

## СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЕРЕВЕНИ НА БЮГАЗ І БІОНАФТУ: МОЖЛИВОСТІ ТА РОЗВИТОК

Вінницький національний технічний університет

У статті досліджено процес піролізу деревини як ефективний спосіб перетворення біомаси на відновлювані енергоносії з високим енергетичним потенціалом. Піроліз, що полягає у термічному розкладанні органічної сировини за відсутності або обмеженого доступу кисню, також у будівельній і промисловій галузях піроліз сприяє підвищенню енергоефективності, зменшенню обсягів відходів і розвитку альтернативної енергетики, забезпечує утворення трьох основних продуктів: біоолії (рідкого палива), біочару (вуглецевого залишку) та синтез-газу (суміші водню, оксиду вуглецю та метану). Кожен із цих продуктів характеризується специфічними властивостями, перевагами та напрямками використання. Біоолія може застосовуватись як альтернатива дизельному паливу в енергетичних установках, біочар — як покращувач ґрунтів, добриво, сорбент або активоване вугілля, а синтез-газ — як паливо для виробництва електроенергії або як сировина для хімічної промисловості, зокрема для синтезу метанолу, аміаку та водню.

У роботі наведено основні рівняння та залежності для оцінки енергетичного потенціалу біомаси з урахуванням її вологості, щільності, теплотворної здатності та елементного складу. Також розглянуто підходи до визначення виходу продуктів піролізу залежно від температури процесу, швидкості нагрівання, тривалості обробки та виду деревини. Особливу увагу приділено аналізу середньої теплоти згоряння отриманих продуктів, що дає змогу оцінити їх енергетичну ефективність і доцільність використання в різних умовах. Показано, що застосування піролізу сприяє значному зменшенню викидів CO<sub>2</sub> порівняно з прямим спалюванням деревини або використанням викопного палива. Особливий акцент зроблено на екологічних перевагах технології та можливостях її інтеграції в сучасні аграрні системи. Біочар, отриманий у процесі піролізу, виступає стабільним джерелом вуглецю в ґрунті, покращуючи його структуру, водоутримувальну здатність, мікробіологічну активність і родючість загалом. Отримані результати підтверджують доцільність широкого впровадження технологій піролізу деревини як елементу циркулярної економіки, спрямованої на зменшення антропогенного впливу на довкілля, розвиток екологічно безпечної енергетики та раціональне використання природних ресурсів.

**Ключові слова:** біомаса; піроліз; біоенергетика; теплота згоряння; відновлювальні енергоносії; викиди CO<sub>2</sub>.

Стаття надійшла до редакції / Received 09.03.2026  
Прийнята до друку / Accepted 20.04.2026  
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Жук Д.В., Коц І.В.

### Вступ

Зростання світового попиту на енергію, виснаження запасів викопного палива та погіршення екологічного стану довкілля зумовлюють необхідність переходу до альтернативних і сталих джерел енергії. У цьому контексті особливого значення набуває використання біомаси як доступного та відновлюваного ресурсу, який може ефективно застосовуватися для виробництва енергії та палива [1]. Біомаса відзначається широкою сировинною базою та можливістю локального використання, що робить її важливим елементом енергетичної незалежності, а також перспективним ресурсом для сільського господарства, хімічної промисловості та будівельної галузі. Одним із найбільш перспективних напрямів перетворення біомаси є застосування термохімічних технологій, серед яких важливе місце займає піроліз. Цей процес полягає у високотемпературному розкладанні органічної сировини за умов обмеженого або повністю відсутнього доступу кисню. У результаті піролізу утворюються три основні продукти: рідка фракція (біоолія), тверда (біочар) та газоподібна (синтетичний газ) [2]. Така багатокомпонентність продуктів дозволяє гнучко адаптувати технологію до потреб різних галузей промисловості. Отримані продукти піролізу мають значний практичний потенціал. Біоолія може застосовуватися як альтернативне паливо або компонент паливних сумішей, біочар — як ефективний матеріал для покращення властивостей ґрунту, зокрема його структури та водоутримувальної здатності, а також як засіб фіксації вуглецю [3] та інтеграції в будівельну галузь. Синтетичний газ може бути використаний як джерело енергії або як сировина для подальшого хімічного синтезу, включаючи виробництво метанолу, водню та інших хімічних сполук [4]. Таким чином, піроліз забезпечує комплексне використання біомаси з отриманням цінних енергетичних і матеріальних продуктів. Важливим аспектом впровадження піролізних технологій є їх екологічна доцільність. Результати сучасних досліджень свідчать, що застосування піролізу

сприяє зниженню викидів діоксиду вуглецю порівняно з традиційними способами спалювання вихопного палива [5]. Крім того, використання біочару в агросистемах позитивно впливає на якість ґрунтів, підвищує їхню стійкість до деградації та сприяє довготривалому накопиченню органічного вуглецю [6]. У зв'язку з цим піроліз розглядається як один із перспективних інструментів у сфері скорочення антропогенного впливу на клімат. Особливої уваги заслуговує відповідність технологій піролізу принципам циркулярної економіки, що передбачають раціональне використання ресурсів і повторне залучення відходів у виробничі цикли. Застосування деревних відходів та інших видів біомаси для отримання енергії й вторинних продуктів дозволяє зменшити навантаження на навколишнє середовище та підвищити ресурсну ефективність виробництва. Реалізація таких підходів є важливою складовою формування сучасних сталих енергетичних систем. Отже, метою даної роботи є всебічний аналіз процесу піролізу деревини як ефективного способу перетворення біомаси на відновлювані енергоносії, дослідження енергетичних характеристик продуктів піролізу, а також оцінка екологічних і практичних переваг цієї технології в умовах сучасних енергетичних та екологічних викликів.

Метою роботи є комплексне дослідження процесу піролізу деревини з отриманням власних експериментальних і числових результатів, математичне моделювання матеріальних балансів процесу, а також науково-практичне обґрунтування ефективного використання отриманих продуктів (зокрема біочару) у технологіях будівельного виробництва.

### Огляд літератури

У наукових джерелах останніх років піроліз деревини розглядається не лише як окремий технологічний процес, а як складова комплексної системи переробки біомаси. Такий підхід обумовлений необхідністю ефективного використання відновлюваних ресурсів і зменшення залежності від традиційних енергоносіїв. Узагальнення результатів досліджень свідчить, що піроліз здатен забезпечити одержання різнотипних продуктів із широкими можливостями подальшого застосування, що значно підвищує його практичну цінність.

Суттєвий вплив на перебіг процесу мають технологічні параметри, серед яких визначальним є температурний режим. Як показано у роботі [7], варіювання температури в межах 300–600 °C призводить до зміни співвідношення між рідкими, твердими та газоподібними продуктами. Зокрема, при помірних температурах переважає утворення біоолії, тоді як підвищення температури сприяє інтенсифікації процесів газифікації та зростанню частки метану. Це дозволяє адаптувати процес під конкретні потреби виробництва, змінюючи його кінцевий результат.

Важливим напрямом удосконалення технології є застосування каталітичних матеріалів. Дослідження [8] демонструють, що використання оксидів металів, зокрема нікелю та кобальту, позитивно впливає на якість і склад газоподібних продуктів. Каталізатори забезпечують глибший ступінь розкладання органічної сировини, зменшують утворення побічних компонентів і підвищують концентрацію метану в газовій суміші. Подібні висновки підтверджуються й іншими авторами, які наголошують на необхідності цілеспрямованого підбору каталітичних систем для досягнення оптимальних результатів [9].

Екологічна складова піролізу також займає важливе місце у сучасних дослідженнях. Згідно з даними [9], впровадження цієї технології дозволяє істотно скоротити викиди парникових газів — у середньому на 30–50 % порівняно з традиційними методами спалювання деревини. Це пояснюється як особливостями процесу, так і можливістю зв'язування вуглецю у вигляді стабільних твердих продуктів. Таким чином, піроліз може розглядатися як один із інструментів екологізації енергетичного сектору. Разом із тим, аналіз літератури вказує на наявність ряду невирішених питань. Зокрема, у роботах [9] підкреслюється недостатній рівень дослідження впливу різних порід деревини на ефективність процесу та якість отриманих продуктів. Крім того, актуальним залишається завдання визначення раціональних режимів роботи установок, які б забезпечували максимальну енергетичну віддачу при мінімальних витратах. Особливої уваги потребує економічна складова, оскільки впровадження піролізних технологій у промислових масштабах повинно бути економічно обґрунтованим і конкурентоспроможним [10].

Перспективи подальшого розвитку галузі пов'язані з інтеграцією піролізу в багатофункціональні технологічні комплекси. Зокрема, поєднання піролізу з іншими методами переробки біомаси дозволяє підвищити ефективність використання сировини та мінімізувати відходи. Такий підхід відповідає принципам сталого розвитку та циркулярної економіки, де кожен елемент виробничого циклу виконує додаткову функцію. Узагальнюючи результати аналізу, можна стверджувати, що

піролізні технології мають значний потенціал у сфері енергетичної переробки деревини. Подальший розвиток досліджень у цьому напрямі має бути спрямований на вдосконалення технологічних параметрів, підвищення ефективності каталітичних систем і обґрунтування економічної доцільності їх застосування, що створить передумови для широкого впровадження цих технологій у практику.

Останнім часом значна увага приділяється параметрам піролізу [1–3] та каталітичним системам переробки біомаси [4]. Проте більшість досліджень обмежуються виключно енергетичним або аграрним векторами використання продуктів. Питання інтеграції продуктів піролізу в будівельну галузь досі залишається фрагментарним, хоча має колосальний потенціал:

- Модифікація бетонів та будівельних розчинів: Біочар (біовугілля) завдяки своїй високопористій структурі та високому вмісту стабільного вуглецю може слугувати мікронаповнювачем у цементних матрицях. Дослідження показують, що введення дисперсного біочару в кількості 1–3% від маси цементу ущільнює структуру каменю, прискорює гідратацію та підвищує міцність на стиск, одночасно забезпечуючи зв'язування (секвестрацію) вуглецю всередині будівельних конструкцій на століття.

- Асфальтобетонні суміші: Важкі фракції біоолії (біонафти) за своїми в'язучими та реологічними властивостями наближені до нафтових бітумів. Вони можуть частково або повністю замінювати традиційні токсичні бітуми, підвищуючи тріщиностійкість та еластичність дорожнього покриття.

- Теплоізоляційні матеріали: Високопористий біочар має низьку теплопровідність, що робить його перспективним наповнювачем для легких бетонів (арболіт, пінобетон) та штукатурних сумішей для термомодернізації будівель.

### Матеріали та методи

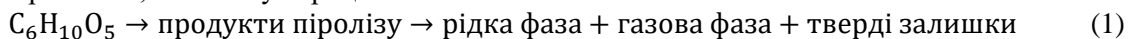
У сучасних умовах розвитку енергетики особливого значення набувають технології, що поєднують ефективність використання ресурсів із мінімальним впливом на довкілля. Одним із перспективних напрямів є переробка деревної сировини та відходів у корисні енергетичні продукти. Такий підхід дозволяє не лише скоротити обсяги відходів, але й створити додаткові джерела енергії, що особливо актуально в умовах зростання світового попиту.

Серед існуючих методів термічної переробки біомаси важливу роль відіграє піроліз – процес, що відбувається за високих температур без доступу кисню. У результаті цього процесу утворюються газоподібні, рідкі та тверді продукти, які можуть бути використані у різних сферах – від енергетики до хімічного виробництва. Така універсальність робить піроліз привабливим як з технологічної, так і з економічної точки зору.

Залежно від умов проведення процесу розрізняють декілька режимів піролізу. Наприклад, повільний піроліз характеризується невисокими температурами та тривалим часом обробки, що сприяє утворенню більшої кількості твердих залишків [11]. Натомість швидкий піроліз відбувається за значно вищих температур і коротшого часу контакту, що забезпечує підвищений вихід рідких продуктів [12]. Вибір конкретного режиму визначається вимогами до кінцевої продукції та умовами її подальшого використання.

Загальний перебіг процесу можна описати узагальненою схемою розкладання органічної речовини:

Основне рівняння, яке описує процес:



При цьому склад і співвідношення продуктів значною мірою залежать від температури, тривалості процесу та властивостей вихідної сировини. Для опису впливу цих факторів часто використовують функціональні залежності, що пов'язують вихід продуктів із параметрами процесу:

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

де: температура (T) та час перебування (t) є визначальними змінними.

У межах проведеного дослідження було виконано експериментальну піролізну переробку 100 кг подрібненої деревної біомаси з вологістю 12 %. Процес здійснювався у лабораторній піролізній установці при температурі 500 °C та тривалості термічної обробки 45 хв. У результаті експерименту було отримано 48 кг газоподібних продуктів, 27 кг рідкої фракції та 25 кг твердого залишку. Масовий вихід продуктів визначається за формулами:

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

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

Підставляючи значення проведемо розрахунки для газоподібних продуктів:

$$\eta_{\text{газ}} = \frac{48}{100} \times 100\% = 48\%$$

Аналогічно для рідкої фракції:

$$\eta_{\text{біонафта}} = \frac{27}{100} \times 100\% = 27\%$$

Твердий залишок становитиме:

$$\eta_{\text{тв.залишок}} = \frac{25}{100} \times 100\% = 25\%$$

Отримані експериментальні результати свідчать, що за температури 500 °С найбільший вихід припадає на газоподібну фракцію, частка якої становить 48 %. Це пояснюється активним перебігом реакцій термічного крекінгу органічних компонентів деревини. Порівняння результатів із літературними даними показує, що отримані значення перебувають у межах типових показників швидкого піролізу деревної біомаси, що підтверджує коректність проведених розрахунків та експериментальної методики. Рідка фаза придатна для подальшої переробки у паливні компоненти, тоді як твердий залишок може застосовуватися як біовугілля або технологічне паливо, яке особливо цінується у будівництві.

Цей підхід дозволяє визначити доцільність застосування технології залежно від поставлених цілей. Разом із перевагами піроліз має і певні обмеження. До них належать складність керування процесом, необхідність використання спеціалізованого обладнання та значні початкові інвестиції. Крім того, ефективність технології значною мірою залежить від стабільного забезпечення сировиною, що може створювати додаткові логістичні труднощі.

Піроліз входить до групи термохімічних методів переробки біомаси поряд зі спалюванням і газифікацією. Кожен із цих підходів має свої особливості та області застосування, що дозволяє обирати оптимальне рішення залежно від конкретних умов. Також існують комбіновані технології, які поєднують кілька методів для підвищення загальної ефективності процесу.

Поряд із піролізом у сучасній енергетиці активно застосовуються інші термохімічні методи переробки біомаси, зокрема газифікація, торрефікація та комплексне термохімічне конвертування. Кожен із цих підходів має свої технологічні особливості, сферу застосування та рівень ефективності залежно від типу сировини та кінцевої мети.

Газифікація є одним із ключових методів перетворення деревної біомаси в енергетичні ресурси. Цей процес відбувається за підвищених температур і, як правило, в умовах обмеженого доступу окисника, що призводить до часткового окиснення сировини. У результаті формується газова суміш, до складу якої входять водень, метан, оксиди вуглецю та інші компоненти. Отриманий газ може використовуватися як паливо або як проміжний продукт для синтезу хімічних сполук. Такий підхід дозволяє ефективно залучати відновлювану сировину до енергетичного балансу.

Попри значні переваги, газифікація не позбавлена недоліків. Зокрема, її впровадження пов'язане з високими капітальними витратами, складністю регулювання технологічних параметрів і необхідністю стабільного постачання значних обсягів біомаси. Водночас її здатність зменшувати викиди парникових газів і розширювати паливну базу робить цей метод перспективним для подальшого розвитку.

Іншим напрямом удосконалення властивостей біомаси є торрефікація – процес попередньої термічної обробки, що здійснюється за відносно невисоких температур (приблизно 200–300 °С) без доступу кисню [11]. У ході цієї обробки з матеріалу видаляється волога та частина легких компонентів, унаслідок чого покращуються його паливні характеристики. Торрефікована біомаса стає більш енергомісткою, стабільною під час зберігання та зручнішою для транспортування [11].

Отриманий після торрефікації матеріал може використовуватися як самостійне паливо або як підготовлений напівпродукт для подальших процесів, таких як газифікація чи піроліз. Це підвищує загальну ефективність енергетичних систем і дозволяє оптимізувати використання сировини. Водночас варто враховувати, що реалізація цього процесу потребує додаткових енергетичних витрат і спеціалізованого обладнання.

Більш узагальненим підходом до переробки біомаси є термохімічне конвертування, яке охоплює сукупність процесів, що відбуваються під дією високих температур і тиску. У межах цього підходу органічна сировина зазнає складних хімічних перетворень, у результаті яких утворюються газоподібні та рідкі енергетичні продукти. Такий метод відкриває широкі можливості для

виробництва енергії та хімічної сировини, що може бути використана в різних галузях промисловості.

У системі сучасних технологій переробки біомаси важливе місце займає термохімічне конвертування, яке охоплює комплекс процесів, спрямованих на перетворення органічної сировини в енергетично цінні продукти. Суть цього підходу полягає у проведенні хімічних реакцій під дією високих температур, а в окремих випадках – і підвищеного тиску, що призводить до глибокого розкладання вуглеводневих сполук та утворення газоподібних і рідких фракцій. Такий механізм дозволяє ефективно трансформувати біомасу в придатні для подальшого використання енергетичні ресурси. Практичне значення термохімічного конвертування визначається його універсальністю. Воно може застосовуватися як для виробництва енергії, так і для отримання проміжних продуктів хімічного синтезу. Водночас використання цього підходу сприяє зменшенню навантаження на традиційні енергетичні системи та відкриває можливості для розширення частки відновлюваних джерел у загальному енергобалансі. Однак поряд із перевагами існують і певні обмеження: впровадження таких технологій пов'язане зі значними капіталовкладеннями, складністю технічної реалізації та необхідністю контролю екологічних показників.

Окрему увагу в контексті переробки біомаси привертає деревне вугілля, яке розглядається як багатфункціональний матеріал із широким спектром застосувань. Його значення виходить за межі енергетики, оскільки воно може використовуватися в аграрній сфері, будівельній галузі, екологічних технологіях та навіть у сучасних енергетичних системах. Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям деревне вугілля здатне виконувати роль як палива, так і допоміжного матеріалу в різних процесах. З енергетичної точки зору цей матеріал може застосовуватися як відновлюване паливо, що частково замінює традиційні ресурси. Крім того, його використання у ґрунтах сприяє покращенню їх структури та підвищенню родючості. Не менш важливою є здатність деревного вугілля до адсорбції, що дозволяє використовувати його для очищення середовища від шкідливих домішок, зокрема важких металів. З будівельної точки зору цей матеріал може застосовуватися як модифікуюча добавка до будівельних композитів, зокрема бетонів і теплоізоляційних матеріалів, що дозволяє підвищити їхню міцність, знизити теплопровідність та покращити експлуатаційні характеристики. Крім того, його використання у складі будівельних сумішей сприяє підвищенню довговічності конструкцій та зменшенню їхньої маси без втрати несучої здатності. Не менш важливою є здатність цього матеріалу до сорбції вологи та шкідливих домішок, що дозволяє підвищити довговічність і стійкість будівельних матеріалів у складних експлуатаційних умовах.

Кількісна оцінка виходу твердих продуктів піролізу базується на принципах матеріального балансу. Зокрема, маса біококсу визначається як різниця між масою вихідної сировини та масами газоподібних і рідких продуктів:

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

Відповідно, відносний вихід твердої фракції може бути представлений у вигляді:

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

Такі розрахунки дозволяють оцінити ефективність процесу та оптимізувати його параметри залежно від поставлених технологічних завдань.

Сучасні дослідження підтверджують, що деревне вугілля має значний потенціал у різних галузях включаючи сільське господарство, хімічна промисловість, будівельна галузь та ін. Воно може використовуватися не лише як джерело енергії, але й як компонент у новітніх технологіях, включаючи каталітичні процеси та системи зберігання енергії. Це розширює можливості його застосування та підвищує інтерес до подальших досліджень. У сучасних умовах переходу до сталих енергетичних систем особливу увагу приділяють альтернативним газоподібним паливам, серед яких важливе місце займає синтез-газ. Його отримання з деревної сировини розглядається як один із ефективних способів залучення біомаси до енергетичного балансу. Актуальність цього напряму зумовлена як екологічними факторами, так і економічними умовами, зокрема зростанням вартості традиційних енергоносіїв. Синтез-газ, отриманий у результаті термохімічної переробки деревини, характеризується універсальністю використання. Його можна застосовувати як безпосередньо для виробництва теплової та електричної енергії, так і як проміжний продукт у хімічних процесах. Додатковою перевагою є відносно низький рівень викидів і можливість використання відновлюваної сировини, що сприяє зменшенню залежності від викопних ресурсів. Отже, подальше поширення технологій виробництва синтез-газу потребує вдосконалення технічних рішень і

оптимізації економічних показників. Зниження собівартості та підвищення енергоефективності є ключовими завданнями для впровадження таких технологій у промислових масштабах. Це вимагає як експериментальних досліджень, так і розробки нових інженерних підходів.

Економічна доцільність виробництва біогазу та біонафти може бути оцінена через відношення витрат до отриманої енергії. Для цього використовується наступна залежність:

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

Енергетичні характеристики продуктів переробки визначаються їхньою теплотворною здатністю. Зокрема, для основних продуктів можна прийняти такі орієнтовні значення: біогаз: 20–25 МДж/м<sup>3</sup>, біонафта: 30–35 МДж/л, біовугілля: 20–25 МДж/кг.

Для ілюстрації енергетичної ефективності розглянемо умовний приклад переробки 1 т деревини. Якщо в результаті процесу утворюється 250 м<sup>3</sup> біогазу, то його енергетичний потенціал становитиме:

$$E_{\text{бг}} = 250 \cdot 22,5 = 5625 \text{ МДж}$$

У випадку отримання 125 л біонафти:

$$E_{\text{бн}} = 125 \cdot 32,5 = 4062,5 \text{ МДж}$$

Для твердого продукту (біовугілля) масою 70 кг:

$$E_{\text{бв}} = 70 \cdot 22,5 = 1575 \text{ МДж}$$

Сумарний енергетичний ефект визначається як:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{бг}} + E_{\text{бн}} + E_{\text{бв}} = 5625 + 4062,5 + 1575 = 11262,5 \text{ МДж} \quad (8)$$

Такий підхід дозволяє оцінити ефективність використання біомаси та визначити доцільність її переробки залежно від технологічних умов.

Окремої уваги потребує врахування теплових втрат у процесі. У формулі (7) вони розглядаються за двома напрямками: перший пов'язаний із передачею тепла через конструктивні елементи установок, тоді як другий враховує додаткові втрати, зумовлені неоднорідністю матеріалів, стилями та іншими конструктивними особливостями. Такий підхід дозволяє більш точно оцінити реальну ефективність системи. У контексті переходу до відновлюваних джерел енергії особливого значення набувають рідкі продукти переробки біомаси, зокрема біонафта. Вона утворюється внаслідок термохімічних процесів, таких як піроліз, і розглядається як перспективна альтернатива традиційним нафтопродуктам. Зростання вартості викопного палива та посилення екологічних вимог стимулюють розвиток технологій її отримання та використання.

Біонафта характеризується широкими можливостями застосування. Вона може виступати як сировина для виробництва різних видів рідкого палива, включаючи аналоги дизельного пального та інших енергетичних продуктів. Окрім енергетичного використання, ця речовина знаходить застосування у хімічній промисловості, де її компоненти можуть слугувати основою для синтезу полімерів, смол та інших матеріалів. Таким чином, біонафта є універсальним продуктом, що поєднує енергетичну та сировинну функції.

Перспективність використання біонафти безпосередньо пов'язана з можливістю її інтеграції в сучасні енергетичні системи. Вона може стати важливим елементом у процесі декарбонізації економіки, забезпечуючи поступовий перехід від викопних ресурсів до більш екологічно безпечних рішень. Проте для повноцінного впровадження необхідні подальші дослідження, спрямовані на підвищення якості продукту, стабільності його характеристик та економічної ефективності виробництва.

Паралельно з цим зростає актуальність комплексної переробки деревних відходів. Використання біомаси як вторинного ресурсу дозволяє не лише зменшити обсяги відходів, але й отримувати цінні продукти, такі як синтез-газ, біонафта та тверді вуглецеві залишки. Реалізація таких процесів здійснюється за допомогою спеціалізованих технологічних систем, що забезпечують контрольоване протікання термохімічних реакцій за високих температур і обмеженого доступу кисню [14].

Склад і конфігурація обладнання значною мірою визначаються обраною технологією та масштабами виробництва. Незважаючи на різноманітність технічних рішень, можна виділити основні функціональні блоки, характерні для більшості установок [15]:

- Підготовка сировини. На цьому етапі здійснюється очищення деревних відходів від домішок, їх сортування та подрібнення до необхідних розмірів, що забезпечує рівномірність подальшої обробки.

- Реакційна зона. Основні процеси (піроліз, газифікація або торрефікація) відбуваються у спеціальних реакторах або печах, де підтримуються необхідні температурні умови.

- Системи конденсації. Вони призначені для охолодження газоподібних продуктів і виділення рідкої фракції, зокрема біонафти. Очищення продуктів. Для підвищення якості синтез-газу використовуються фільтри та сепаратори, що видаляють тверді частинки та інші домішки.

- Контрольно-вимірвальні системи. Автоматизація процесів забезпечується датчиками та програмним забезпеченням, які контролюють температуру, тиск та інші параметри роботи установки.

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 а також підвищення економічного фактору на промислових об'єктах. Подальше дослідження цих технологій та вдосконалення відповідного обладнання є важливими напрямками розвитку, які сприятимуть збереженню природних ресурсів, та заміні традиційних джерел енергій і сприятиме розвитку економіки усіх держав, зокрема і України. Комплексне застосування таких технологій дозволяє досягти високого рівня використання сировини та мінімізувати втрати. Це сприяє підвищенню ефективності виробництва та зменшенню негативного впливу на довкілля. Водночас розвиток цього напрямку потребує подальшого вдосконалення обладнання, оптимізації технологічних режимів і зниження вартості впровадження.

### Результати та обговорення

У ході проведеного дослідження було встановлено, що ефективність піролізної переробки деревини значною мірою визначається параметрами технологічного процесу, передусім температурою. Отримані результати свідчать, що в інтервалі 300–600 °С відбувається інтенсивне утворення газоподібних продуктів із високою часткою метану, яка може досягати 50–70%. Це підтверджує доцільність використання піролізу як джерела відновлюваного газового палива.

Збільшення частки метану у складі біогазу є важливим показником якості, оскільки саме цей компонент визначає його енергетичну цінність. Таким чином, регулювання температурного режиму дозволяє керувати не лише кількістю, а й якістю отриманого продукту. Це створює передумови для адаптації технології під конкретні енергетичні потреби.

Для оцінки енергетичної ефективності процесу використовується рівняння теплового балансу:

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

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

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

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

Сумарна теплота продуктів порівнюється з втратами енергії в системі. Проведений аналіз показує, що значна частина втрат пов'язана з теплопередачею через конструктивні елементи установки, а також із недосконалістю ізоляції. Це вказує на необхідність технічного вдосконалення реакторів і допоміжного обладнання для підвищення загальної ефективності процесу.

Додатково було проведено експериментальне порівняння енергетичної ефективності процесу при різних температурних режимах. Встановлено, що підвищення температури з 400 °С до 500 °С забезпечує збільшення сумарної теплотворної здатності продуктів з 9,6 ГДж/т до 11,2 ГДж/т біомаси. При 600 °С спостерігалось подальше збільшення виходу газоподібної фракції, однак загальний енергетичний ефект зростав незначно через зменшення виходу рідкої фази. Експериментально встановлено, що найбільшу теплотворну здатність має біонафта — у середньому 32,5 МДж/л, тоді як теплота згоряння біовугілля становила близько 22 МДж/кг. Отриманий синтез-газ характеризувався середньою теплотою згоряння 21–23 МДж/м<sup>3</sup> залежно від температурного режиму процесу. Результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1

#### Залежність виходу продуктів піролізу від температури процесу

Температура процесу, °С	Біогаз, %	Біонафта, %	Біовугілля, %
400	22	48	30
500	27	55	18
600	35	42	23

Аналіз отриманих результатів показує, що підвищення температури від 400 °С до 500 °С сприяє збільшенню виходу рідкої фракції приблизно на 7 %, що пояснюється інтенсифікацією термічного розкладання органічних компонентів деревини. Подальше зростання температури до 600 °С

призводить до збільшення частки газоподібних продуктів внаслідок активізації реакцій вторинного крекінгу.

Встановлено, що найбільш оптимальним режимом для комплексного отримання біонафти та синтез-газу є температура близько 500 °С, за якої забезпечується максимальний сумарний енергетичний вихід продуктів. У ході дослідження також встановлено, що зі збільшенням температури піролізу зростає вміст фіксованого вуглецю у біочарі. Для зразків, отриманих при 500 °С, масова частка фіксованого вуглецю становила близько 74 %, тоді як при 400 °С — близько 61 %. Це позитивно впливає на сорбційні властивості та перспективність використання біочару в будівельних композитах і теплоізоляційних матеріалах.

Додатково виконано оцінку енергетичного потенціалу продуктів піролізу. Розрахунки показали, що при температурі 500 °С сумарний енергетичний вихід становить близько 11,2 ГДж на 1 т деревної біомаси, що на 14–18 % перевищує показники процесу при 400 °С. Отримані результати підтверджують доцільність використання середньотемпературного режиму піролізу для забезпечення найбільш ефективного перетворення деревної сировини в енергетично цінні продукти.

Окрему роль у підвищенні ефективності відіграє використання каталізаторів. Застосування металевих оксидів сприяє більш глибокому розкладанню органічної частини деревини, що призводить до збільшення виходу рідких продуктів та покращення їх якісних характеристик. Отримана біонафта характеризується меншим вмістом небажаних домішок, що розширює можливості її використання в енергетиці та транспортному секторі.

З екологічної точки зору піроліз демонструє суттєві переваги. За результатами дослідження встановлено, що впровадження цієї технології дозволяє скоротити викиди парникових газів на 30–50% порівняно з традиційним спалюванням деревини. Це робить піроліз одним із перспективних інструментів зниження антропогенного впливу на довкілля та досягнення кліматичних цілей [16].

Разом із позитивними результатами виявлено й певні обмеження. Зокрема, встановлено, що характеристики продуктів суттєво залежать від типу деревини, її вологості та хімічного складу. Це ускладнює стандартизацію процесу та потребує додаткових досліджень для різних видів сировини. Крім того, обмежений обсяг експериментальних даних не дозволяє повністю узагальнити отримані результати, що також визначає необхідність подальших досліджень.

Економічний аналіз показує, що на початкових етапах впровадження піролізних технологій значний вплив мають капітальні витрати на обладнання та інфраструктуру. Висока вартість установок і необхідність забезпечення стабільного технологічного режиму можуть стримувати широке впровадження таких систем. Водночас при збільшенні масштабів виробництва та оптимізації процесів спостерігається тенденція до зниження собівартості продукції.

Для кількісної оцінки економічної доцільності використання піролізної технології було виконано умовний розрахунок ефективності переробки 1 т деревної біомаси. У розрахунках враховано витрати на підготовку сировини, енергозабезпечення процесу та експлуатаційне обслуговування установок. Загальні виробничі витрати прийнято на рівні 4200 грн/т сировини.

У результаті переробки 1 т деревини було отримано: 250 м<sup>3</sup> біогазу; 125 л біонафти; 70 кг біовугілля. Для оцінки економічного ефекту використано середні ринкові значення вартості продукції: біогаз - 18 грн/м<sup>3</sup>; біонафта - 32 грн/л; біовугілля - 14 грн/кг.

Тоді дохід від реалізації біогазу становитиме:

$$D_{\text{бг}} = 250 \cdot 18 = 4500 \text{ грн}$$

Дохід від реалізації біонафти:

$$D_{\text{бн}} = 125 \cdot 32 = 4000 \text{ грн}$$

Дохід від реалізації біовугілля:

$$D_{\text{бв}} = 70 \cdot 14 = 980 \text{ грн}$$

Сумарний дохід від переробки визначається за формулою:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{бг}} + D_{\text{бн}} + D_{\text{бв}} = 4500 + 4000 + 980 = 9480 \text{ грн} \quad (10)$$

Відповідно, орієнтовний прибуток процесу:

$$P = D_{\text{заг}} - C_{\text{вир}} = 9480 - 4200 = 5280 \quad (11)$$

Рівень рентабельності технології визначається співвідношенням прибутку до виробничих витрат:

$$R = \frac{P}{C_{\text{вир}}} \times 100\% = \frac{5280}{4200} \times 100\% = 125,7\% \quad (12)$$

Отримані результати свідчать про достатньо високий рівень економічної ефективності піролізної переробки деревної біомаси навіть за умов середніх ринкових показників. Додаткове підвищення

економічної доцільності може забезпечуватися за рахунок використання відходів деревообробної промисловості та часткового енергозабезпечення нологічного процесу синтез-газом власного виробництва. Слід також враховувати, що використання відходів деревини як сировини дозволяє частково компенсувати витрати за рахунок зменшення витрат на утилізацію та отримання додаткових продуктів. У довгостроковій перспективі це може забезпечити позитивний економічний ефект, особливо в умовах зростання попиту на відновлювані джерела енергії.

Узагальнюючи результати, можна зазначити, що піроліз є багатофункціональною технологією, яка поєднує енергетичну, екологічну та ресурсозберігаючу складові. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із удосконаленням технологічних режимів, підвищенням якості кінцевих продуктів і зниженням витрат на їх виробництво. Це створює передумови для більш широкого впровадження піролізу в сучасних енергетичних системах.

### Висновки

У ході проведеного дослідження було реалізовано оцінку ефективності застосування технології піролізу для переробки деревної біомаси. Узагальнення отриманих результатів дозволило встановити залежність між температурними параметрами процесу та характером утворення основних продуктів, а також кількісно описати їх розподіл. Піроліз деревини доцільно розглядати як один із перспективних напрямів термохімічної конверсії біомаси в контексті розвитку відновлюваної енергетики. Процес базується на термічному розкладанні органічної сировини в безкисневому середовищі, що забезпечує формування трьох основних фракцій – рідкої, твердої та газоподібної. Отримані результати підтверджують, що мова йде не про «збільшення енергії», а про ефективний перерозподіл енергетичного потенціалу вихідної сировини між продуктами конверсії.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що оптимальний температурний режим процесу для комплексного отримання біонафти та синтез-газу становить близько 500 °С. За цих умов сумарний енергетичний вихід продуктів досягає 11,2 ГДж на 1 т деревної біомаси, а рентабельність процесу може перевищувати 120 %. Встановлено, що співвідношення продуктів є технологічно керованим і змінюється залежно від режиму процесу. У середньому для більшості умов характерним є вихід біоолії на рівні 55–65 %, біоچارу – 15–25 %, а синтез-газу – 15–25 %. Така варіативність відкриває можливості цільового налаштування процесу під конкретні енергетичні або технологічні задачі. Рідка фракція може застосовуватися як альтернативне паливо, тверда – як ґрунтова добавка з покращеними сорбційними властивостями, а газоподібна – як паливо або проміжна сировина для подальшого хімічного синтезу.

Таблиця 2

#### Порівняння екологічних показників різних методів переробки біомаси

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

Дані свідчать про зниження викидів парникових газів та зменшення обсягів вторинних відходів, що формує передумови для більш екологічно збалансованих енергетичних рішень. Порівняльні результати демонструють, що піроліз займає проміжне, але екологічно більш сприятливе положення серед термохімічних методів, суттєво поступаючись традиційному спалюванню за рівнем викидів та наближаючись до більш екологічно безпечних біотехнологічних процесів. Узагальнення результатів дозволяє зробити висновок про наукову та прикладну цінність досліджуваної технології. Піроліз може розглядатися як ефективний підхід до комплексної переробки біомаси з одночасним отриманням енергетично та матеріально цінних продуктів. Отримані результати підтверджують доцільність подальшого розвитку цього напрямку в контексті декарбонізації енергетики та підвищення ресурсної ефективності.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на поглиблену оптимізацію режимів процесу, розширення спектра використовуваної сировини та інтеграцію піролізних систем у діючі енергетичні й агропромислові комплекси. Окрему увагу слід приділити аналізу впливу технологічних параметрів на якість і стабільність кінцевих продуктів.

Отримані результати дослідження мають прикладне значення для різних галузей народного господарства, зокрема будівельної галузі, оскільки сучасні будівельні та промислові об'єкти

характеризуються високим рівнем енергоспоживання та потребують впровадження альтернативних джерел енергії. Продукти термохімічної переробки деревної біомаси, зокрема синтез-газ, біонафта та біовугілля, можуть використовуватися як локальні енергоносії для систем теплопостачання будівель, котельних установок та автономних енергетичних комплексів. Крім того, біовугілля може застосовуватися у будівельному матеріалознавстві як модифікуюча добавка до композитних матеріалів, зокрема бетонів і теплоізоляційних виробів, що сприяє покращенню їх теплофізичних та сорбційних характеристик, а також підвищенню довговічності будівельних конструкцій. Таким чином, результати дослідження можуть бути інтегровані в сучасні технології енергоефективного будівництва та концепцію «зелених» будівель.

Для більш ґрунтовного опрацювання тематики рекомендовано використовувати наукові праці, присвячені термохімічній конверсії деревної біомаси, енергетичній ефективності піролізу та його екологічним характеристикам.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В.І. Зубенко, О.В. Епік “Енергетичні та економічні показники технології швидкого піролізу в абляційному реакторі швидкого типу” Україна, Київ, Україна: Інститут технічної теплофізики НАН <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.10>
- [2] Ю. Лю, «Екологічні переваги біовугілля: огляд літератури. Відновлювані та сталі джерела енергії». Energy Reviews, 2016, Том. 56. с. 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.jieec.2016.06.002>
- [3] Алєн А. Вертєс, Насіб Курєші, Ганс П. Блашек, Хїдеакї Юкава «Від біомаси до біопалива: стратегії для світової промисловості», видавництво John Wiley & Sons, 2011 р., с. 30. <https://doi.org/10.1002/9780470750025>
- [4] В. Малолїтнєва “Створєння конкурєнтного ринку біопалива в Українї” Київ, Україна: Інститут економїко-правових дослїджєнь їменї В.К. Мамутова Національної академїї наук, 2022, с. 10. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2022.05.26>
- [5] А. Марїя Рїццо «Пїролїз біомаси для отримання рїдких біопалив: виробництво та використання» Консорціум з дослїджєнь та розробок у галузї відновлюваних джерел енергїї, 2015 р., с. 108. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3091.5045>
- [6] А. В. Брїдгвотєр «Огляд швидкого пїролїзу біомаси та пїдвищєння якостї продуктїв», Дослїдницька група з бїоенергетики Астонського унїверситету, Бїрмінгем, Велика Британїя: Aston Triangle, 2011 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- [7] О. Коваль, І. Мєльнїк та В. Сїдорєнко, «Роль пїролїзу в управлїнні вїдходами та виробництві енергїї в Українї. Екологїчні дослїджєння», Київ, Україна, 2020, с. 123–135.
- [8] М. Кумар, Адєтойєсє О. Оєдун, А. Кумар «Від біомаси до бїоенергїї: огляд технологїї та процесїв». Renewable and Sustainable Energy Review, Едмонтон, Канада: Іновациїний їнженєрний центр «Донадєо», Унїверситет Альберти, 2018, с. 1140–1154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.270>
- [9] Є.В. Скляренко “Створєння пїролїзної технологїї та установки для термохімічної консервацїї рослинної біомаси” - Київ, Україна: НАН Українї, Ін-т технічної теплофізики, 2017, с. 28 .
- [10] П. Басу «Газифїкацїя та пїролїз біомаси. Практичне проєктування та теорїя». Далхаузї, Канада: Унїверситет Далхаузї та Greenfield Research Incorporated, 2010 <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20099-7>
- [11] Р. С. Кукана, «Роль бїовугїлля в управлїнні вуглєдем та поживними рєчовинами ґрунту. Дослїджєння ґрунтїв», «Australian Journal of Soil Research», 2011, с. 627–637. <https://doi.org/10.1071/SR10007>
- [12] Ваєль М. Семїда, Хамада Р. Бєхєїрї, Мамуду Сєтаму, Кєтрїн Р. Сїмпсон, Тая А. Абд Ель-Магїд, Мостафа М. Радї, Шад Д. Нєльсон «Значєння бїовугїлля для сталого сїльського господарства та довкїлля: огляд». Фаум, Єгїпет, 2019, с. 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015>
- [13] Дж. Арєнфєльдт, Т. П. Томсєн, У. Генрїксєн, Л. Р. Клаусєн «Когєнерация на основї газифїкацїї біомаси. Огляд сучасного стану технологїї та перспектив на найблїжчє майбутнє». Роскїлле, Данїя: Національна лабораторїя з питань сталого енергозабезпєчення, 2011 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.040>
- [14] Р. Титко, В. Калїнічєнко “Вїдновлювальнї джерела енергїї” Варшава, Польща: Вид-во OWG, 2010, с.530. <http://elib.chdttu.edu.ua/e-books/4163>
- [15] Дж. Лєманн та С. Дїозєф, «Бїовугїлля для управлїння навколишнім середовищєм: наука, технологїї та впроваджєння». Видавництво «Routledge», Лондон, 2015 р., 976 с. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>

## REFERENCES

- [1] V.I. Zubenko, O.V. Epic “Energy and Economic Performance of Rapid Pyrolysis Technology in a Rapid-Type Ablation Reactor,” Kyiv, Ukraine: Institute of Technical Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.10>
- [2] Y. Liu, “Environmental benefits of biochar: A review of the literature. Renewable and Sustainable “. Energy Reviews, 2016, Vol. 56. pp. 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.jieec.2016.06.002>
- [3] 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>
- [4] V. Malolitneva, “Creating a Competitive Biofuel Market in Ukraine,” Kyiv, Ukraine: V.K. Mamutov Institute of Economic and Legal Research of the National Academy of Sciences, 2022, p. 10. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2022.05.26>
- [5] A. Maria Rizzo «Biomass pyrolysis for liquid biofuels: production and use» Renewable Energy Consortium for R&D 2015, pp. 108. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3091.5045>
- [6] 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>

- [7] 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.
- [8] 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>
- [9] Y.V. Sklyarenko, "Development of Pyrolysis Technology and a Plant for the Thermochemical Preservation of Plant Biomass" – Kyiv, Ukraine: National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Technical Thermodynamics, 2017, p. 28.
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] R. Titko, V. Kalinichenko, "Renewable Energy Sources", Warsaw, Poland: OWG Publishing, 2010, p. 530. <http://elib.chdntu.edu.ua/e-books/4163>
- [15] J. Lehmann, & S. Joseph, "Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Routledge." Routledge, London, 2015, pp. 976. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>

**Жук Дмитро Вячеславович** – аспірант, кафедра інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [DmitroZhuk333@gmail.com](mailto:DmitroZhuk333@gmail.com)

**Коц Іван Васильович** – к.т.н, професор кафедри інженерних систем у будівництві, завідувач НДЛ гідродинаміки Вінницького національного технічного університету, e-mail: [ivan.kots.2014@gmail.com](mailto:ivan.kots.2014@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0870-6385

**D.V. Zhuk**  
**I.V. Kots**

## PYROLYSIS TECHNOLOGIES FOR WOOD CONVERSION INTO BIOGAS AND BIO-OIL: OPPORTUNITIES AND PROSPECTS

Vinnitsia National Technical University

*This article examines the process of wood pyrolysis as an effective method for converting biomass into renewable energy sources with high energy potential. Pyrolysis, which involves the thermal decomposition of organic raw materials in the absence of or with limited access to oxygen, in the construction and industrial sectors, pyrolysis helps improve energy efficiency, reduce waste, and promote the development of alternative energy sources, produces three main products: bio-oil (liquid fuel), biochar (carbon residue), and synthesis gas (a mixture of hydrogen, carbon monoxide, and methane). Each of these products has specific properties, advantages, and applications. Bio-oil can be used as an alternative to diesel fuel in power plants, biochar as a soil conditioner, fertilizer, sorbent, or activated carbon, and synthesis gas as fuel for electricity generation or as a feedstock for the chemical industry, particularly for the synthesis of methanol, ammonia, and hydrogen.*

*This paper presents the basic equations and relationships for estimating the energy potential of biomass, taking into account its moisture content, density, calorific value, and elemental composition. It also examines approaches to determining the yield of pyrolysis products depending on the process temperature, heating rate, treatment duration, and type of wood. Particular attention is paid to the analysis of the average heat of combustion of the resulting products, which allows for an assessment of their energy efficiency and the feasibility of their use under various conditions. It is shown that the use of pyrolysis contributes to a significant reduction in CO<sub>2</sub> emissions compared to direct wood combustion or the use of fossil fuels.*

*Particular emphasis is placed on the environmental benefits of the technology and the possibilities for its integration into modern agricultural systems. Biochar produced through pyrolysis serves as a stable source of carbon in the soil, improving its structure, water-holding capacity, microbial activity, and overall fertility. The results confirm the feasibility of widespread implementation of wood pyrolysis technologies as an element of the circular economy, aimed at reducing anthropogenic impact on the environment, developing environmentally safe energy, and promoting the rational use of natural resources.*

**Keywords:** biomass; pyrolysis; bioenergy; heat of combustion; renewable energy sources; CO<sub>2</sub> emissions.

**Zhuk Dmytro Vyacheslavovich** – Postgraduate student of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnitsia, National Technical University, e-mail: [DmitroZhuk333@gmail.com](mailto:DmitroZhuk333@gmail.com)

**Kots Ivan Vasilyovich** – Ph.D., professor of the Department of Engineering Systems in Construction, head of the hydrodynamics research laboratory of the Vinnitsia National Technical University, ORCID: 0000-0003-0870-6385, e-mail: [ivan.kots.2014@gmail.com](mailto:ivan.kots.2014@gmail.com).