

УДК 620.925:581.115.

Д. В. Жук; І. В. Коц, канд. техн. наук, проф.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕХНІЧНЕ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ І ПЕРЕРОБЛЕННЯ ДЕРЕВНИХ ВІДХОДІВ ТА ОТРИМАННЯ СИНТЕЗ-ГАЗУ, БІОНАФТИ І ДЕРЕВНОГО ВУГІЛЛЯ

Статтю присвячено комплексному аналізу сучасних технологій і технічних засобів, що використовуються для утилізації та перероблення деревних відходів із метою отримання корисних продуктів, зокрема синтез-газу, біонафти й деревного вугілля. Особлива увага зосереджена на термохімічних методах: піролізі, газифікації та торрефікації, які є перспективними способами глибокої переробки біомаси для подальшого використання в енергетичних і хімічних процесах. Наведено та охарактеризовано особливості технологічного обладнання, яке забезпечує стабільність і ефективність перетворення сировини в цільові продукти.

Представлено класифікацію установок за конструкцією, режимами роботи та продуктивністю, з урахуванням особливостей автоматизації, систем контролю й регулювання технологічних параметрів. Проведено порівняльний аналіз переваг і недоліків окремих підходів, враховуючи тип деревної сировини, параметри термічної обробки та сфери подальшого застосування кінцевих продуктів. Визначено можливості застосування синтез-газу для виробництва теплової й електричної енергії, біонафти – як моторного пального з низьким вмістом сірки, а деревного вугілля – як адсорбенту, технологічного реагенту або твердого біопалива.

Окремо наголошено на екологічних перевагах таких рішень: зниженні викидів парникових газів, зменшенні обсягів захоронення відходів, а також зменшенні залежності від викопного палива, що особливо актуально в контексті сучасних викликів сталого розвитку. Підкреслено значення термохімічних методів переробки деревних відходів для підвищення енергоефективності, зокрема через використання синтез-газу, біонафти та деревного вугілля як альтернативних енергоресурсів у сучасних енергетичних системах. Зроблено висновок, що термохімічна конверсія деревини є важливим напрямом для підвищення енергоефективності, покращення екологічної ситуації та забезпечення стабільного ресурсного потенціалу енергетичної й хімічної промисловості України.

Ключові слова: синтез-газ, деревина, деревне вугілля, біонафта, піроліз, альтернативні джерела енергії, повільний піроліз, швидкий піроліз, газифікація, торрефікація.

Вступ

У сучасному світі утилізація та перероблення деревних відходів стає все більш актуальною, оскільки ми стикаємося зі зростаючими екологічними проблемами та зростаючою необхідністю у сталому використанні природних ресурсів. Розгляд цієї проблеми стає надзвичайно важливим, оскільки ми шукаємо ефективні та екологічно безпечні методи зменшення негативного впливу на довкілля та впровадження нових джерел енергії.

Використання відновлюваних джерел енергії набуває все більшого значення у світовому енергетичному ландшафті, а деревина, як одне з основних джерел біомаси, є широко застосовуваною. Проте ефективна утилізація та перероблення деревних відходів залишається складним завданням через їхні великі обсяги та складний хімічний склад. Розв'язання цієї проблеми вимагає комплексного підходу, який враховує технологічні, екологічні та економічні аспекти.

У цьому контексті технології та технічне устаткування для утилізації та перероблення деревних відходів стають особливо важливими. Використання сучасних методів та інноваційних рішень у цій сфері може сприяти зменшенню викидів шкідливих речовин у

повітря та сприяти переходу до більш сталої та екологічно чистої енергетики [1].

Буде детально розглянуто основні технології та технічне устаткування, які використовуються для утилізації та перероблення деревних відходів з метою отримання синтез-газу, біонафти та деревного вугілля. Висвітлито принципи їхньої роботи, переваги та обмеження, а також можливості їхнього впровадження в сучасні енергетичні системи.

Будемо розглядати не лише технічні аспекти утилізації деревних відходів, але й їхні потенційні можливості забезпечення енергетичних потреб суспільства та зменшення вуглецевого сліду. Вивчення можливостей отримання синтез-газу, біонафти та деревного вугілля здійснюється з метою не лише зменшення впливу на навколишнє середовище, але і розвитку нових джерел енергії, які можуть стати ключовими для забезпечення енергетичної безпеки та сталого розвитку.

Мета і завдання досліджень

Головною **метою** цього наукового дослідження є аналіз технологій та технічного устаткування, які використовуються для утилізації та перероблення деревних відходів з метою отримання синтез-газу, біонафти і деревного вугілля. Дослідження спрямоване на розкриття принципів роботи таких технологій, їхніх переваг та обмежень, а також потенційних можливостей застосування в сучасних енергетичних системах.

Утилізація та перероблення деревних відходів має велике значення для зменшення впливу на довкілля та підвищення енергоефективності. Використання передових технологій для отримання синтез-газу, біонафти та деревного вугілля з деревних відходів може бути економічно вигідним та сприяти зниженню викидів парникових газів.

Для досягнення цієї мети потрібні інноваційні підходи та використання передових технологій, таких як процеси піролізу, газифікації та каталітичного конвертування. Основним завданням є ефективне використання сировини та мінімізація втрат.

Розробка таких технологій може мати потенціал застосування у різних галузях, включаючи енергетику, хімічну промисловість та виробництво біопалива. Важливо також враховувати стандарти екологічної безпеки та дотримуватися вимог щодо викидів та обробки відходів [2].

Загалом, розробка технологій та технічного устаткування для утилізації і перероблення деревних відходів та отримання синтез-газу, біонафти і деревного вугілля є важливим напрямком досліджень і розвитку, який сприяє збереженню ресурсів та зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

1. Термохімічні 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 деревини, але й виробляють корисні речовини для промисловості. За останні десятиліття збільшення населення та постійне зростання попиту на джерела енергії дозволили розвинути обширні дослідження та розробки альтернативних видів палива [3]. Але покищо 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 довкіл्लю. 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 [4]. Розрізняють два

методи: **повільний піроліз** – це процес термічного розкладу органічних матеріалів, таких як деревина, за низьких температур та у відсутності повного доступу до повітря, та **швидкий піроліз** – це процес термохімічного розкладу біомаси відбувається за високих температур (зазвичай в діапазоні 400 – 800 градусів Цельсія) у відсутності повітря або за мінімальної його кількості. Процес відбувається в спеціальних реакторах (піролізері), де біомаса поділяється високими температурами на гази, рідке паливо (біонафту), і тверді вуглецевмісні залишки (вугілля) [5]. 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 [6].

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 [4].

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; розгорнута технологія 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 [5].

Також широкого 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 [7].

Газифікація біомаси відіграє важливу роль у перетворенні відновлюваного матеріалу на енергію та хімічні продукти [8]. 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 [9].

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 [10]. У результаті цього процесу відбувається видалення вологи та летких органічних речовин, що призводить до підвищення енергетичної щільності біомаси та полегшує її транспортування та зберігання.

Торрефікована біомаса може бути використана як паливо для теплового або електрогенеруючого устаткування, а також для виробництва синтез-газу або біонафти [11]. 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 [12]. 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 [13]. Термохімічне конвертування ґрунтується на використанні хімічних реакцій, які відбуваються під високим тиском та температурою, що призводить до розкладу вуглеводневих матеріалів та видалення газової фази [7].

Термохімічне конвертування вуглеводневих матеріалів має широке потенційне 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 може потребувати значних витрат на будівництво та обслуговування виробничих потужностей, а також мати 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.

Термохімічні методи, згідно з діаграмою, наведеною на рис. 1., поділяються на три основні напрямки: спалювання, піроліз та газифікація.



Рис. 1. Порівняльна діаграма термохімічних процесів

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.

2. Застосування деревного вугілля

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 відновлюване джерело, допомагаючи зменшити залежність від традиційних видів палива. У сфері поліпшення якості ґрунту, воно може бути використане для створення біопалива. Очищення від важких металів стає можливим завдяки адсорбційним властивостям біологічного вугілля, яке може виводити забруднення з навколишнього середовища.

Дослідження в галузі 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 каталізатора 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.

3. Застосування синтез-газу

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 [12]. Крім того, використання деревини як сировини дозволяє зменшити залежність від невідновлюваних джерел енергії [13].

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.

4. Застосування біонафти

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 [14].

Має широкий спектр застосувань у різних сферах промисловості. Вона може бути використана для виробництва біодизелю, керосину, мазуту та інших видів палива [15]. Крім того, біонафта може бути використана як сировина для виробництва хімічних речовин, таких як пластмаси, синтетичні смоли та інші продукти [16].

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.

5. Устаткування та принцип роботи

Утилізація деревних відходів та їх переробка 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 відсутності кисню або його частковій відсутності, що дозволяє отримувати корисні продукти.

Устаткування класифікується за конструкцією, режимом роботи, продуктивністю, а також рівнем автоматизації та системами контролю технологічних параметрів. З конструктивного погляду, широкого поширення набули піролізні установки барабанного типу, які забезпечують рівномірне прогрівання деревної маси й ефективно вилучення летких речовин. Крім них, використовуються ретортні або реакторні установки, що працюють у безкисневому середовищі та дозволяють точно керувати процесом, отримуючи більшу кількість біонафти та синтез-газу. Для генерації газу з більших фракцій деревини застосовують шахтні

установки, які простіші за конструкцією, але поступаються за точністю регулювання параметрів.

За режимами роботи установки поділяються на періодичні, які потребують зупинок для завантаження та вивантаження, і безперервні, що забезпечують стабільну продуктивність та придатні для обробки значних обсягів відходів. Останні є більш ефективними з енергетичної точки зору й дозволяють краще інтегрувати систему автоматизації.

Сучасне устаткування обладнується автоматизованими системами керування на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК), що дає змогу підтримувати оптимальні умови термічної обробки. До основних параметрів, які контролюються в реальному часі, належать: температура, тиск, швидкість потоку газів та концентрація окремих компонентів у продуктах переробки. Це дозволяє гнучко реагувати на зміну властивостей сировини та керувати співвідношенням утворення цільових продуктів.

Обраний тип обладнання та режим його роботи безпосередньо впливають на ефективність процесу та якість кінцевих продуктів. Зокрема, синтез-газ може бути використаний як джерело теплової або електричної енергії, біонафта – як моторне паливо з низьким вмістом сірки, а деревне вугілля – як адсорбент, технологічний реагент або тверде біопаливо. Вибір конкретної технології базується на типі деревної сировини, бажаних характеристиках продуктів та сфері їх подальшого застосування.

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. 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.

Схема та графіки технології переробки відходів деревини наведені на рис. 2, рис. 3: 1-сировина, 2-реактор, 3-пристрій підігріву, 4-конденсатор, 5-гідрозатвор, 6-система очистки газів, 7-облік газу, 8-зберігання або споживач газу, 9-зберігання або використання деревеного вугілля, 10-зберігання або використання біонафти.

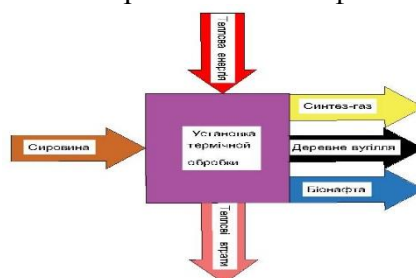


Рис. 2. Узагальнена схема технології переробки деревних відходів

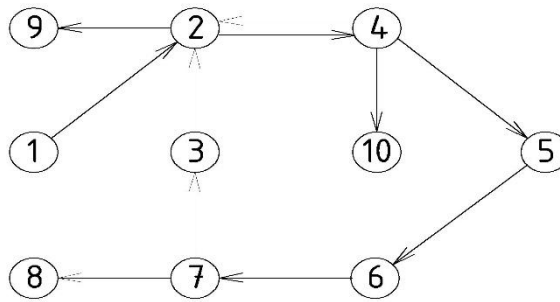


Рис. 3. Граф установок переробки відходів деревини

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 енергій і сприятиме розвитку економіки усіх держав, зокрема і Україні [16].

Висновки

У статті було розглянуто технології, що використовуються для утилізації та перероблення деревних відходів з метою отримання синтез-газу, біонафти і деревного вугілля. Огляд сучасних методів та розгляд їхнього потенціалу в контексті вирішення екологічних та енергетичних проблем показав, що використання біомаси може бути важливим кроком у зменшенні залежності від нестабільних джерел енергії та зменшенні викидів парникових газів.

Висновки з аналізу різних технологій утилізації та перероблення деревних відходів показали, що кожен з методів має свої переваги та обмеження. Правильний вибір типу устаткування та режиму його роботи є ключовим для досягнення високої ефективності переробки деревних відходів. Врахування конструкційних особливостей, рівня автоматизації та специфіки сировини дозволяє оптимізувати вихід цільових продуктів і забезпечити їх стабільну якість для подальшого енергетичного чи промислового використання. Більшість досліджень зосереджується на ефективному використанні цих продуктів у виробництві енергії, що може сприяти розвитку сталої енергетики та зменшенню негативного впливу на довкілля. Проте важливо також розглядати можливості використання отриманих продуктів у інших сферах, таких як: хімічна промисловість або транспорт.

Загалом, дослідження показали, що технології та технічне устаткування для утилізації та перероблення деревних відходів мають великий потенціал у розвитку енергетичного сектору та зменшенні відходів, проте їхнє впровадження потребує комплексного підходу та підтримки з боку держави та бізнесу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zubenko V. I., Epik O.V., Antonenko V. O., Oliynyk E.M. Energy and economic indicators of fast ablative pyrolysis technology with cone screw reactor. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2018. №40 (3). P. 76 – 84. URL: <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.10>.
2. Peterson Ben. Wood Gasifier Builder's Bible: Transform Tree Branches into Free Bio-fuel in Minutes. Create Space Independent Publishing Platform, 2017. 284 p.
3. Liu Y. Environmental benefits of biochar: A review of the literature. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 2016. P.102–110.

4. Chiaramonti D., Oasmaa A., Solantausta Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. August 2007. Volume 11, Issue 6. P. 1056–1086. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.008>.
5. Basu P. Biomass gasification and pyrolysis. Practical design and theory. Canada: Academic Press, 2010. URL: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20099-7>.
6. Uisung L., Elango B., Chung J. N. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications. *Applied Energy*. January 2013. Volume 101. P. 699–708. URL: <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.07.036>.
7. Lédé J. Biomass fast pyrolysis reactors: a review of a few scientific challenges and of recommended research topics. *Oil Gas Sci. Technol.–Rev. IFP Energies Nov*. 2013. P. 801–814.
8. Barry D. Solomon. Renewable Energy from Forest Resources in the United States. London, United Kingdom, Routledge. 2008. 352 p. URL: <https://doi.org/10.4324/9780203888421>.
9. Heyne S., Liliedahl T. Biomass Gasification - A synthesis of technical barriers and current research issues for deployment at large scale. *F3 centre*. 2013. Vol. 5. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2593.8406>.
10. Lou R., Shu B. Wu. Products properties from fast pyrolysis of enzymatic/mild acidolysis lignin. *Applied Energy*. 2011. Volume 88, Issue 1. P. 316–322. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.028>.
11. Buljit B., Pinakeswar M., Vijayand S. M. Thermodynamic optimization of biomass gasification for decentralized power generation and Fischere-Tropsch synthesis. *Energy*. June 2010. Volume 35, Issue 6. P. 2557–2579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.003>.
12. Склярєнко Є. В. Створення піролізної технології та установки для термохімічної консервації рослинної біомаси. Київ, Україна: НАН України, Ін-т технічної теплофізики, 2017. с. 27.
13. Кабінет Міністрів України, 2 сесія (2017, серп. 18) № 605-р. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>.
14. Титко Р., Калініченко В. Відновлювальні джерела енергії. Варшава, Польща: Вид-во OWG, 2010. 530 с. URL: <http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4163>.
15. Alain A. Vertès, Nasib Qureshi, Hans P. Blaschek, Hideaki Yukawa. Biomass to Biofuels: Strategies for Global Industries. John Wiley & Sons, 2011. 559 p. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470750025>.
16. Dahlquist E. Technologies for converting biomass to useful energy: combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation. London, United Kingdom: School of Sustainable Development of Society and Technology, 2013. 520 p. URL: <https://doi.org/10.1201/b14561>.

Рекомендована кафедрою інженерних систем у будівництві.

Стаття надійшла до редакції 09.06.2025.

Стаття пройшла рецензування 29.06.2025.

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

Коц Іван Васильович – канд. техн. наук, професор кафедри інженерних систем у будівництві, завідувач НДІ гідродинаміки, ORCID: 0000-0003-0870-6385, e-mail: ivan.kots.2014@gmail.com.
Вінницький національний технічний університет.