjälä, K., Ramakrishnan, M., & Salo, E. (2022). Agricultural waste streams as resource in circular economy for biochar production towards carbon neutrality. *Current opinion in environmental science & health*, 26, 100339. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100339>

Wijitkosum, S. (2022). Biochar derived from agricultural wastes and wood residues for sustainable agricultural and environmental applications. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.006>

James, A., Sánchez, A., Prens, J., & Yuan, W. (2022). Biochar from agricultural residues for soil conditioning: Technological status and life cycle assessment. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100314.

Kapoor, A., Sharma, R., Kumar, A., & Sepehya, S. (2022). Biochar as a means to improve soil fertility and crop productivity: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 45(15), 2380-2388. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2027980>

Panchuk, A. M., Panchuk, M. V., & Deineha, R. O. (2024). Prospects for intro-

ducing biomass pyrolysis technologies to increase of volumes biofuel production. *Oil and Gas Power Engineering*, (2 (42)), 137-145. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2\(42\)-137-145](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2(42)-137-145)

Khuenkaeo, N., & Tippayawong, N. (2024, October). Design, make and preliminary testing of a high throughput ablative pyrolysis reactor for biomass and agro-residues. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3236, No. 1, p. 020002). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0236725>

Khatibi, M., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2023). Improving the quality of bio-oil using the interaction of plastics and biomass through copyrolysis coupled with nonthermal plasma processing. *Energy & Fuels*, 38(2), 1240-1257. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c04082>

Babu, K. K. B. S., Nataraj, M., Tayappa, M., Vyas, Y., Mishra, R. K., & Acharya, B. (2024). Production of biochar from waste biomass using slow pyrolysis: Studies of the effect of pyrolysis temperature and holding time on biochar yield and properties. *Materials Science for Energy Technologies*, 7, 318-334. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2024.05.002>

Javaid, S. F., Dai, M., Wu, Y., Luo, H., Amjed, M. A., Ali, I., ... & Naz, I. (2024). Production of biochar by slow and solar-biomass pyrolysis: focus on the output configuration assessment, adaptability, and barriers to market penetration. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(6), 7731-7750. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08549-3>

Japanese company presented advanced biochar system at the conference in Ukraine (2025). URL: <https://www.unido.org/news/japanese-company-presented-advanced-biochar-system-conference-ukraine>

Oyebamiji, O. O., Olaleru, A. S., Oyeleke, R. B., & Ofodile, L. N. (2025). Evaluation and characterization of biochar and briquettes from agricultural wastes for sustainable energy production. *Waste Management Bulletin*, 3(3), 100198. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100198>

Rostocki, A., Unyay, H., Ławińska, K., & Obraniak, A. (2022). Granulates based on bio

and industrial waste and biochar in a sustainable economy. *Energies*, 16(1), 56. <https://doi.org/10.3390/en16010056>

Mucheles, E. M., Osodo, B., Omosa, I., & Kombe, E. Y. (2025). Characterization of food wastes from the hotel industry as a potential feedstock for energy production. *Energy Nexus*, 17, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100364>

Bello, R. S., Olorunnisola, A. O., Omoniyi, T. E., & Onilude, M. A. (2024). Technoeconomic Review of Briquette Production in a Screw Press [SP] and Hydraulic Piston Press [HPP]. *Biomass Based Products*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007809>

Onyegirim, S. N., Nwankwo, E. I., Owuama, K. C., & Madukasi, H. A. (2025). Advances in charcoal briquetting machines: A comprehensive review of technologies, performance, and sustainable applications. *Inter-*

national Journal of Applied and Natural Sciences, 3(2), 35-49. <https://doi.org/10.61424/ijans>

Kluska, J., & Ramotowski, J. (2024). Combustion characteristics of biochar from food processing waste. *Archives of Thermodynamics*, 45-51. <https://doi.org/10.24425/ather.2024.150437>

Надійшла до редакції 04.05.2026 р.;
переглянуто 11.05.2026 р.;
прийнято до друку 28.05.2026 р.;
опубліковано 29.06.2026 р.

Received 05/04/2026;
revised 05/11/2026;
accepted 05/28/2026;
published 06/29/2026

UDC 662.71:631.879:331.45

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF AGRICULTURAL BIOMASS PYROLYSIS TECHNOLOGIES: EFFICIENCY, SCALABILITY, AND OCCUPATIONAL SAFETY

Polishchuk V., Dr. Sc.,

<https://orcid.org/0000-0002-9654-9051>

Yeremenko O., PhD,

<https://orcid.org/0000-0002-3377-0015>

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Maidanovych V., PhD,

<https://orcid.org/0009-0007-2972-6461>

L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Kudriavytska A., PhD,

<https://orcid.org/0000-0003-2888-1981>

Naumenko V.,

<https://orcid.org/0009-0004-4932-8231>

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Summary

The purpose of the research is to provide a comprehensive substantiation of the technical and technological parameters of biochar production from agricultural waste through the application of various pyrolysis methods for its further multifunctional use as a soil amendment and raw material for eco-friendly fuel production.

The research methodology is based on a comparative engineering analysis of carbonization, slow

pyrolysis, and fast pyrolysis technologies, as well as on the assessment of the design parameters of corresponding reactor units and auxiliary equipment for the mechanical processing of carbonaceous product residues, taking into account occupational safety requirements, operating modes, heating rates, and reactor configurations.

Results. *It was established that the processes of thermochemical conversion of plant biomass differ significantly in the yield of target products depending on temperature conditions. The results of the engineering analysis indicate that the highest yield of solid carbon residue (from 20% to 35% of the initial dry feedstock mass) is ensured by slow pyrolysis and conventional carbonization technologies. The study provides a detailed analysis of the design features and operating principles of ablative (plate and cone-type), tubular, and plasma reactors. It is shown that, for the needs of the agricultural sector, the most appropriate solution is the implementation of slow pyrolysis units (450–700 °C), which enable the production of a stable solid fraction. An engineering solution for product separation is substantiated: medium-fraction biochar is directed toward the reclamation of degraded soils and long-term carbon sequestration, whereas fine-dispersed screenings are proposed to be compacted into fuel briquettes. It has been proven that such briquettes, according to their physicochemical properties, are a highly efficient substitute for charcoal and possess considerable commercial potential for implementation in the hospitality industry, restaurant business, and recreational tourism.*

Conclusions. *The conclusions confirm that scaling pyrolysis technologies at the farm level enables efficient utilization of agricultural residues and production of high-quality soil amendments. Such biochar restores degraded soils, improves moisture retention, and supports long-term carbon sequestration, meeting climate-smart agriculture requirements and creating opportunities for carbon market financing. The practical significance of the work lies in diversifying farm income through the integration of climate-smart farming and renewable energy generation while maintaining occupational safety standards.*

Keywords: *biochar, biomass pyrolysis, agricultural engineering, pyrolysis reactors, soil amendments, carbon sequestration, agricultural waste, occupational and life safety, fuel briquettes for the hospitality industry.*