

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
Інститут деревообробних технологій і дизайну  
Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини  
та безпеки життєдіяльності

## **Пояснювальна записка**

до дипломної роботи магістра на тему

# **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОВУГІЛЛЯ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА ДЛЯ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

**Виконав:** студент групи ТЗНС-62м  
спеціальності 183 Технології захисту  
навколишнього середовища  
Стасюк М.М.

**Керівник:** ст. викл., к.б.н. Маєвська О.М.

**Рецензент:** доц., к.х.н. Демчина Р.О.  
(прізвище та ініціали)

Львів – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**

Інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Зав. кафедри:** ТЗНСДБЖД

проф. Кшивецький Б.Я.

"30" вересня 2024 року

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРУ**

Стасюку Максиму Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Перспективи використання біовугілля як альтернативного палива для металургійної промисловості

Керівник проєкту Масвська О.М., ст. викл., к.б.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від "17" липня 2024 року №С-469

2. Термін подання студентом роботи 11.12.2024 року
  3. Вихідні дані до проєкту: технологічні дані по переробленню низькосортної деревини і деревинних залишків в деревне вугілля
  4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)
    1. *Стан вивчення питання*
    2. *Технології одержання деревного вугілля*
    3. *Перспективи застосування деревного вугілля в металургійній галузі України із врахуванням досвіду розвинутих країн*
    4. *Виробництво деревного вугілля на Перечинському лісохімічному комбінаті:*
    5. *Охорона праці і безпека в надзвичайних умовах*
- Висновки*  
*Використані літературні джерела*  
*Презентація доповіді у слайдах*

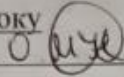
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
5.1	Доц. Сторожук В.М.	20.11.24	02.12.24
5.2	Доц. Сторожук В.М.	20.11.24	02.12.24
5.3	Доц. Сторожук В.М.	20.11.24	02.12.24
5.4	Доц. Сторожук В.М.	20.11.24	02.12.24

7. Дата видачі завдання 4.09.2024 року

Керівник проекту

  
(підпис)

Маєвська О.М.

(прізвище, ініціали)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Стан вивчення питання	До 27.09.24	
2	Технології одержання деревного вугілля	До 21.10.24	
3	Перспективи застосування деревного вугілля в металургійній галузі України із врахуванням досвіду розвинутих країн	До 14.11.24	
4	Виробництво деревного вугілля на Перечинському лісохімічному комбінаті	До 22.11.24	
5	Охорона праці і безпека в надзвичайних умовах	До 03.12.24	
6	Оформлення магістерської роботи	До 11.12.24	

Студент

\_\_\_\_\_ Стасюк М.М.

(підпис)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Маєвська О.М.

(підпис)

## АНОТАЦІЯ

Тема дипломної роботи магістра – «Перспективи використання біовугілля як альтернативного палива для металургійної промисловості».

Ця магістерська робота присвячена вивченню технології отримання деревного вугілля та дослідження можливостей його використання для потреб металургійної галузі. Перший розділ роботи присвячений розгляду видів лісопереробної сировини як позиціонується як відходи для виробництва деревного вугілля. Також у цьому розділі дане трактування терміну «біовугілля» та його відповідності поняттю «деревне вугілля»

Другий розділ роботи детально характеризує технології отримання деревного вугілля та застосовуване при цьому обладнання, аналізує переваги і недоліки різних способів.

У третьому розділі проводиться аналіз металургійної галузі України до і після повномасштабного вторгнення, аналізуються можливості використання деревного вугілля як палива, що потенційно може замінити коксівне вугілля.

Аналіз технології отримання деревного вугілля на Перечинському лісохімічному комбінаті, способи його використання та калькуляція вартості отримання цього вуглецьвмісного продукту проведена у четвертому розділі.

Останній розділ роботи розглядає правила техніки безпеки, яких необхідно дотримуватись працівникам при проведенні вантажно-розвантажувальних робіт, роботі в цехах, а також при обладнанні складських та виробничих приміщень засобами протипожежної безпеки, дотримання правил щодо безпечності руху транспорту на підприємстві.

## SUMMARY

The topic of the master's thesis is «Prospects for the use of biochar as an alternative fuel for the metallurgical industry».

This master's thesis is devoted to the study of charcoal production technology and the research of the possibilities of its use for the needs of the metallurgical industry. The first chapter of the work is devoted to the types of wood processing raw materials that are positioned as waste for charcoal production. This section also provides an interpretation of the term 'biochar' and its correspondence to the concept of 'charcoal'.

The second section of the paper describes in detail the charcoal production technologies and equipment used, analysing the advantages and disadvantages of different methods.

The third section analyses the metallurgical industry of Ukraine before and after the full-scale invasion, and analyses the possibilities of using charcoal as a fuel that could potentially replace coking coal.

The fourth section analyses the technology of charcoal production at the Perechyn Forestry and Chemical Plant, the ways in which it is used, and the cost of producing this carbon-containing product.

The last section of the paper discusses the safety rules that employees must follow when carrying out loading and unloading operations, working in workshops, as well as when equipping warehouses and production facilities with fire safety equipment, and observing the rules for safe traffic at the enterprise.

## ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ	10
1.1.Тракткування терміну «деревне вугілля» і узгодження його з терміном «біовугілля»	10
1.2. Можливості використання низькосортної деревини і деревинних залишків для виробництва деревного вугілля	11
1.3. Якісний склад та фізико-хімічні властивості деревного вугілля	12
1.4. Можливості застосування деревного вугілля у різних сферах	18
1.5.Оцінювання вкладу деревного вугілля у зменшення викидів парникових газів.	21
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ДЕРЕВНОГО ВУГІЛЛЯ	24
2.1. Методи, використане обладнання, вплив на довкілля	24
2.1.1. Непромислове отримання деревного вугілля	24
2.1.2. Промислові методи отримання деревного вугілля	25
2.2. Основні технології виробництва деревного вугілля	26
2.2.1. Піроліз як найбільш поширений на українських підприємствах метод, особливості проведення різних видів піролізу	26
2.2.2. Інші технології перероблення низькосортної деревини і лісопереробних залишків в деревне вугілля: етапи проведення, обладнання, переваги і недоліки	35
РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ДЕРЕВНОГО ВУГІЛЛЯ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ДОСВІДУ РОЗВИНУТИХ КРАЇН	40
3.1. Аналіз ситуації з виробництвом сталі в Європі та перспективами використання альтернативних видів палива на металургійних підприємствах	42
3.2. Аналіз стану металургійної промисловості України на 2024 рік	45
3.3. Перспективи декарбонізації металургійної галузі в Україні	48
РОЗДІЛ 4. ВИРОБНИЦТВО ДЕРЕВНОГО ВУГІЛЛЯ НА ПЕРЕЧИНЬСЬКОМУ ЛІСОХІМІЧНОМУ КОМБІНАТІ	52
4.1. Технологія перероблення деревинної сировини	52
4.2. Калькуляція приблизної вартості деревного вугілля, виготовленого на Перечинському лісохімічному комбінаті	59

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ УМОВАХ	61
5.1. Дотримання правил охорони праці при розвантаженні сировини/завантаженні готової продукції і при виробництві деревного вугілля (у цехах підготовки сировини та піролізному цеху)	61
5.2. Заходи із дотримання правил протипожежної безпеки на складах зберігання сировини (низькосортної деревини і лісопереробних залишків) і готової продукції (деревного вугілля)	63
5.3. Вимоги до щодо дотримання правил безпеки для працівників складів сировини та готової продукції	63
5.4. Оцінювання потенційних небезпек для здоров'я працівників підприємства та забезпечення санітарно-гігієнічних норм для персоналу	65
5.5. Дотримання правил безпеки при виникненні надзвичайних ситуацій	65
ВИСНОВКИ	67
ВИКОРИСТАНІ ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА	68

## ВСТУП

Використання альтернативних джерел енергії для забезпечення роботи підприємств різних секторів економіки України є важливим як щодо забезпечення енергетичної незалежності держави, так і стосовно мінімізації негативного впливу від використання викопних палив, спалювання яких приводить до потрапляння в атмосферне повітря великого обсягу парникових газів і забруднюючих речовин. Для великої кількості підприємств переробної галузі, які працюють з сільськогосподарською чи деревинною сировиною використання залишків, які утворюються після перероблення та отримання основної продукції можливе насамперед як вторинної сировини, яку можна переробити в біометан/біогаз, які в основному використовуються як біопаливо або біовугілля, яке має більш широкі можливості для застосування. Цей продукт можна використовувати як паливо, як біодобриво, як компонент для очищення стічних вод тощо.

Важливою перевагою такого виду біологічного палива є те, що воно розглядається як вуглецево нейтральне і його використання не впливає на викиди парникових газів. Через війну Україна втратила свої позиції щодо імпорту металургійної продукції через скорочення виробничих потужностей підприємств, розташованих в зоні бойових дій чи поблизу них, а також втраті доступу до великої кількості місць видобутку коксівного вугілля. Наразі варто прорахувати перспективи відновлення цієї галузі у післявоєнний період, модернізації обладнання і запровадження сучасних технологій виробництва сталі та чавуну, зокрема й можливостей використання альтернативних видів палива, такого як деревне вугілля.

**Мета роботи:** оцінювання можливостей застосування деревного вугілля як альтернативного палива для металургійної промисловості України та його вплив на зниження викидів парникових газів. Обрахувати рентабельність отримання деревного вугілля, отриманого на конкретному підприємстві у порівнянні з вартістю аналогічних зразків на українському та закордонному

ринках, а також співставити ці цифри із вартістю викопних палив, що застосовуються у металургійній промисловості.

**Об'єкт дослідження:** деревинні залишки та отримане із них деревне вугілля

**Предмет дослідження:** процеси перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків в деревне вугілля, вартість деревного вугілля, отриманого на Перечинському лісохімічному комбінаті.

**Завдання роботи:**

- Проведення аналізу використання деревинних залишків для виробництва деревного вугілля, оцінювання фізико-хімічного складу та теплотворних показників;
- Характеристика основних етапів різних технологій виробництва деревного вугілля, оцінювання їхніх переваг і недоліків та впливу на атмосферне повітря;
- Аналіз сучасного стану металургійної галузі України та перспективи використання деревного вугілля як альтернативного палива для галузі та вплив такого заміщення на зменшення викидів парникових газів і поліпшення стану атмосферного повітря
- Аналіз технології піролізу для перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків в деревне вугілля, характеристика отриманого продукту та обрахунок рентабельності його отримання на Перечинському лісохімічному комбінаті
- Характеристика заходів з охорони праці та дотримання техніки безпеки при виробництві деревного вугілля на Перечинському лісохімічному комбінаті

## РОЗДІЛ 1. СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ

### 1.1. Трактування терміну «деревне вугілля» і узгодження його з терміном «біовугілля».

Неповне спалювання деревини, деревинних залишків чи інших органічних сировинних відходів приводить формування вуглецево вмісні продукти, для яких використовуються різні назви. На сьогоднішній час в науковій закордонній та україномовній літературі не прийнятий однозначний та уніфікований термін назви таких біовуглецевих продуктів, отриманих різними методами термічного перероблення. Для такої продукції використовуються вживаються терміни «біочар» (biochar), «агрічар» (agrichar), «деревинне вугілля» (charcoal), або якщо основним призначенням такої продукції стає застосування її як компонента добрива – soil charcoal amendments чи «гідрочар» (hydrochar) – залишковий матеріал чорного кольору, утворений вуглецем та золою внаслідок термічної обробки біомаси при гідротермальній карбонізації.

Біовугілля як деревинне вугілля (charcoal) – це вугілля, отримане в результаті піролізу сировини біологічного походження (в основному низькосортної деревини і деревинних залишків), яке використовується переважно як паливо.

Біовугілля, додане в ґрунт (agrichar) як компонент добрива (soil fertilizer), або ґрунтова добавка (soil amendment) – це вуглецевий продукт, що представлений агрономічним менеджментом як органічна альтернатива хімічним добривам, що сприятливо впливає на ґрунти.

Спроба уніфікації терміну, викладена у рекомендаціях Міжнародної Ініціативи з біовугілля (The International Biochar Initiative) зводиться до використання терміну «біовугілля». Під ним розуміється перероблена вторинна сировина, яка подається як «твердий матеріал, отриманий при термохімічному перетворенні біомаси в середовищі з обмеженим вмістом кисню» [1], під час безперервної карбонізації різних видів біомаси. Сировиною для перероблення можуть бути залишки від виробництва основної продукції у лісопереробній промисловості [2] та сільськогосподарському виробництві [3, 4]; органічні

відходи, утворені в побутовій та промисловій сферах (макулатура, органічна компонента твердих побутових відходів, підстилки тваринницьких комплексів); стічні води та їхні осади [5], водорості [6], відпрацьований біогаз [7].

У нашій роботі основний аналіз стосується перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків у твердий продукт, який традиційно називається «деревне вугілля», тому надалі в цій роботі вживатиметься саме цей термін.

## **1.2. Можливості використання низькосортної деревини і деревинних залишків для виробництва деревного вугілля.**

Лісопереробні залишки, які отримуються внаслідок деревообробних операцій, можуть подрібнюватись і надалі або спалюватись, або перероблятись у технологічну тріску. Остання в основному використовується для виробництва деревинностружкових і деревиннолокнистих плит, або як сировина на паперово-целюлозних комбінатах. Також деревинна тріска застосовується як підстилка для тваринницьких комплексів або пресується у деревинні гранули чи брикети для комерційного продажу з метою подальшого спалювання для отримання тепла. Така технологія є ресурсоощадною і енергеефективною і використовується в основному для одержання тепла для побутових споживачів або забезпечення теплом приміщень промислових підприємств.

До лісопереробної сировини, яка може використовуватись для перероблення і подальшого отримання з них деревного вугілля, відносяться такі: низькосортна деревина, а також деревинні залишки, які залишаються після проведення технологічних операцій щодо деревини: тирса, тріска, стружка, або вирізки некондиційної деревини (обапіл, гілки, сучки, пеньки, кора). Коротка характеристика деревинних залишків для перероблення їх у деревне вугілля наведена нижче.

Тирса – дрібні частинки, що утворюються при проведенні розпилювання деревини за допомогою деревообробного обладнання чи ручних інструментів

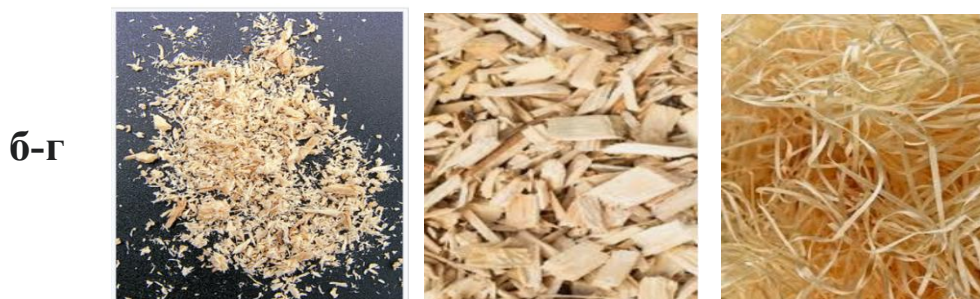
Тріска – подрібнена деревина певних чи довільних розмірів, яка одержується при переробленні деревини рубальним обладнанням.

Стружка – поверхневий шар деревини, відокремлений від неї зрізанням за допомогою спеціалізованих інструментів.

До вирізок некондиційної деревини відносяться:

- Опабіл – крайня зовнішня частина колоди, що отримується при її розпилюванні вздовж (горбильні обаполи характеризуються зовнішньою непропиляною або пропиляною частково поверхнею, тоді як дощаті обаполи мають більш на половину пропиляну зовнішню поверхню)
- Гілки – бокові відростки дерева, які відкидаються як відходи
- Сучки – частина бокового відростка, що росте із стовбура дерева, видаляється із стовбура при вирізання колод
- Пеньки – нижня частина стовбура дерева, що утворились після його спиляння і були викорчовані із землі
- Кора – зовнішня частина стовбура дерева, яку знімають за допомогою окорювальних верстатів

Приклади перерахованих типів, а саме низькосортної деревини і деревинних залишків наведені на рис. 1.



Г-е



Є-Ж



Рис. 1. Лісопереробна сировина, що використовується для отримання деревного вугілля: а – низькосортна деревина; б – тирса; в – тріска; г – стружка; г – опабіл; д – гілки; е– сучки; є – пеньки; ж – кора (фотографії взяті із сайтів Вікіпедії <https://uk.wikipedia.org>)

### 1.3. Якісний склад та фізико-хімічні властивості біовугілля.

**Вплив характеристик сировини на склад деревного вугілля.** Хімічний склад сировини, її вологість та розмір перероблюваних решток, а також тип технологічного процесу впливають на кінцеві характеристики отриманого продукту [8].

Однією з найбільш важливих складових, яка характеризує деревинні залишки, що використовуються для виробництва деревного вугілля, є вміст золи. Відповідно виділяють дві категорії:

1) низьковуглецева золовмісна сировина (3-5%) – низькосортна деревина і всі види деревинних залишків, наведених на рис. 1, окрім кори. Деревне вугілля із них має високу щільність і пористість, характеризується великою площею поверхні і добре утримує вологу

2) золовмісна сировина 10-13%) – представлена корою дере і володіє високою здатністю до обміну катіонами [9].

Фізико-хімічний склад низькосортної деревини і деревинних залишків, зокрема високий вміст лігніну і вуглецю та низький вміст азоту впливає на протікання технологічного процесу, в ході якого утворюється деревне вугілля. Карбонізація сприяє розкладанню частини біомаси і зберігає значну кількість вуглецю. Наявність більшого вмісту цього елемента у деревному вугіллі робить його більш придатним до використання у певних технологічних процесах [11-14].

### **Вплив деяких чинників технологічного процесу на фізико-хімічні властивості деревного вугілля.**

Характеристики деревного вугілля визначаються як особливостями компонентного складу сировини, так і умовами проведення технологічного процесу (температурою, швидкістю нагрівання, тиском, тривалістю окремих етапів, щільністю сировини тощо). До таких відносяться насамперед фізико-хімічні властивості деревного вугілля, зокрема співвідношення у елементному складі, рН, густина і пористість, площа поглинання, механічна стабільність та інші.

Найважливішим фактором, який впливає на фізико-хімічні властивості деревного вугілля, є температура, особливо діапазон від 200°C до 400°C, адже саме такі температурні межі визначають формування аморфної структури вуглецю. Вона зберігається і за температури 450-550°C, але подальше збільшення цього фізичного параметра спричиняє термохімічне перетворення аморфного вуглецю в листи турбостатичного графену. Таке зростання температури позначається на збільшенні відносного вмісту вуглецю, в той час як вміст кисню та водню знижуються. Зменшення атомних співвідношень Н/С і О/С через вивільнення функціональних груп, які містять водень і кисень, викликає збільшення рН вугілля. Крім температурних змін, на процес карбонізації впливає і зростання часу витримки, за якого отримується вищий ступінь карбонізації, однак цей чинник не є таким вирішальним як температура [13].

### ***Фізичні властивості біовугілля.***

**Пористість.** Розміри пор деревного вугілля залежать від матеріалу, що використовуються для виробництва. В основному розрізняють нано- ( $< 0,9$  нм), мікро- ( $< 2$  нм), мезо- (2-50 нм) і макропори ( $>50$  нм). Перші два типи пор часто визначають як мікропори. Вони складаються понад 80% об'єму пор, присутніх у поровій структурі деревного вугілля [13].

**Площа поверхні.** Під час процесу карбонізації відбувається зміна не тільки пористості, а й загальної площі поверхні біомаси в результаті виходу летких газів. Утворення нових пор, яке досягається при підвищенні температури технологічного процесу, або внесення до етапу виробництва подачі  $\text{CO}_2$ , а також при частковому окисненні вуглецевої матриці радикалами водяної пари приводить до збільшення площі питомої поверхні, тобто активної площі, яка визначає каталітичну здатність деревного вугілля та кінетику хімічних реакцій за його участю [15]. З площею поверхні пов'язані й такі фізико-хімічні параметри деревного вугілля як здатність утримувати вологу та катіонообмінна здатність [13].

***Гідрофобність і здатність утримувати вологу.***

Гідрофобні властивості деревного вугілля, які визначаються наявністю неполярних функціональних груп на його поверхні, покращуються при підвищенні температури через видалення більш полярних поверхневих функціональних груп [13]. Завдяки цьому вода адсорбується поверхнею і не потрапляє до пористої структури деревного вугілля [16].

**Теплопровідність.** Під час технологічного перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків теплопровідність отриманого продукту знижується порівняно з цією характеристикою у вихідній сировини. Це пов'язано з формуванням пористої організації кінцевого продукту і руйнуванням анізотропної структури волокон деревинної маси [17]. Виробництво деревного вугілля за дуже високої температури може знижувати пористість і збільшувати щільність (порівняно з вугіллям, виробленим при нижчих температурах).

***Подрібнюваність.***

При проведенні карбонізації відбувається зміна механічної стабільності вихідної сировини, приводячи до формування крихкого продукту з покращеною подрібнюваністю. Високотемпературне оброблення приводить до розкладання більшої частини геміцелюлози, що позначається на кращій подрібнюваності і зміні гранулометричного складу деревного вугілля [13].

### ***Зольність***

Під час термохімічного перетворення наявна у вихідній сировині вода повністю відганяється, натомість у твердому стані залишається зола. Наявність високого вмісту золи у деревному вугіллі, може заважати його промислового використанню, тому потрібно підбирати температурні та інші умови для отримання продукту з оптимальними показниками. Наприклад, проведення піролізу за 800°C, в реакторі з достатнім потоком газу допомагає утримати магній і 85% кальцію у продукті.

**Хімічні властивості деревного вугілля.** На хімічні характеристики утвореного продукту впливають такі характеристики як елементний склад вихідної сировини, вміст енергії у ній, її деградуючі властивості та реакційна здатність, що проявляється у появі певних функціональних груп у структурі кінцевого продукту, значеннях рН та інших особливостях.

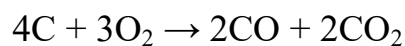
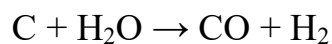
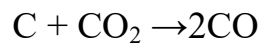
**Хімічна структура.** Хімічний склад деревного вугілля визначається видом сировини та умовами її технологічного перероблення. Серед всіх складових цього високостабільного матеріалу такі елементи як С, Н, О і N вносять найбільший вклад у структуру кінцевого продукту. Домінуючим за відсотковим вмістом є вуглець, який складає більш ніж 65%. Окрім того, деревне вугілля може містити гумінові та фульвоподібні матеріали [18], біологічно доступні макроелементи, такі як фосфор, натрій, магній, азот і калій [19, 20].

### ***Функціональні групи у складі деревного вугілля.***

На поверхні деревного вугілля розташовується велика кількість функціональних груп – гідроксильні (-ОН), нітро- (NO<sub>2</sub>) і аміногрупи (-NH<sub>2</sub>), кетонів (-OR), ефірні (-C=O)OR, метильні (-CH<sub>3</sub>); альдегідні (-C=O)H; карбоксильні (-COOH) та інші.

Розкладання вихідної сировини під дією тепла призводить до відокремлення функціональних груп, а вивільнення водню і кисню є важливими чинниками, що впливають на протікання реакцій під час карбонізації. В ході цього процесу змінюється хімічний склад деревного вугілля насамперед за рахунок зниження співвідношень Н/С, так і О/С [28].

**Реакційна і сорбційна здатність деревного вугілля.** Термохімічне перетворення матеріалу, тобто використання деревного вугілля як біопалива, можна описати як взаємодію між водяною парою і оксидом вуглецю  $\text{CO}$ , внаслідок якої утворюється молекулярний водень і вуглекислий газ[21].



Вказані реакції протікають на поверхні деревного вугілля, але реагуючі гази повинні мати доступ до внутрішньої поверхні твердого тіла. Неорганічні компоненти, виступаючи як каталізатори, можуть підвищувати реакційну здатність деревного вугілля.

Завдяки достатній кількості окисенованих функціональних груп, що залучаються до реакцій комплексоутворення, наприклад з катіонами металів, деревне вугілля має високу сорбційну здатність [13].

**Значення рН.** Значення рН біовугілля залежить від особливостей технологічного процесу, за якого воно отримане. Вихідна сировина має значення рН від 5 до 7,5. У процесі високотемпературного перероблення за відсутності кисню відокремлення карбоксильних або формільних функціональних груп приводить до набуття твердим продуктом лужних властивостей [22]. І, навпаки, процес перероблення за допомогою гідротермальної карбонізації веде до утворення органічних кислот, що спричиняють набуття таким продуктом більш кислих значень рН.

На рис. 2 наведені деякі фізико-хімічні властивості деревного вугілля, на які впливає склад вихідної сировини і застосовуваний технологічний процес.

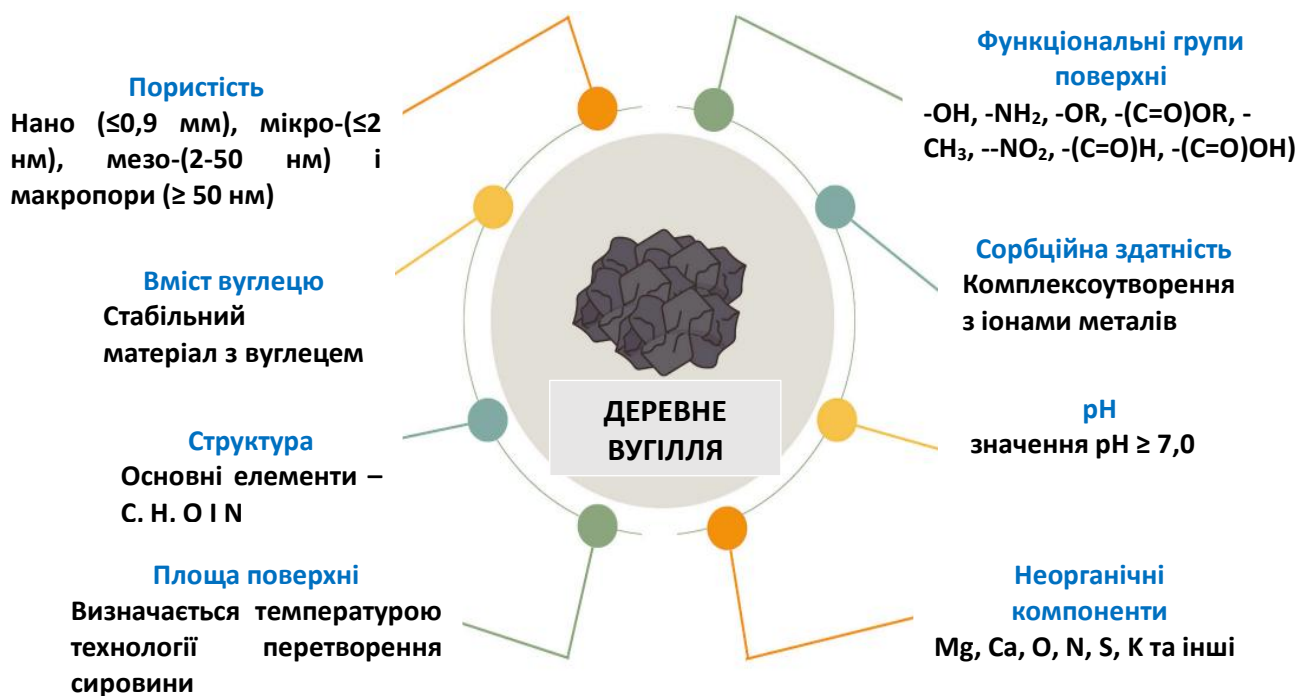


Рис. 2. Основні фізико-хімічні властивості деревного вугілля (адаптовано з [23]).

#### 1.4. Можливості використанні деревного вугілля у різних сферах

Деревне вугілля як кінцевий продукт перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків може застосовуватись як:

- **Біопаливо** – альтернатива викопному паливу, запаси якого стрімко зменшуються. Спалювання такого викопного палива різного агрегатного стану (тверде – кам’яне і буре вугілля, рідке – нафта та її похідні і газоподібне – природний газ) приводить до потрапляння в атмосферне повітря значних обсягів парникових газів і забруднюючих речовин, що приводить до виникнення парникового ефекту і кліматичних змін, погіршенні якості повітря та позначається на здоров’ї людей, які ним дихають.

Отримання біопалива здійснюється за високих температур (до 700°C) і практично в анаеробних умов або за допомогою біохімічного перетворення в процесі бродіння. Отримані продукти можуть використовуватись для отримання тепла в процесі спалювання (в котельних установках промислових підприємств чи котельнях побутового призначення (деревне вугілля),

подаватись у газорозподільчу чи газотранспортну мережу (біогаз та біометан) або застосовуватись як біопаливо для транспорту (рідкі чи газоподібні види біопалива) [24-26].

- **Сировина для виробництва активованого вугілля**, що застосовується для різних потреб – як лікарський препарат для корекції станів функціонального порушення діяльності організму, пов'язаного із розвитком інтоксикації до масштабного промислового використання як дешевого і якісного адсорбента, що застосовується в методах очищення стічних вод [27, 28] і забрудненого ґрунтового покриву [29].
- **Сировина для виробництва графіту**, що використовується для виготовлення графенових компонентів для сонячних панелей [30];
- **Органічні добрива чи додаток до добрив** – до складу деревного вугілля входять такі хімічні елементи як азот, фосфор, калій – необхідні для розвитку рослин компоненти, які, як правило, вносяться із мінеральними добривами, часто у надмірній кількості, забруднюючи ґрунтовий покрив. Добрива із природних речовин, на противагу хімічно синтезованим, містять ряд цінних для росту рослин мікроелементів, таких як магній, кальцій, цинк, сірка і мідь. Внесення дрібного деревного вугілля до ґрунту поліпшує його аераційну здатність та сприятливо впливає на мікробіологічну компоненту ґрунтового покриву. Наявні у ґрунті бактерії покращують розщеплення органічних речовин до гумінових кислот та амінокислот, підвищуючи його родючість. Варто зазначити, що внесення деревного вугілля до ґрунту поліпшує утримання вологи протягом довгого часу, а також вказати на можливість його застосування для органічного землеробства для отримання екологічно маркованої продукції [31, 32];
- **Компонент будівельних сумішей** – навіть невеликі кількості деревного вугілля на рівні 2%, як заміника цементу чи компонента деревно-поліпропіленових композитів і штукатурок, впливає на міцність, стійкість до дії високих температур і зниження теплопровідності та об'ємної щільності, покращення водопоглинальних властивостей таких матеріалів.

Такі матеріали стають більш екологічно привабливими, оскільки впливають на скорочення викидів парникових газів від будівель, для будівництва яких вони використовувались [33, 34].

- **Додаток до кормів, які використовуються у тваринництві** – позитивний ефект щодо поліпшення апетиту і зростання ваги, збільшення несучості у курей, покращенні якості яєць у птиці та м'яса у худоби, зниженні захворюваності, що позначається на менших витратах на ветеринарні послуги [35].
- **Сировина для побутового розпалювання** – фасовані упаковки брикетів деревного вугілля, які продаються у закладах роздрібною торгівлі для розпалювання камінів, вогнищ тощо

На рис. 3 наведені можливості використання деревного вугілля з побутовою чи промисловою метою.



Рис. 3. Можливості використання деревного вугілля: деревні брикети для паливного використання; фармакологічний препарат для зняття інтоксикацій; колона з активованим вугіллям для адсорбції забруднюючих речовин; графіт для отримання графену; внесення деревного вугілля як біодобрива (фото із сайтів <https://uk.wikipedia.org>, <https://www.hajim.rochester.edu/senior-design-day/biochar-bricks-for-building-materials/>, <https://www.dorsetcharcoal.co.uk/product-page/granular-charcoal-animal-feed-supplement-350g>)

## **1.5. Оцінювання вкладу деревного вугілля у зменшення викидів парникових газів.**

Акумуляюча і тривала здатність біовугілля утримувати вуглець у ґрунті може стати однією із стримуючих можливостей секвестрації у стратегії декарбонізації, яка стосується сільського господарства. Захоплення та зберігання вуглекислого газу, який визначається як основний парниковий газ, поряд із існуючими практиками лісовідновлення та використання рослин з посиленою фотосинтетичною активністю, може бути доповнене депонуванням вуглецю за допомогою вуглець-вмісних продуктів, отриманих перетворенням рослинної та лісозалишкової біомаси, зокрема й деревного вугілля [36-40].

Секвестрація вуглецю – це процес вловлювання атмосферного вуглецю і збереження його у стабільній формі впродовж тривалого часу. Можливість реалізації цієї стратегії узгоджуються технічною здійсненністю, потенціалом масштабування, вартістю вловленого і затриманого вуглецю, верифікацією і моніторингом за CO<sub>2</sub>. Загалом, поглинання вуглецю через виробництво деревного вугілля є технічно здійсненним і може бути економічно вигідним, особливо з урахуванням поточного розвитку економіки поглиначів вуглецю. Концепція, що лежить в основі стратегії за участю вуглецю, ґрунтується на його колообігу в природі. Рослини поглинають вуглець у вигляді CO<sub>2</sub> з атмосферного повітря і використовують його в процесі фотосинтезу для утворення органічних речовин. Ці речовини витрачаються на забезпечення росту рослин, і доки рослина існує вуглець зберігається в її структурі. Коли рослина відмирає, в процесу її розкладу вуглець повертається назад в атмосферне повітря і природний колообіг цього елемента завершується. Виробництво біовугілля перериває цей колообіг, перетворюючи вуглець у стабільну форму, на противагу процесу розкладу, запобігаючи викидам його в атмосферне повітря. Поєднанням фотосинтетичного шляху з перетворенням у процесі піролізу, можна спроектувати ефективну систему видалення вуглецю. У великих масштабах виробництво біовугілля в кінцевому підсумку повинно вплинути на баланс вуглецю в атмосферному повітрі через зменшення його концентрації. Для

виробництва стабільного біовугілля, стійкого до розкладання і здатного зберігатися в потенційних резервуарах впродовж сотні років, вимагає відповідного вибору сировини та оптимізації умов перероблення для досягнення максимально можливої стабільності. Крім того, це має бути здійснено у максимально стійким підходом, наскільки це можливо.

Так, процес термохімічного перетворення повинен здійснюватися енергоефективним способом, а гази або тепло, що утворюється в процесі виробництва, треба повторно використовувати, щоб максимально запобігти викидам. Високопне паливо має бути виключене з виробничого процесу і максимально зменшене на різних етапах, зокрема при транспортуванні. Більше того, кінцеве застосування біопалива визначає його життєздатність як поглинача вуглецю і повинно здійснюватися якомога більш раціонально, з дотриманням нормативних і технічних вимогам. На додачу до потенціалу поглинання виробленого біопалива, треба максимально реалізувати потенціал використання енергії утворених побічних продуктів – біогазу, та рідкої фракції (вилучення цінної сировини, яка необхідна для проведення технологічних операцій на різних виробництвах). Смоли цієї фракції можуть використовуватись для змішування з асфальтовими в'язучими компонентами і в подальшому застосовуватись для будівництва доріг. Ще одним потенційним поглиначем вуглецю, зосередженого в компонентах рідкої фракції, є включення їх до біопластиків і композитних матеріалів, однак стійкість вуглецю в таких поглиначах залежить від життєвого циклу таких матеріалів.

Назагал оцінено, що потенційне застосування деревного вугілля може знизити глобальні викиди вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), метану ( $\text{CH}_4$ ) та оксиду азоту  $\text{N}_2\text{O}$  до 1,8 мільярда тонн еквівалентного викидам ( $\text{CO}_2$ ) на рік. Завдяки вуглецевим кредитам стабілізація  $\text{CO}_2$  у різних кінцевих продуктах, зокрема в деревному вугіллі може стати прибутковим бізнесом. Саме зниження утворення парникових газів забезпечуватиме пом'якшення наслідків зміни клімату та зменшення чистих негативних викидів [41]. За останніми даними (на кінець 2022 року) у світі продали 237000 т кредитів на викиди вуглецю з біомаси. Це

перевищує попередні продажі (на кінець 2021 року) на 38%. Якщо порівнювати вартість біопалива, то на середину 2023 року вони склали від €300 до €2000 за тону залежно від якості переробленої сировини та отриманого твердого продукту, тоді як ціни на видалення вуглецю становили 174 €/т.

На рис. 4 наведена узагальнена схема секвестрації вуглецю у деревному вугіллі, в якій враховані етапи перероблення вторинної сировини за допомогою такого технологічного підходу як піроліз, детальна характеристика якого буде наведена нижче.

Узагальнена схема секвестрації вуглецю у деревному вугіллі представлена на рис. 4

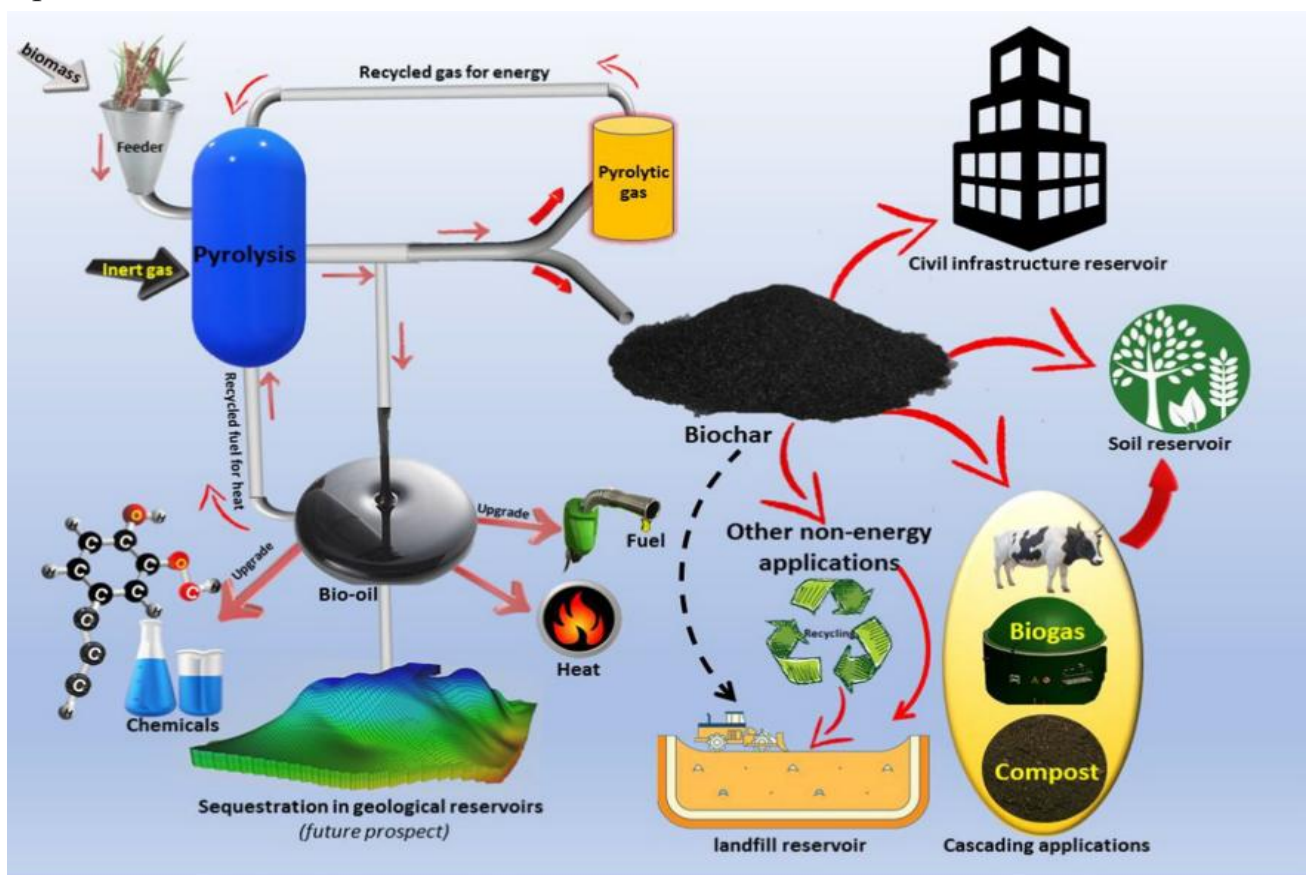


Рис. 4. Узагальнена схема секвестрації вуглецю за допомогою деревного вугілля (для даного випадку вторинна сировина переробляється піролізом, дана схема взята із [41]).

## РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ДЕРЕВНОГО ВУГІЛЛЯ

### 2.1. Методи, використане обладнання, вплив на довкілля

#### 2.1.1. Непромислове отримання деревного вугілля

##### *Виробництво деревного вугілля за допомогою двобарабанної реторти.*

Детальна конструкція, виробничі можливості, обсяг використовуваної сировини (низькосортної деревини і деревинних залишків) і отриманого продукту для невеликої портативної двобарабанної ретортної системи локального отримання біовугілля за допомогою 3-годинного піролізу наведено у [42].

Зображення двобарабанної реторти – системи із двох бочок, менша (бочка для закладання біомаси і проведення декарбонізації), яка розташовується всередині більшої (для нагрівання) продемонстровано на рис. 5.



Рис. 5. Двобарабанна реторта для проведення піролізу низькосортної деревини і деревинних залишків за різних температур (фотографія взята із [36]).

Обсяг кінцевого продукту буде залежати від температурних діапазонів, при яких проводять оброблення сировини (табл. 1.)

Таблиця 1. Об'ємний вихід деревного вугілля залежно від температури піролізу

Температура, °C	Об'ємний вихід продукту, кг
300-350	38,5
400-450	48,5
500-550	59

Деревне вугілля отримується в невеликих кількостях і використовується як органічний додаток до ґрунту.

Окрім вищевказаного способу, локальне отримання деревного вугілля для потреб невеликих фермерських господарств можна провести, використовуючи вантажний транспорту, доукомплектований піролізатором для перероблення деревинної біомаси. Перевагою такого методу є можливість замовити таке обладнання за потреби, тому немає потреби встановлювати стаціонарні печі для піролізу, що дає змогу раціонального використовувати кошти.

### **2.1.2. Промислові способи отримання деревного вугілля**

Раніше згадувалось, що хімічний склад деревного вугілля визначається типом вихідної сировини і температурними режимами, що застосовуються у технологічному процесі. Основними органічними складовими деревинної біомаси є різні вуглеводневі сполуки – целюлоза, геміцелюлоза та лігнін. Лігноцелюлозна матриця може також включати й інші компоненти, такі як білки, терпенові олії, жирні кислоти/ефіри та неорганічні матеріали, що визначається видом переробленої деревини.

Вибір певного температурного режиму впливає на модифікацію основних компонентів, через що у різних технологічних процесах отримуються дещо відмінні види деревного вугілля. Воно може перебувати у різних видах – від злегка обвугленого органічного матеріалу до сильно конденсованого вогнетривкого продукту. Температурні діапазони, за яких відбуваються перетворення різних компонентів вихідної сировини, знаходяться у таких діапазонах [43]:

- 315-400°C для розкладу целюлози,
- 220-315°C – для геміцелюлози
- 160-900°C – для лігніну.

Високотемпературні хімічні технології залежно від обраних температурних меж, швидкості та тривалості нагрівання, і за безкисневого/малокисневого процесу (кисень виступає як інгібітор процесів горіння) приводитимуть до отримання дещо різного за якісним складом і

кількісним виходом видів деревного вугілля та інших продуктів. Найбільш поширеними методами одержання деревного вугілля є [44]:

- піроліз (400-800°C)
- гідротермальна карбонізація (400-1000°C),
- торрефікація (200-300°C)
- газифікація (600-1300°C)

Результатом застосування тієї чи іншої технології є отримання трьох фракцій продукції:

- твердої (власне деревне вугілля),
- рідкої (біоолія)
- газоподібної (біогаз).

Співвідношення продуктів цих трьох фракцій залежить від обраного методу. Так, піроліз та гідротермальна карбонізація розглядаються як основні способи отримання твердої фракції, тоді як інші – застосовуються для отримання насамперед рідкої чи газоподібної фракцій. Нижче буде проаналізовані можливості різних технологій, однак основна увага буде звернута на піроліз як основний вид високотемпературного перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків в деревне вугілля, що використовується на українських підприємствах.

## **2.2. Основні технології виробництва деревного вугілля**

**2.2.1. Піроліз як найбільш поширений на українських підприємствах метод, особливості проведення різних видів піролізу.**

Найпоширенішим способом отримання деревного вугілля є піроліз. Він може здійснюватись за різних температурних режимів.

Розрізняють такі види піролізу:

- повільний (300-500°C; тривалість процесу від 10 хв до 2 годин);
- швидкий (300-800°C; тривалість процесу від 0.0017 хв до 1 години);
- мікрохвильовий (250-800°C; тривалість процесу від 5 хв до 1 години).

Використання піролізу як технологічного процесу перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків до стану деревного вугілля є більш перспективним порівняно із спалюванням сировини, оскільки приводить

до меншої кількості утворених парникових газів і зниження вуглецевого сліду у кінцевій продукції. До переваг цього методу перероблення відноситься й менша кількість димових газів та вмісту у них поліциклічних ароматичних вуглеводнів, сажі та золи [45]. Порівняно із процесами спалюванням та газифікації, за яких максимальні температурні режими щодо біомаси досягають понад 1000°C, піроліз є відносно низькотемпературним процесом, адже його максимум становить 800°C. Він проходить за анаеробних або збіднених щодо кисню умов. Основними кінцевими продуктами піролізу є тверда фракція (деревне вугілля), рідка фракція (біоолія) і газоподібна фракція (неконденсовані гази, в основному представлена діоксидом вуглецю CO<sub>2</sub>, оксидом вуглецю CO, метаном CH<sub>4</sub> і воднем H<sub>2</sub>). Гази можуть потенційно використовуватись для забезпечення енергетичних потреб самого виробництва, зокрема протікання процесу піролізу, сприяючи підтриманню енерго- і ресурсоощадної складової екологічного менеджменту даного підприємства. Обрання певного температурного режиму і швидкості проходження етапів піролізу позначається на питому виході кінцевих продуктів. Щодо продукту, про який йде мова у даній роботі, тобто деревного вугілля найбільш ефективним видом піролізу є повільний піроліз, тому він приводить до максимального утворення твердої фракції.

Піроліз можна проводити в атмосфері введення молекулярного азоту або вуглекислого газу. На пористість і ароматичність отриманого деревного вугілля впливає температура проведення процесу. Її збільшення позначається на зростанні цих показників, тому що легше вивільняються леткі речовини і зменшується кількість функціональних груп на поверхні утвореного деревного вугілля. Окрім того, за температури, вищої за 550°C поверхнева основність деревного вугілля, отриманого з додаванням вуглекислого газу, є значно вищою, ніж у продукту, отриманого в атмосфері молекулярного азоту. Ці фактори потрібно враховувати при виборі напрямку застосування отриманого деревного вугілля.

На рис. 6 подана схема, на якій зображено продукти трьох фракцій, які отримуються при переробленні низькосортної деревини і деревинних залишків піролізом.

## ПРОДУКТИ, ЯКІ ОТРИМУЮТЬСЯ ПРИ ПІРОЛІЗІ НИЗЬКОСОРТНОЇ ДЕРЕВИНИ І ДЕРЕВИННИХ ЗАЛИШКІВ

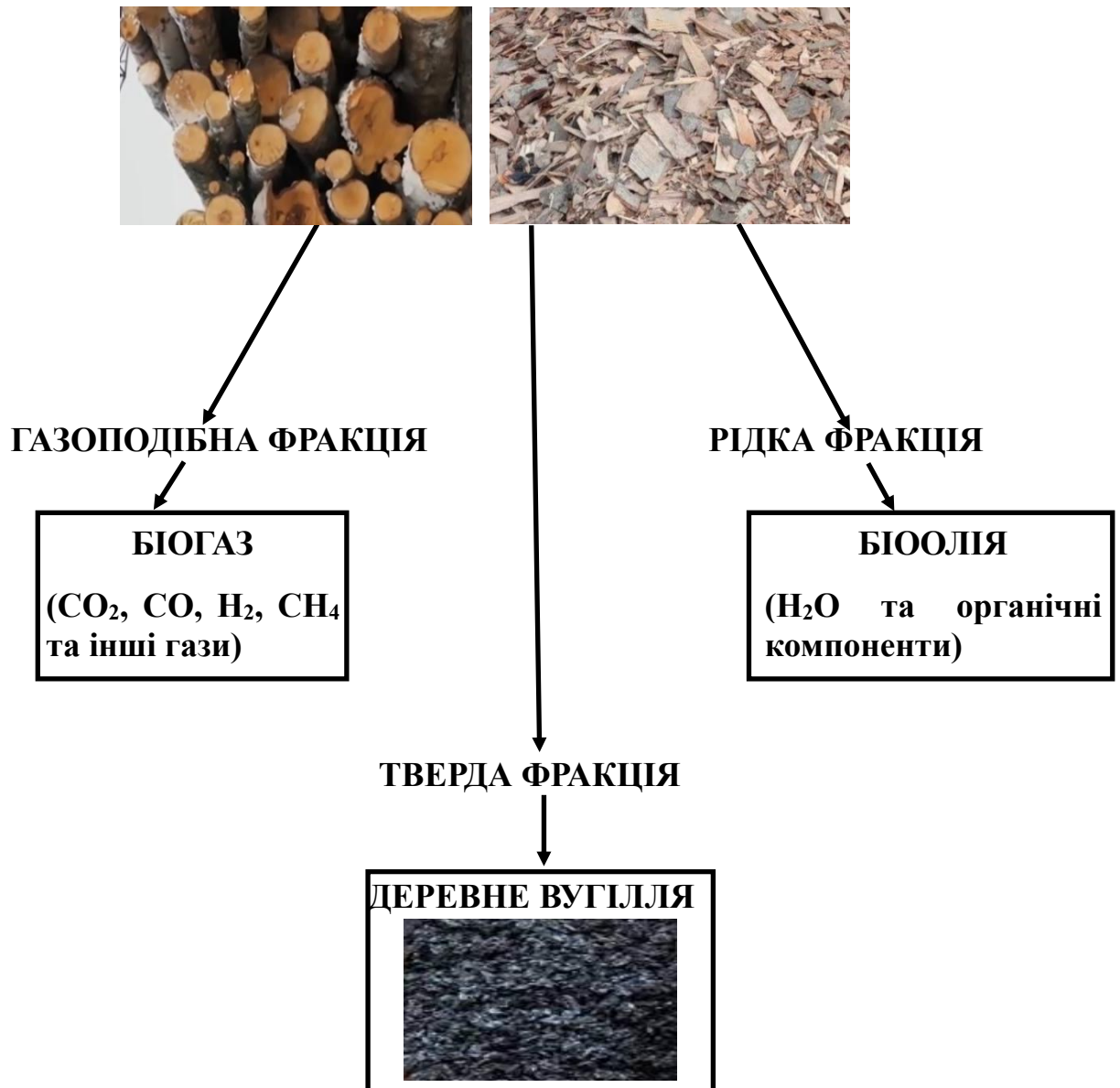


Рис. 6. Кінцеві продукти у фракціях високотемпературного піролізу низькосортної деревини і деревинних залишків

Одержання деревного вугілля можна здійснювати за допомогою різного обладнання, вибір якого визначається об'ємами сировини, потребами в кінцевих продуктах та подальшими можливостями їхнього застосування.

*До основних компонентів піролізної системи відносять:*

- обладнання для подрібнення і сушіння низькосортної деревини і деревинних залишків (дробарка і сушарка),
- обладнання для карбонізації (реактор піролізу біовугілля),
- система приймання продуктів піролізу, яка включає установки для вивантаження шлаку, систему конденсації горючого біогазу, систему видалення пилу/сажі, систему енергозабезпечення та інші частини.

Для ефективного протікання процесу піролізу необхідно, щоб всі системи функціонували злагоджено. Безпосередньо температурному переробленню передуює процес подрібнення та висушування сировини.

#### ***Етапи підготовки сировини до піролізу***

- ✓ Подрібнення сировини до менших частин за допомогою дробарки.
- ✓ Висушування сировини, оскільки наявна волога може знижувати ефективність протікання високотемпературного нагрівання. Оптимальним є значення вологості, рівне 15%. Висушування здійснюється або природньо, або за допомогою сушарок, виставлених на 105°C. Для висушування можна використати біогаз, який утворюється в процесі піролізу і збирається в системі реактора карбонізації.

#### ***Перероблення сировини в піролізному реакторі***

- ✓ Спочатку відбувається прогрівання піролізного реактора для скорочення тривалості проходження процесу піролізу;
- ✓ Підготована сировина подається у прогрітий реактор по стрічковому конвеєру

Температура, час перебування в установці та швидкість нагрівання – ті умови, які впливають на питомий вихід утвореного в процесі піролізу продукту [46]. Обраний температурний діапазон визначатиме відсотковий вихід деревного та інших фракцій (рідкої та газоподібної). Максимальний вихід твердого продукту забезпечується повільним піролізом і складає орієнтовно 40%. Відповідно, тобто, щоб отримати одну тонну деревного вугілля, треба переробити приблизно три тонни сировини.

**Повільний піроліз** проводиться за поступового збільшення швидкості нагрівання ( $5^{\circ}\text{C}$  за одну хвилину) та порівняно низькій температурі (від  $350\text{-}400^{\circ}\text{C}$  до  $600\text{-}700^{\circ}\text{C}$ ). За таких умов зростає час перебування вихідної сировини в установках для перероблення. При цьому спостерігається розпадання целюлози і геміцелюлози і утворюються різні кінцеві продукти. Як правило, за повільного піролізу з 1 кг низькосортної деревини чи лісопереробних решток утворюється 30-35% деревного вугілля, 40-45% - припадає на продукти рідкої фракції і 20-25% становить газоподібний продукт. У такому деревному вугіллі фіксується високий вміст зв'язаного вуглецю (70-80%) [23, 47].

**Середній піроліз** за температурного режиму, що можна співставити із повільним піролізом має меншу тривалість перебування сировини в реакторі, а відсотковий вміст отриманого деревного вугілля, як видно з даних, наведених у таблиці 2, досить високий.

**Швидкий піроліз** проводиться за значно вищих температур (аж до  $1000^{\circ}\text{C}$ ) і швидкості нагрівання ( $10\text{-}1000^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ) в умовах повної відсутності кисню. При цьому значно скорочується період знаходження сировини в піролізному реакторі (0,5-2 с). У процесі полімеризації та фрагментації компонентів деревинної біомаси, як і при повільному піролізі, виділяються піролізні гази і формується твердий залишок (деревне вугілля). Рідка фракція отримується при конденсації газоподібних сполук, які не входять до складу біогазу, до біоолії – переважаючого продукту, утвореного при швидкому піролізі. На співвідношення об'ємних виходів фракцій, що вирізняється від тих, які отримувались при повільному і середньому піролізі впливає висока швидкості нагрівання і температура. Однак варто зазначити, що збільшення температури вище  $650^{\circ}\text{C}$  вже не буде істотно впливати на перерозподіл фракцій. Зниження молярних співвідношень  $\text{H}/\text{C}$ ,  $\text{O}/\text{C}$  і  $\text{N}/\text{C}$  впливають на підвищену ароматизацію структури кінцевого продукту [41].

У таблиці 2 наведено дані про вихід фракцій перероблення деревинної сировини за продукту, отриманий при різних фазах піролізу.

Таблиця 2. Вплив температури і часу піролізу на вихід різних фракцій кінцевих продуктів, отриманих при переробленні деревинної сировини

Фаза піролізу	Температура процесу, °С	Час піролізу	Вихід продукту у %		
			Тверда фракція (деревне вугілля)	Рідка фракція (біоолія)	Газоподібна фракція (біогаз)
Швидка	300-1000	менше 2 с	10-30	50-70	15-20
Середня	300-450	10 хв	25-40	35-50	20-30
Повільна	300-550	5-30 хв	30-35	20-50	15-50

### ***Обладнання для проведення піролізу (піролізні реактори)***

Проведення повільного піролізу на підприємствах, де виробництво деревного вугілля відбувається у промислових масштабах, відбувається в шнекових конверторах, реакторах з обертовим барабаном, ретортах і ротаційних печах. Перші два види установок обладнані пристроями, здатними вловлювати леткі фракції (рідини і гази), тоді як печі – ні. Через це ротаційні (оберткових) печі вважаються недостатньо ефективним обладнанням, оскільки не забезпечують вловлювання і використання пароподібної і газоподібної фракцій. Компоненти цих фракцій можуть потрапляти на ґрунтовий покрив і вивільнятися в атмосферне повітря, спричиняючи їхнє забруднення.

Реактор з обертовим барабаном і шнекові конвектори відносяться до сучасних установок, здатних не тільки забезпечувати безперервне протікання процесу піролізу з періодичним вивільненням утворених продуктів, але й ефективно вловлювати рідку та газоподібну фракції з використанням продуктів цих фракцій.

Реактор з обертовим барабаном є дуже надійною системою для карбонізації біомаси різного походження. Цей тип піролізних установок підтримує пряме і непряме високотемпературне перероблення сировини. В процесі непрямого нагрівання, яке залучає спалювання піролізних газів і пари, виробляється енергія в обсязі, достатньому для карбонізації сировини. Цей тип реактора може підтримувати відмінну стабільність між отриманням деревного вугіллям і біоолії.

Шнековий тип піролізного реактора дозволяє безперервне виробництво деревного вугілля. Сировина для перероблення поступає у шнековий реактор через бункер, потрапляє у розігріту зону реактора і карбонізується.

***Виведення готового продукту.***

Деревне вугілля та продукти рідкої та газоподібної фракції виводяться з реактора за допомогою певних конструкційних елементів. Зокрема, у шнековому реакторі твердий продукт збирається в кінці шнека, а пара видаляються з реактора і потрапляє в конденсатор, де розділяється на рідку та газоподібну фракції. Поруч знаходиться шнековий розрядник з водяним охолодженням завдяки якому відбувається зниження температури кінцевого продукту.

Типова структурно-технологічна схема проведення піролізу наведена на рис. 7.



Рис. 7. Структурно-технологічна схема перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків до деревного вугілля за допомогою піролізу (схема адаптована із статті [47])

У таблиці 3 представлені дані про кінцевий вихід продуктів перероблення низькосортної подрібненої деревини або деревинних залишків із використанням різних реакторів, в яких проходив піроліз.

Таблиця 3. Вихід кінцевих продуктів (у %) залежно від складу вихідної сировини та типу реактора піролізу

Сировина	Тип реактора	Температура	Деревне вугілля	Біоолія	Біогаз
Осика, подрібнена сосна, ялицеві піддони, сосна ялівцева	Обертвий барабанний реактор	500	19-51	25-62	11-30
Тирса дуба, сосни	Шнековий реактор	450	18-20	49-56	-
Тріска з соснової деревини	Шнековий реактор	500	30	58	12
Тирса з соснової деревини	Шнековий реактор	450	19	54	-
Деревина хвойних та листяних порід	Шнековий реактор	500	15–24	51–69	16–24

Реактори з обертвим барабаном (rotary drum reactor) та шнековим реактором (auger reactor) (рис. 8 а, б відповідно) мають ряд переваг порівняно з застарілими ротаційними печами, зокрема щодо зручності експлуатації та вищої енергоефективності. Як видно з даних, наведених у таблиці 3, вихід біовугілля є вищим для першого типу обладнання.

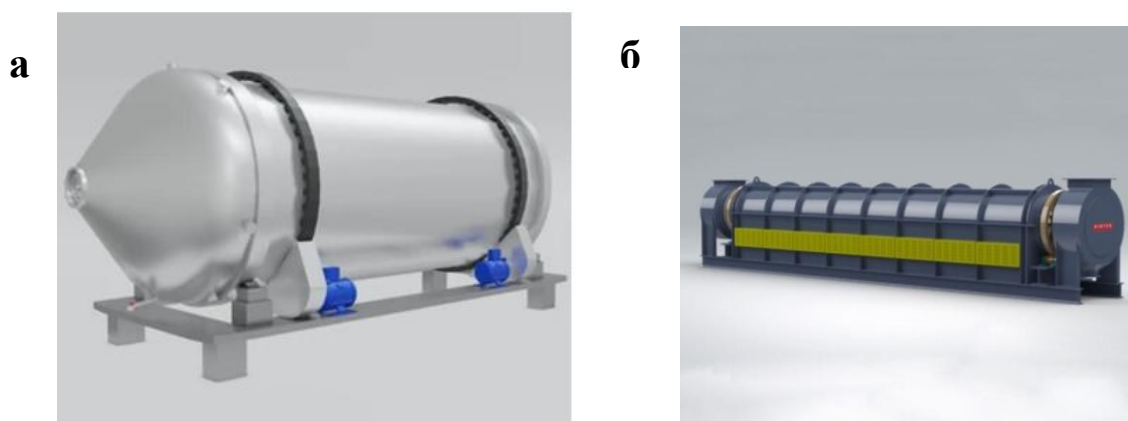


Рис. 8. Сучасне обладнання для піролізу: обертвий барабанний реактор (rotary drum reactor) (а) та шнековий реактор (auger reactor) (б) (фото взяте із сайтів <https://www.shutterstock.com/search/rotary-drum-bioreactor> та <https://kindle-tech.com/faqs/what-is-auger-reactor>).

Біогаз, що утворюється як побічний продукт піролізу, може застосовуватись для проведення технологічних операцій піролітичного перероблення. Він може використовуватись у піролізних установках, завдяки

цьому продукується в 3-9 разів більше енергії, необхідної для забезпечення роботи такого обладнання. Іноді його застосовують як газ-носії у псевдозрідженому шарі [25].

*Піроліз з використанням мікрохвиль* – доволі нова технологія з певними перевагами і недоліками використання порівняно з традиційним піролізом. Особливістю цього способу є проведення об'ємного нагрівання, більш ефективного, ніж звичайне, так як оскільки не відбувається втрати енергії, енергія не втрачається в оточуючому просторі. При традиційному піролізі тепло передається безпосередньо з піролізного реактора на зовнішню поверхню частинок завдяки конвекції, тому такий піроліз ще називають конвекційним. Подальша передача тепла йде від зовнішньої поверхні всередину частинок за допомогою теплопровідності, а дифузія летких речовин від внутрішньої до зовнішньої поверхні забезпечується градієнтом температури [48]. У методі мікрохвильового піролізу фізичний контакт при передачі тепла відсутній, а відбувається рух молекул шляхом перенесення іонних форм або обертанням молекул та генерація теплової енергії через тертя між молекулами. Генерування енергії забезпечується електромагнітними хвилями з довжиною від 1 м до 1 мм і частотою від 300 МГц до 300 ГГц. Кінцевими перевагами такого типу піролізу є вища продуктивність перероблення і нижча собівартість отриманих продуктів [41].

Деревне вугілля, яке отримується цими двома типами піролізу, відрізняється величиною і формою пор на поверхні. Для мікрохвильового піролізу першого випадку пори круглі та однорідні, тоді як для конвекційного спостерігається неоднорідність розподілу пор щодо вищевказаних характеристик [49]. Такі відмінності пояснюються різницею матеріалу, який потрапляє в матриці деревного вугілля і визначається різною швидкістю виходу летких речовин із сировини, яка є швидшою при мікрохвильовому піролізі внаслідок більш відкритих пористих структур утворюваного твердого матеріалу.

Недоліками мікрохвильового піролізу є неоднорідне нагрівання внаслідок нерівномірного розподілу електромагнітного випромінювання всередині мікрохвильової печі. На рис. 9 подана структурно-технологічна схема отримання деревного вугілля при використанні мікрохвильового піролізу.

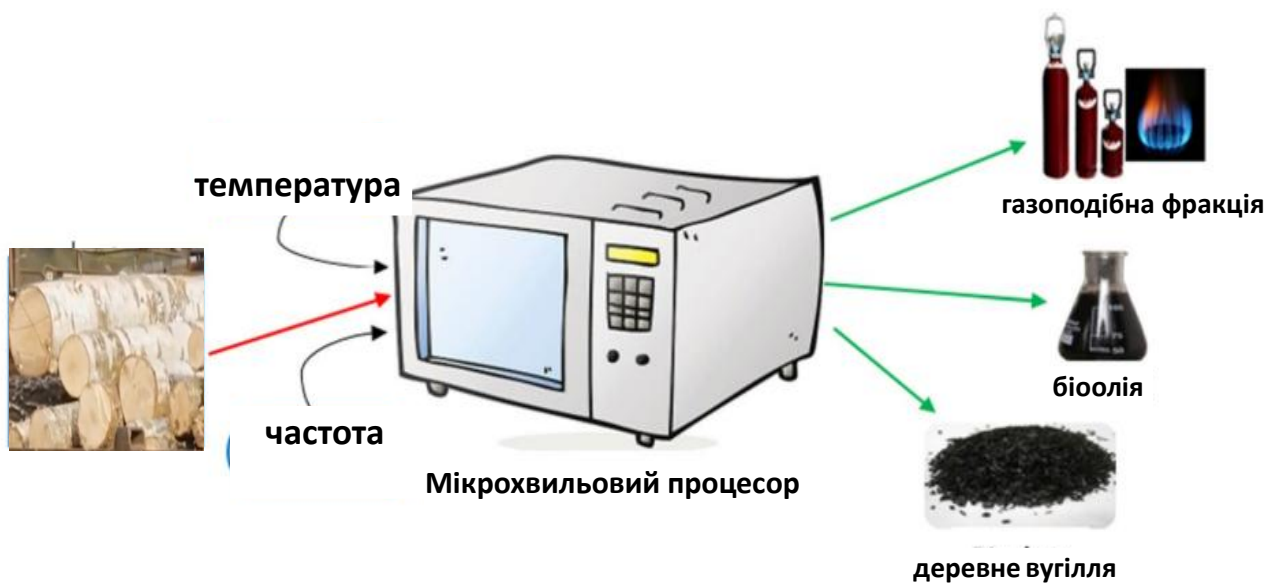


Рис. 9. Структурно-технологічна схема перероблення деревинних залишків до різних продуктів (деревного вугілля, біоолії та біогазу) за допомогою мікрохвильового піролізу (схема взята із [47])

### **2.2.2. Інші технології перероблення низькосортної деревини і лісопереробних залишків в деревне вугілля: етапи проведення, обладнання, переваги і недоліки**

**Гідротермальна карбонізація.** За допомогою цього процесу забезпечується перероблення сировини, яка не зазнає висушування. Реакції перетворення низькосортної деревини і деревообробних залишків, включають гідроліз, дегідратацію, декарбоксилювання та інші. Так, під час гідролізу геміцелюлоза, целюлоза та лігнін розпадаються до мономерів, завдяки чому у реакціях дегідратації в утвореному твердому продукті зменшується співвідношення Н/С і О/С. При декарбоксилюванні відбувається відщеплення карбоксильних груп і вивільнення більшої частини димового газу, основними компонентами якого є  $\text{CO}_2$  та  $\text{CO}$  [47].

**У підготовку вихідної сировини до перероблення входять:**

- Вилучення механічних домішок із сировини;

- Подрібнення сировини;
- Замочування подрібненої сировини

Параметри перероблення підготованої сировини такі: температури – 80-220 °С, тиск – 10-25 бар, відсутність повітря. За умов вакууму деревинна біомаса зневоднюється і карбонізується орієнтовно 6-12 годин. Проходження реакцій, в ході яких утворюються гідроксонії (гідроксоній, оксоній, гідроній)  $\text{H}_3\text{O}^+$ , можна прискорити додаванням каталізатора (найчастіше в його якості виступає лимонна кислота).

Залежно від тривалості перероблення, остаточний склад кінцевих продуктів відрізняється. Зокрема, після першої години перероблення одержується рідка фракція гідрофобних проміжних продуктів ліпідної природи. Продовження тривалості процесу до 8 годин завершується отриманням достатньо зволоженого продукту, зовнішньо схожого на торф. Якщо процес триває 12 годин, то 90-99% вуглецю переходить у водянисту суспензію у вигляді зерен вугілля ( $\text{C}_6\text{H}_2\text{O}$ ) із величиною пор від 8 до 20 нм. Інша частина вуглецю (1-10%) частково залишається в рідкій фазі у вигляді суспензії, або переходить у газоподібний стан (як  $\text{CO}_2$ ) і частково викидається в атмосферне повітря. У спрощеному вигляді кінцеве рівняння реакції можна подати як:



Отримана суспензія деревного вугілля після охолодження подається на зневоднення шляхом механічного пресування (залишковий вміст води досягає 50-60%) і досушування за допомогою сушильного обладнання (вміст води зберігається на рівні 5-25%).

Отже, як процес піролізу, гідротермальна карбонізація завершується отриманням трьох різних фракцій продуктів. Твердий продукт – відомий ще як гідровугілля – hydrochar, містить основну частину зв'язаного карбону. Рідка фракція в основному містить воду, а також інші хімічні сполуки (мурашину кислоту, молочну кислоту, фурфурол, фенол, гваякол, оцтову кислоту, ацетон). Газоподібна фракція на 90% представлена  $\text{CO}_2$ , на решту 10% припадають  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  або  $\text{H}_2$ . Під час екзотермічної реакції вивільняється теплова енергія,

еквівалентна приблизно  $3/8$  теплотворної здатності біомаси в перерахунку на сухий стан, а при високому вмісті в біомасі лігніну або різних олій – до  $1/4$  її теплотворної здатності [50, 51].

Отримане деревне вугілля використовують як паливо для отримання теплової енергії, або застосовують у різних технологічних процесах замість традиційного викопного палива. Значну частину води, виокремленої шляхом сепарації із зернової суспензії вугілля, можна використовувати як зворотну у наступних циклах технологічних операцій. Енергія, що вивільняється в ході екзотермічної реакції, може бути використана для забезпечення деяких циклів виробництва (наприклад, для досушування твердого кінцевого продукту). Гідротермальна карбонізація характеризується як процес практично повного утримання вуглецю сировини у кінцевому продукті, який є у вигляді дрібної пилоподібної фракції, яку можна пресувати в гранули чи брикети. Значними перевагами гідротермальної карбонізації порівняно з іншими методами є можливість використання сировини без попереднього досушування, висока ефективність максимального виходу твердого продукту, екологічність (відсутність впливу на довкілля, яке спостерігається при піролізі) [45].

**Торрефікація** – термічне перероблення вихідної сировини до твердого матеріалу при достатньо низькій температурі  $200-300^{\circ}\text{C}$  зі швидкістю  $50^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ , яке відбувається в безкисневих умовах [23].

**Процедура підготовки** низькосортної деревини і деревинних залишків до перероблення передбачає:

- висушування деревинних решток за температури  $105^{\circ}\text{C}$  впродовж 24 годин;
- подрібнення на фрагменти до 9 мм;
- зберігання подрібненої маси у герметичних поліетиленових мішках у сушильній шафі до проведення торрефікації.

Торрефікація включає три фази: легку ( $200-230^{\circ}\text{C}$ ), помірну ( $230-270^{\circ}\text{C}$ ) та важку ( $270-300^{\circ}\text{C}$ ) [52], кожна з яких приводить до часткової деградації лігніну та лігноцелюлози, і втрати летких компонентів. Спочатку відбуваються втрата

води, потім невеликих об'ємів газів – CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> і CH<sub>4</sub>. Завдяки втратам води і газів формується матеріал із жорсткою структурою вуглецево-органічної матриці. Таке гідрофобне деревне вугілля здатне утримувати приблизно до 70% вуглецю і зберігатись незмінним впродовж тривалого часу. Процес торрефікації проводять за сухих або вологих умов, однак перероблення деревинних залишків відбувається саме за сухого способу. Сухе розкладання, що відбувається в анаеробних умовах із подачею молекулярного азоту, триває від 60 до 180 хв. Далі сировина переробляється при 200-300°C із одержанням щільних продуктів. За допомогою вологого способу здійснюється перероблення вологої рослинної біомаси, гною чи осаду стічних вод.

**Газифікація** – термохімічний процес неповного окислення органічних компонентів біомаси різного походження, зокрема й деревинної, з утворенням як кінцевих продуктів деревного вугілля, смол і біогазу. Газифікація відбувається при високій температурі (від 600°C) і в умовах середовища, збідненого на кисень [25].

Переваги процесу газифікації порівняно з піролізом є те, що завдяки тому, що реакція часткового окислення деревинних залишків є екзотермічною, відбувається енергетичне забезпечення протікання реакцій в газифікаторі та стає непотрібною подача інертних газів до установок, що позначається на кращій економічній складовій. Однак потрібно зазначити, що процес газифікації складається з двох основних етапів – часткової та повної газифікації. Одержання деревного вугілля є можливим за часткової газифікації, оскільки повна газифікація спричиняє повне згорання утвореного деревного вугілля і перетворення його до газоподібного продукту - біогазу, який також знаходить своє застосування.

Отже, одержання деревного вугілля з низькосортної деревини і деревинних залишків можна проводити за допомогою різних методів, однак повільний піроліз є найбільш перспективною, близькою до вуглецево нейтральної технологією, за якої вивільняється найменша кількість парникових газів, зокрема CO<sub>2</sub> в димові гази, які потрапляють в атмосферне повітря

порівняно з обсягами парникових газів, які викидаються у повітря при спалюванні викопних палив чи непереробленої деревини.

Підсумовуючи цей розділ, варто зупинитись на показниках деревного вугілля, що застосовується як паливний матеріал, які є покращеними порівняно з аналогічними параметрами, які фіксуються при спалюванні викопного вугілля:

- висока теплотворна здатність (приблизно 30 МДж/кг) практично відповідно до цього показника для кам'яного (32,1 МДж/кг) та бурого (27,2 МДж/кг) вугілля;
- висока ефективність згорання;
- відсутність утворення діоксиду сірки, який спостерігається при спалюванні кам'яного чи бурого вугілля;
- низька концентрація утворених оксидів азоту  $\text{NO}_x$ ;
- висока енергетична щільність, завдяки чому знижується кількість транспортних засобів для перевезення.

### **РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ДЕРЕВНОГО ВУГІЛЛЯ В МЕТАЛУРГІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ДОСВІДУ РОЗВИНУТИХ КРАЇН**

Основні напрямки, які наразі реалізуються щодо використання деревного вугілля, такі:

- енергетичний – біопаливо в різних секторах економіки, зокрема металургійній промисловості;
- кліматорегулюючий – затримання вуглецю і скорочення викидів парникових газів;
- ресурсощадний – управління відходами різного походження;
- використання в сорбційних технологіях для очищення і поліпшення якості ґрунту та води.

Основна увага у цій роботі зверталась на можливості використання деревного вугілля в енергетичному секторі як біопалива для металургійної промисловості, але з цим напрямком тісно пов'язана і можливість скорочення викидів парникових газів, що потрапляють в атмосферне повітря. Треба зазначити, що можливість безпосереднього застосування деревного вугілля у певних галузях промисловості для забезпечення енергетичних потреб технологічних процесів є достатньо складною. Металургія якраз і відноситься до таких секторів економіки. Однак досягнення останніх років щодо удосконалення технологій та розроблення нового обладнання дало змогу практичної реалізації і часткового заміщення викопних палив на металургійних підприємствах на альтернативне відновлювальне паливо – деревне вугілля.

Світова практика поступового зниження використання традиційних викопних джерел енергії через скорочення запасів природних ресурсів, їхнє подорожчання, негативний вплив на компоненти довкілля і розвиток парникового ефекту спонукає до застосування альтернативних джерел. В Україні до цих чинників додався фактор війни і втрата доступу до викопних палив, якими забезпечувались потреби металургійної промисловості.

Альтернативні джерела постачання енергії можуть бути реалізовані або за допомогою технологій, спрямованих на отримання енергії від природних джерел

(Сонця, вітру, води, геотермальних джерел), або залученням можливостей біоенергетики. Перевага тих чи інших технологій визначається географічним розташуванням країн та його кліматичними умовами, а також можливостями секторів переробного і сільськогосподарського спрямування. Не останню роль у впровадженні таких технологій відіграють і фінансові можливості держав, адже ці технології є дорогавартісними, тому що передбачають використання складного спеціального обладнання, наявності кваліфікованого персоналу, розвитку сучасних технологій тощо.

Металургійна галузь включає чорну і кольорову металургію, розглядається як галузь, яка здійснює значний екологічний вплив на компоненти довкілля, особливо на атмосферне повітря та розвиток теплового забруднення. У нашій роботі розглядається галузь чорної металургії, куди відносяться виробництво чавуну, сталі, прокату, сталевих і чавунних труб, феросплавів тощо. У цьому розділі детально проаналізоване виробництво сталі та можливості використання деревного вугілля як альтернативного палива для часткового забезпечення енергетичних потреб металургійних підприємств.

За хімічним складом сталь є сплавом вуглецю й заліза з незначними домішками кремнію, сірки, фосфору і мангану, причому на вуглець припадає від 0,02 до 2,14%. Схожим до сталі є чавун, однак він містить більшу кількість вуглецю і домішок. Сталь – матеріал, який найчастіше в світі використовується для потреб будівельної сфери, машинобудування, для виготовлення обладнання галузі важкої промисловості, об'єктів транспортної інфраструктури і транспортних засобів, побутової техніки, зброї та інших виробів побутового і промислового призначення. Він повністю придатний для застосування в якості вторинної сировини і є частиною економіки замкнутого циклу. Світове виробництво сталі постійно збільшується і на 2050 рік за прогнозами зросте в 1,3 рази порівняно до сучасного рівня. Для виробництва сталі використовують різну сировину – залізну руду, металобрухт, переробний чавун, флюси. Виплавлення сталі є дуже енергоємним процесом, як паливо в цьому процесі використовують вугілля високої якості, зокрема антрацит і коксівне вугілля. Останнє застосовується не тільки як паливо, але як відновник. Процеси виробництва сталі

супроводжуються утворенням значних обсягів планетарних викидів CO<sub>2</sub> (оцінюється у 23% світових промислових викидів вуглекислого газу), який визначається як основний чинник глобального потепління. Застосування екологічно орієнтованих технологій з використанням альтернативних відновних видів палива замість коксу і вугілля все активніше активно випробовується країнами, які ставлять пріоритетом декарбонізації галузей промисловості, зокрема й металургійної, й скорочення викидів парникових газів.

### 3.1. Аналіз ситуації з виробництвом сталі в Європі та перспективами використання альтернативних видів палива на металургійних підприємствах.

В Європі знаходиться більше 500 металургійних підприємств, що розташовані у 20 країнах (рис. 12).

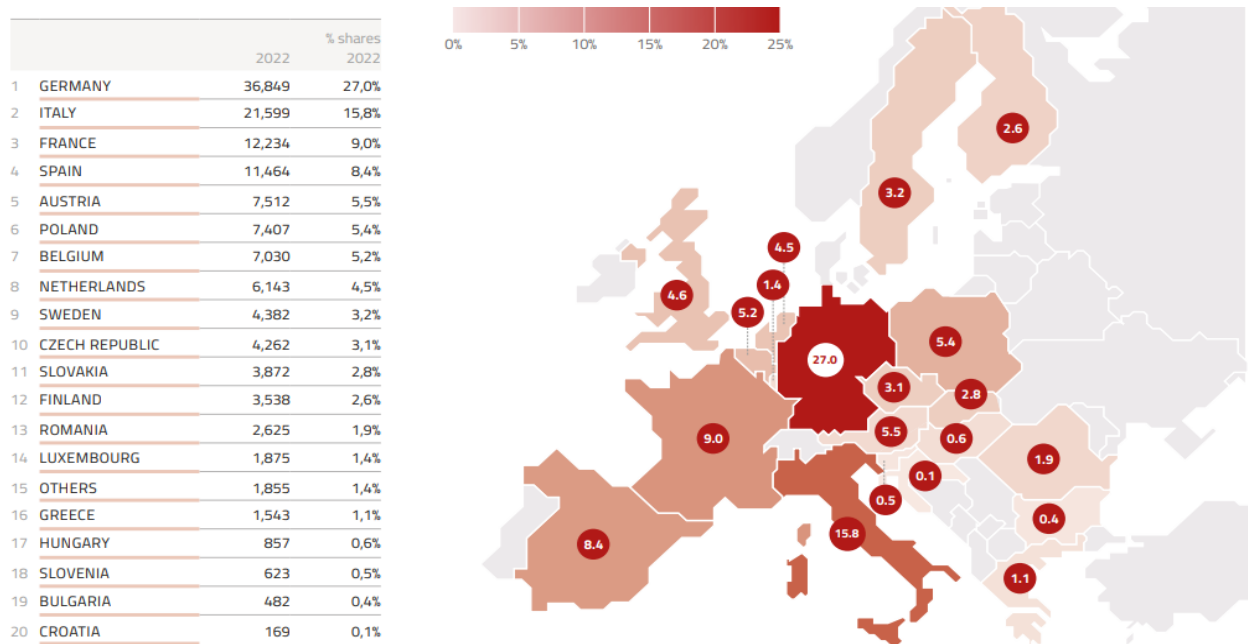


Рис. 10. Карта розташування європейських підприємств із виробництва сталі в країнах Європи (карта взята з [53])

До виробництва сталі залучено орієнтовно 2,5 мільйони людей, а валова додана вартість отриманої продукції складає приблизно 143 млрд євро, що відображено на діаграмі, наведеній на рис. 11.

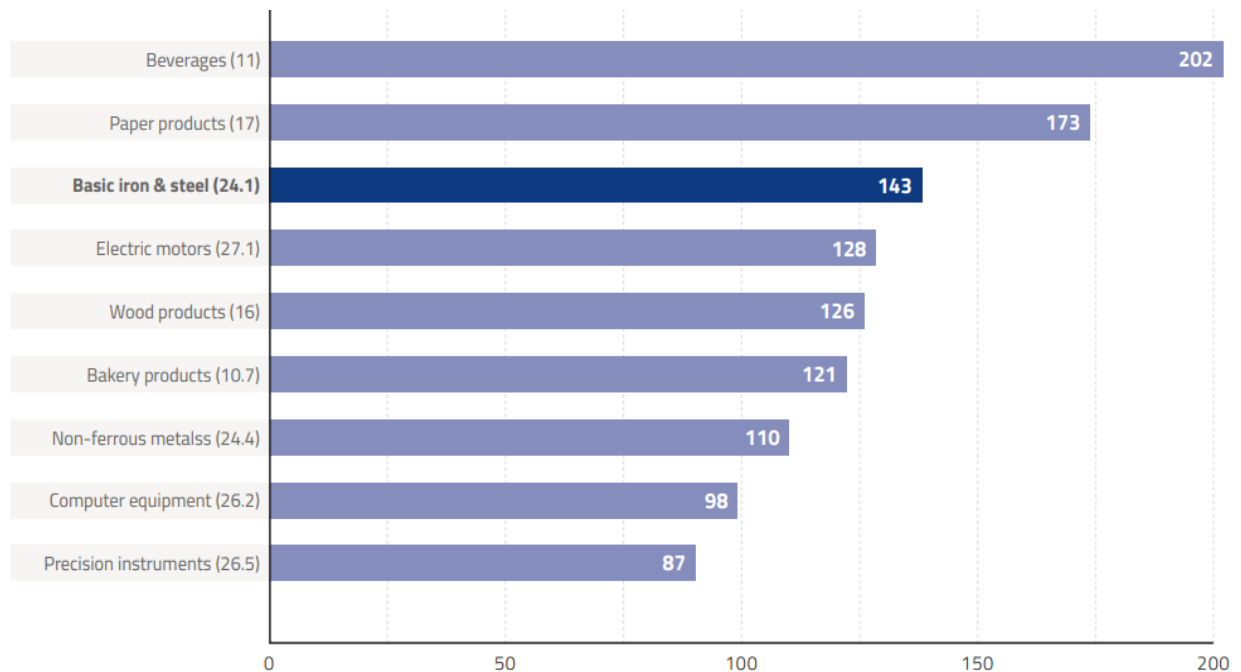


Рис. 11. Вартість виробництва сталі порівняно з іншими галузями промисловості ЄС (темно-синій виділена вартість виробництва сталі) (графік взято із [53])

Незважаючи на те, що виробництво сталі в країнах ЄС є лідером в галузі інноваційних технологій та екологічного сталого розвитку, основним видом палива, що використовується в металургійній промисловості, залишаються традиційні викопні види. Зростання активності щодо переходу на відновлювані ресурси спостерігається після початку повномасштабної війни з боку росії щодо України, оскільки значні кількості викопних палив постачались до країн ЄС російською федерацією.

До альтернативних технологій виробництва сталі без використання викопних палив відноситься і можливість застосування деревного вугілля [54, 55]. Було встановлено, що залежно від використовуваної сировини фізико-хімічні характеристики і паливний потенціал утвореного твердого продукту будуть різними [56-58].

У таблиці 4 наведено найважливіші властивості для біопалива з низькосортної деревини і деревинних залишків та традиційних видів – коксу та викопного вугілля.

Таблиця 4. Деякі фізико-хімічні властивості біопалива та традиційного палива (дані взяті із [56-58])

Фізико-хімічні властивості	Деревне вугілля	Деревні гранули	Кокс	Викопне вугілля
Попередній аналіз				
Вміст вологи	0,83	1,94	1,34	6,0
Леткі речовини	9,08	11,06	10,3	41,5
<b>Фіксований вуглець</b>	<b>87,49</b>	<b>83,04</b>	<b>88</b>	<b>39,6</b>
Зола	2,6	3,96	0,4	12,9
Кінцевий аналіз				
Вуглець	87,17	87,32	87	80,7
Водень	1,23	1,43	3,5	5,8
Азот	0,4	0,33	1,1	1,2
Кисень	11,2	10,9	0,5	8,7
Сірка	-	-	7,9	3,6
<b>Загальна теплота згоряння</b>	<b>30,38</b>	<b>31,07</b>	<b>27,2</b>	<b>20,6</b>
Площа поверхні	112,6	247,06	4,4	4,13
Насипна щільність	4,95	5,3	2,01	1,72

Як видно з даних, наведених у таблиці 4, теплотворна здатність деревного вугілля є вищою для біопаливних видів порівняно з традиційними. У біопаливах, одержаних з деревинної сировини, вміст фіксованого вуглецю був співрозмірний із цим показником для коксу. Таким чином, всі ці біопалива можна використовувати як альтернативні для проведення технологічних процесів виробництва сталі, у яких застосовується кокс. Числові значення таких характеристик як площа поверхні та насипна щільність є набагато вищими для біопалив, що має велике значення у процесах спікання, так як вища пористість приводить до менших витрат енергії і викидів газів. Серед технологій отримання деревного вугілля для потреб металургійної промисловості домінуючою є використання повільного піролізу, завдяки якому більшість органічної компоненти вихідної сировини перетворюється у вуглецевий стабільний матеріал. Варто зауважити, що в хоча в останні роки значна увага звертається і

на можливості використання для таких потреб процесу гідротермальної декарбонізації.

Таке деревне вугілля можна застосовувати як паливний матеріал у суміші з викапним вугіллям не тільки для виплавляння сталі, але й для отримання біококсу. Для отримання якісного продукту достатнім є додавання від 2 до 10% біопалива до вугільної шихти. Це також позначається на зменшенні викидів CO<sub>2</sub> на 1-5% порівняно з викидами, які обраховані для виробництва продукції з використанням тільки самої шихти. Значною перевагою використання біопалив є те, що в них є відсутніми домішки сірки, що виключає появу діоксиду сірки як забруднюючого компонента у димових газах, присутність якого фіксується при спалюванні коксу чи викапного вугілля [56-58].

### **3.2. Аналіз стану металургійної промисловості України на 2024 рік.**

До 2014 року металургійна промисловість України була однією з ведучих сфер промисловості. Основні виробництва з отримання чавуну і сталі, а також трубопрокатної, феросплавної, вуглецевої, напівпровідникової продукції, як видно з карти, наведеної на рис. 12, розташовані на сході або південному сході України (Донецька, Луганська, Дніпропетровська, Запорізька, Полтавська області). Зосередження більшості підприємств по видобуванню паливних і рудних корисних копалин також зосереджені у цих областях (рис. 12.) [59].

У 2013 році Україна ввійшла до десятки країн в світі (10 місце) щодо обсягів виробленої сталі. З усієї кількості випущеної у тому році металопродукції приблизно 80% експортувалось до країн Європи, Азії, Близького Сходу і Південної Америки. Решту 20% було використано для промислових потреб України .



Рис. 12. Карта розташування підприємств металургійної промисловості на території України.

У 2014 році через анексію Криму та втрату частини підприємств на Донбасі частка вкладу української металургії у світовому виробництві почала поступово зменшуватись, але до 2018 рік Україна утримувала 12 місце серед світових виробників сталі. На рис. 13 наведені обсяги виплавки чавуну і сталі в Україні впродовж 2013-2022 років [60].

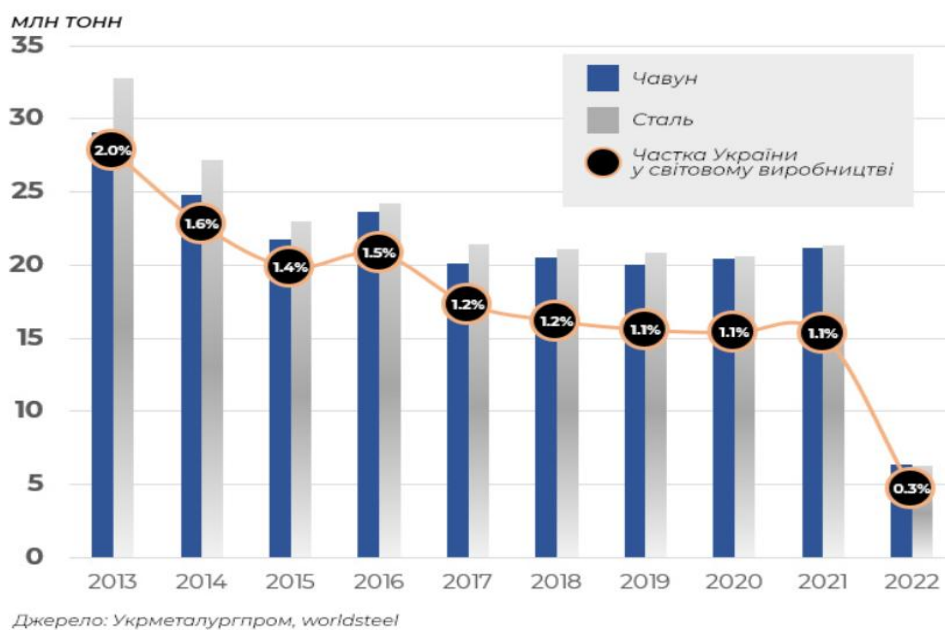
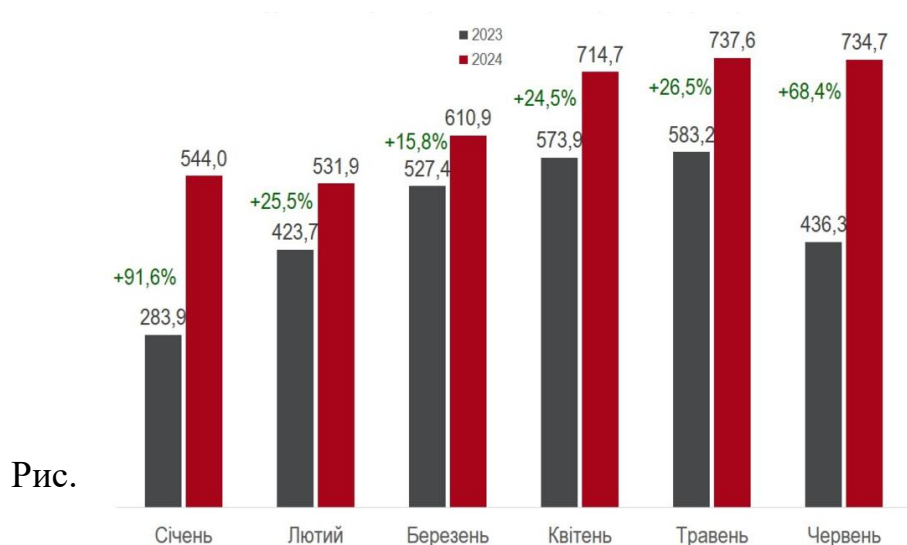


Рис. 13. Діаграма зміни обсягів виробництва чавуну/сталі в Україні за 2013-2022 роки (дані взяті із [60])

Повномасштабне вторгнення росії до України істотно погіршили ситуацію з виробництвом цього важливого матеріалу. Ведення активних бойових дій на території Донецької області та часті ракетні обстріли решти ключових для металургійної галузі областей привели до втрати/припинення роботи основної кількості підприємств цього сектору економіки, які мали ключові позиції щодо виробництва сталі (серед найбільших втрат – Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча та "Азовсталь"). Крім того, були тимчасово законсервовані виробництва у Запоріжжі і Кривому Розі, тож у 2022 році було вироблено такий об'єм сталі, який складав третину від результату 2021 року. У світовому рейтингу рейтинг України знизився до 25 місця (на кінець 2021 року вона була 14 у списку). У другій половині 2022 року почалось поступове відновлення і виведення із консервації підприємств Дніпропетровської області, однак досягти виробництв попередніх років було складно. Загалом з 12 підприємств по виплавлянню сталі діючими на сьогодні є 5 [61].

На першу половину 2024 року попри існуючі труднощі щодо економічного падіння та часті обстріли українська металургійна промисловість збільшила виробництво сталі на 37% порівняно за перше півріччя 2023 року. більше, ніж за аналогічний період минулого року (рис. 14) [62].



14. Динаміка виробництва сталі (у тис. т) за перше півріччя 2024 року (зеленими цифрами позначено приріст виробництва порівняно із аналогічним періодом 2023 року) [62]

Однак активізація бойових дій на Покровському напрямку може суттєво вплинути на зміну позитивної тенденції поступового відновлення виробництва сталі. Можливість втрати доступу до єдиного в Україні джерела коксівного вугілля, необхідного для української металургійної промисловості, може вплинути на значне зменшення вироблення сталі до 2-3 млн т попри прогнозовані 7,5 млн на кінець 2024 року і 10 млн т у 2025 році [63]. Покривання енергетичних потреб за рахунок імпорту паливної сировини ускладнений через складнощі логістики щодо поставок вугілля. Пошук альтернативних джерел палива та інших технологій виробництва – важливі перспективи, які можуть дати змогу українським виробникам сталі підтримувати вітчизняні підприємства.

Війна позначилась не тільки на внутрішньо-економічному становищі України, але й переорієнтувало світовий ринок металургії. Деякі виробництва в окремих країнах були залежними від української металопродукції – наприклад, загальний об'єм постачання товстолистового прокату до країн ЄС у 2021 становив 43%, а у 2022 році він впав до 11%. Аналогічна ситуація спостерігалась і стосовно напівфабрикатів прокату, які постачались на підприємства Болгарії, Італії та Великої Британії. Відповідно для задоволення потреб цих виробництв довелось шукати нових постачальників.

### **3.3. Перспективи декарбонізації металургійної галузі в Україні**

Враховуючи, що металургійна промисловість відноситься до однієї з найбільш енергоємних, проблема дефіциту енергоресурсів особливо загострилась на кінець 2024 року через великі руйнування об'єктів енергетичної інфраструктури – тепло- і гідроелектростанцій, що привело до віялових відключень електроенергії вже влітку. Ці відключення стали одними із найбільших викликів, на додачу до проблем логістики та нестачі оборотних коштів. Вони стартували вже з кінця 2023 року (у листопаді 2022 року була вимушена зупинка основних виробничих циклів, які вдалось відновити в межах виділених квот на енергоспоживання, запровадивши режим максимальної економії та знизивши завантаження агрегатів [60]). Вже на цьому етапі зрозуміло, наскільки гострою є проблема пошуку альтернативних джерел енергії, зважаючи

на ті обмежені можливості щодо традиційних джерел, які є зараз. Застосування можливостей біоенергетики може допомогти у вирішенні цих проблем, особливо якщо врахувати, що ця має великі перспективи з огляду на недостатню увагу до перероблення вторинної сировини і з врахуванням того, що Україна є сільськогосподарсько орієнтованою державою, де таких органічних відходів утворюються багато.

Також треба враховувати фактор втрати потужностей енергетики, відновлення яких займе не один рік. Якщо проаналізувати наскільки зачепленою виявились енергетичні об'єкти щодо вразливості щодо обстрілів, то цей сектор енергетики постраждав найменше (на вересень 2024 року зруйновано приблизно 4% наявних на території України об'єктів). [дані Біоенергетичної асоціації Української асоціації UABIO)]-

Очікувати зміни ситуації для металургійної галузі України можна тільки після війни, коли передбачається зростання внутрішнього використання металопродукції для відновлення об'єктів інфраструктури. І тоді гостро постане питання стосовно переведення цих підприємств на енергоефективне забезпечення енергетичними ресурсами. Також потрібно буде розв'язувати питання щодо вуглецевого сліду продукції, яка потенційно може експортуватись. Оскільки традиційно як паливо для металургійної промисловості використовується кокс, який виробляють із відповідних марок вугілля, що добувається в Донецькому басейні, його спалювання приводить до потрапляння в атмосферне повітря парникових газів. Тому заміна викопного палива на альтернативне, таке як деревне вугілля може бути одним з можливих шляхів забезпечення підприємств відновлювальним та екологічним видом палива.

Таким чином, інвестувати у виробництво деревного вугілля є важливим тим власникам підприємств, які зацікавлені у створенні екологобезпечних, енергетично незалежних виробництв, орієнтованих на досягнення нульових викидів від CO<sub>2</sub> завдяки використанню відновних сировинних ресурсів та впровадження принципів «зеленої металургії [64], законодавчі норми щодо яких відображено у таких документах [65, 66]. Металургійні заводи в Україні, що

скоротили викиди CO<sub>2</sub> до європейського цільового рівня – тобто до рівня не більше 250 кг CO<sub>2</sub> на тонну сталі, звільняються від сплати частини тарифу на передачу електроенергії, яка направляється на компенсацію виробникам з поновлюваних джерел енергії. На кінець 2020 року п'ять металургійних підприємств України претендували на отримання такого статусу – «Інтерпайп Сталь» (Дніпро), «Електросталь» (Курахове), «Азовелектросталь» (Маріуполь), «Енергомашпецсталь» (Краматорськ), «Дніпроспецсталь» (Запоріжжя) (рис. 15) [67].

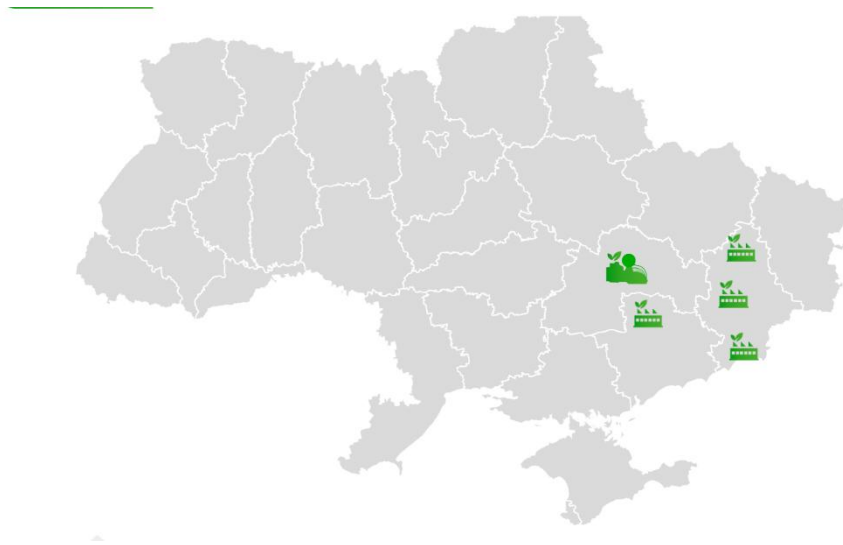


Рис. 5. Розташування металургійних підприємств, які працюють за принципами «зеленої енергетики» станом на 2020 рік [67]

Однак, на жаль, війна внесла значні корективи у роботу цих підприємств, оскільки потужності «Азовелектросталь» (Маріуполь) повністю втрачені через окупацію міста. Робота підприємства «Електросталь» (Курахове) практично зупинена через постійні обстріли міста і скорочення кількості персоналу (у 8 разів), завод «Енергомашпецсталь» (Краматорськ) проходить процедуру націоналізації і примусового вилучена корпоративних прав у російського бенефіціара.

Декарбонізація металургійної галузі в Україні включає ті ж етапи, що і в країнах ЄС, зокрема перехід на технології, які виключають викиди парникових газів в атмосферне повітря в обсягах, що перевищують їхнє природне поглинання рослинами. Зокрема, такі технології передбачають відмову від викопного вугілля,

що застосовується в доменних печах і конвертерах, а залучать альтернативні відновні джерела, насамперед водень.

Одним з основним інструментів реалізації стратегії стане введення “Вуглецевого податку” (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM), який поширюватиметься на продукції, що імпортується в країни ЄС з використанням викопних джерел енергії. Прогнозується, що розмір вуглецевого податку буде прив’язаний до вартості квот на парникові викиди в ЄС (EU Emissions Trading System). Остаточного впровадження цього податку планується з 2026 року, через що потужності металургійного сектору України, орієнтованого на експорт, може зазнати суттєвих втрат (на 2030 рік вони можуть перевищити \$4,6 млрд), ще більше впливаючи на стагнацію цього сектору, спричинену війною [61]. Важливим було б введення тимчасового відтермінування введення цього податку та запровадження перехідного періоду для можливості переорієнтації металургійної галузі на нові технології з частковим використанням відновних палив, зокрема деревного вугілля, які б могли змішуватись з коксом. Практична реалізація таких технологій здійснюється компанією Арселор Мітал, яка разом з компанією Torrefo випробовує використання деревного вугілля, отриманого при торрефікації відходів деревини для часткової заміни вугілля на заводі Arcelor Mittal у Генті (Бельгія). Будівництво реакторів для виробництва деревного вугілля розпочато у 2018 році і запуск першого реактора вже розпочатий. На кінець 2024 року планувався запуск реактора №2. Передбачається, що кожен із двох реакторів вироблятиме 40000 тонн біовугілля щорічно.

## РОЗДІЛ 4. ВИРОБНИЦТВО ДЕРЕВНОГО ВУГІЛЛЯ НА ПЕРЕЧИНСЬКОМУ ЛІСОХІМІЧНОМУ КОМБІНАТІ:

### 4.1. Технологія перероблення деревинної сировини

Одним з найбільших за потужностями та величиною отриманої готової продукції в Україні є Перечинський лісохімічний комбінат, який знаходиться в однойменному селищі Закарпатської області. Це підприємство було створене більше ста років тому та зараз працює як Товариство з додатковою відповідальністю (ТДВ). Нижче подані фотографії загального вигляду цього лісокомбінату та складів, на яких зберігається сировина для виробництва деревного вугілля (рис. 16).



Рис. 16. Загальний вигляд Перечинського лісохімічного комбінату (вигляд згори) та складів із сировиною

Як сировину для свого виробництва лісохімкомбінат використовує лісопереробні залишки твердолистяних порід (насамперед бука і дуба), які

надходять на підприємство з різних лісосік України. Сировина поступає на підприємство по окремій виділеній залізничній колії, де здійснюється її розвантаження та розташування на складах. На рис. 17 показано транспортування сировини у вантажних вагонах на лісохімкомбінаті і після розвантаження сировина потрапляє на транспортер.



Рис. 17. Транспортування сировини для виробництва деревного вугілля за допомогою залізниці і до виробничих приміщень лісохімкомбінату

Далі ця сировина переходить до цеху, де відбувається процес її розпилювання, потім розколювання і далі розкрієна сировина забирається автотранспортом у піролізний цех. Для дрібних лісопереробних залишків застосовується досушування до досягнення сировиною остаточної вологості у 12%.

Етапи підготовки сировини до остаточного перероблення в деревне вугілля наведені на рис. 18.



Рис. 18. Етапи технологічної підготовки сировини до перероблення її в деревне вугілля

У піролізному цеху підготована сировина потрапляє в вертикальну реторту (рис. 19).



Рис. 19. Реторта, у якій відбувається процес піролізу лісопереробної сировини

У реторті проходить процес піролізу за різних температурних умов. Основна маса (великі за розміром лісопереробні залишки) піддаються піролізу за температури 500°C і за відсутності кисню. Дрібні залишки переробляються також в анаеробних умовах, однак температура піролізу тут дещо нижча – 400°C. Твердий продукт, який утворюється, досить дрібнодисперсний і може за надання йому належної форми використовуватись для виготовлення графітових стержнів. Процеси, які відбуваються у піролізному цеху повністю автоматизовані, а контроль за дотримання технологічного процесу контролюється оператором на екрані комп'ютера (рис. 20).

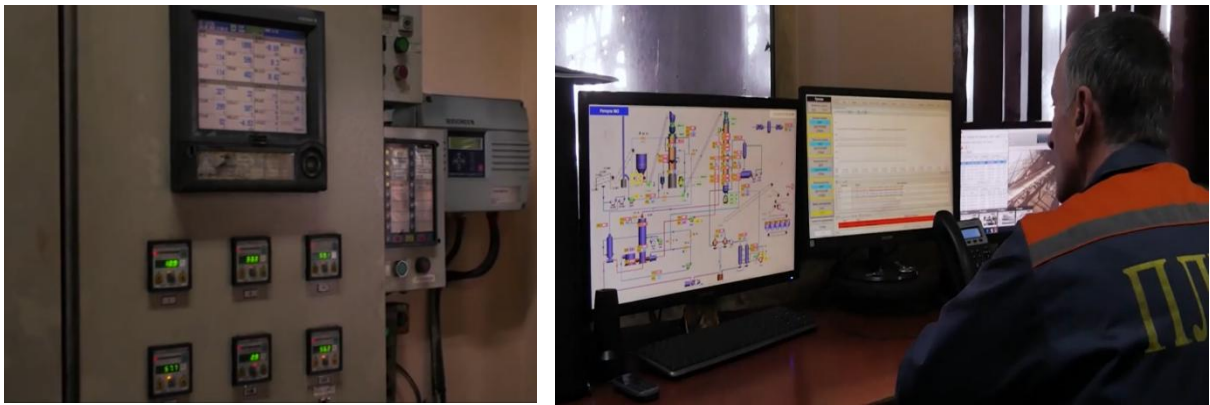


Рис. 20. Контроль за дотримання технологічного процесу виробництва деревного вугілля

Після проходження піролізу матеріал вивільняється з реторти та охолоджується до 80-90°C. Наступний етап – спікання деревного вугілля, в результаті якого утворюються брикети геометричної форми. Вони складаються основну фракцію (70-80% від усього утвореного деревного вугілля). Решта становить фракція дрібного деревного вугілля. На лісокомбінаті наявні дві реторти, продуктивність кожної з них – 40 т деревного вугілля на добу. Таким чином, за добу на підприємстві отримується 80 т біоматеріалу.

Деревне вугілля рухається по шнековому транспортеру на сортувальну дільницю, де фасується у мішки. Наповнені мішки розташуються на піддонах (рис. 21 а, б). У кожен мішок розфасовується по 280 кг брикетованого деревного вугілля.



**а**



**б**

Рис. 21 Транспортування деревного вугілля по транспортеру (а) та розфасовування по мішках (б)

Отримане деревне вугілля контролюється щодо концентрації летких компонентів і золи, а також рівня вологості, які оцінюються у лабораторії підприємства. Отримана продукція характеризується високим вмістом нелеткого вуглецю. На рис. 22 показані стадії контролю якості твердого продукту (зважування, підсушування) та продемонстровані дані лабораторного аналізу отриманого деревного вугілля.

**а****б**

Проба1	22 958	23 958	22 968	1,0204	1
Проба2	30 707	31 705	30 717	1,0225	
Масова частка летких					
	Тигель, г	Тигель з пробю до сушки, г	Тигель з пробю після сушки, г	V1/V2, %	V(сух)
Проба1	14 289	15 290	15200	7,1337	7,1
Проба2	13 487	14 488	14 398	7,1337	
Вміст нелеткого вуглецю %		91,9	Лаборант	Іванчо К. В.	
<b>Cfix</b>					
91,9%					

**в**

Рис. 22. Етапи лабораторного контролю: зважування (а), висушування (б) та кінцевий аналіз якості отриманого продукту (в).

Таким чином, внаслідок повільного піролізу на Перечинському лісохімкомбінаті з низькосортної деревини і деревинних залишків отримують деревне вугілля різного розміру і форми (рис. 23).



Рис. 23. Деревне вугілля, виготовлене на Перечинському лісохімічному комбінаті, у вигляді брикетів (а) та дрібних гранул (б)

Вже зазначалось, що процес виробництва деревного вугілля супроводжується утворенням органічної рідкої фракції, яка згорає у котлі-утилізаторі, утворюючи при цьому гарячу пару, що використовується для забезпечення енергетичних потреб деяких технологічних процес, що відбуваються на лісохімкомбінаті. Таким чином, успішно реалізується практика ресурсощадності та енергоефективності, а також економії коштів, які можуть бути використані на інші потреби.

Перечинський лісохімічний комбінат є підприємством, який значну частину своєї продукції реалізує на закордонному ринку. До роботи таких підприємств і до продукції, яку вони експортують, ставляться підвищені вимоги щодо використовуваної сировини та отримання екологічних сертифікатів.. ТДВ «Перечинський лісохімічний комбінат» прагне дотримуватись вищезазначених вимог. Зокрема, він отримав сертифікат PEFC™, який підтверджує забезпечення сталого менеджменту лісу. Щодо роботи персоналу та дотримання безпечних умов для працівників, то підприємство стандартом BSCI відповідно до якого гарантується забезпечення найвищих соціальних умов (робота тільки у відведений для цього час, запобігання примусовому працевлаштуванню і дискримінації, турбота про здоров'я та безпеку праці, проведення політики екологічної безпеки тощо).

Застосування сучасних технологій, дотримання екологічності технологічного процесу, висока якість продукції – ці чинники забезпечило можливість експорту деревного вугілля у країни Європи. Значні обсяги продукції використовується як сировина для виробництва активованого вугілля (компанії Cabot Norit Nederland B.V. (Нідерланди) та AdFiS products GmbH (Німеччина)). Також експортоване деревне вугілля застосовується для створення графітових електродів, потрібних для одержання кремнію (компанія RW Silicium GmbH, Німеччина); як заміник коксу у металургійній промисловості (компанії Wieland-Werke AG, Німеччина та, Montanwerke Brixlegg AG, Австрія), а також продається як паливо для грилю у мережах маркетів LIDL, Kaufland, Carrefour,

EDEKA і TESCO. В Україні продукція комбінату продається як вугілля для грилю під торговою маркою Grilly (eco-friendly продукція).

Для оцінювання рентабельності деревного вугілля і можливої її заміни як паливної сировини було проведено орієнтовний розрахунок її вартості та порівняння вартості коксівного вугілля, яке використовується в металургійній промисловості.

#### **4.2. Калькуляція приблизної вартості деревного вугілля, виготовленого на Перечинському лісохімічному комбінаті**

Ціна на деревне вугілля в країнах ЄС знаходиться в діапазоні від 350 до 2000 євро за тону. Виготовлення такого продукту для власних потреб є дорогим процесом, однак для підприємств, де ця продукція є основною і виготовляється у промислових масштабах вона є економічно вигідною, особливо враховуючи потреби різних підприємств у біопаливах для забезпечення енергетичних потреб чи для технологічного застосування при виробництві кремнію для мікроелектроніки, залучення у процес створення сонячних панелей і батарей та інші процеси.

Розрахунок орієнтовної собівартості вугілля, яке виготовляється в Перечинському лісохімічному комбінаті, передбачає урахування:

- прямих матеріальних витрат, зокрема вартості сировини;
- прямих витрат на оплату праці;
- інших прямих витрат, зокрема пов'язаних зі страхування майна підприємства й цивільної відповідальності власників транспортних засобів, витрат на утримання, експлуатацію та ремонт необоротних активів (без поліпшення об'єктів основних засобів), що використовуються в конкретному виробничому процесі (їх амортизацію, витрати на освітлення, опалення, водопостачання, електропостачання тощо; податки і збори – обов'язкові платежі, які згідно із законодавством відносять на витрати виробництва) тощо;
- вартості додаткової продукції та зворотних відходів.

Щорічно Перечинський лісохімічний комбінат переробляє орієнтовно 180...200 тис. м<sup>3</sup> низькоякісних лісоматеріалів твердолистяних порід, здебільшого у вигляді технологічної і/або дров'яної сировини. Розрахована орієнтовна собівартість деревного вугілля для умов Перечинського лісохімічного комбінату знаходиться у діапазоні 265...350 євро за тону, а зважаючи на доцільність отримання прибутку підприємством та необхідність урахування вартості перевезення за кордон (здебільшого у Німеччину, Нідерланди та Австрію), вартість біовугілля для кінцевого споживача у наведених країнах становитиме орієнтовно 410...470 євро за тону. Така вартість деревного вугілля є вищою на 80...140 євро за тону за вартість коксівного вугілля, проте обмеження, які накладаються зобов'язаннями відносно зниження викидів парникових газів і переваги, які надають вуглецеві кредити, співмірна з переплатою коштів на купівлю біовугілля.

Таким чином, використання біовугілля сприяє зменшенню залежності від невідновлювальних викопних паливних ресурсів та зниженню викидів вуглецю, що є сприятливою стратегією запобігання кліматичним змінам та розвитку стійкої енергетично незалежної системи держави.

## **РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ УМОВАХ**

Цей розділ написаний у відповідності з викладеними у методичних вказівках положеннях [69].

### **5.1. Дотримання правил охорони праці при розвантаженні сировини/завантаженні готової продукції і при виробництві деревного вугілля (у цехах підготовки сировини та піролізному цеху)**

При розвантаженні низькосортної деревини і лісопереробних залишків, які доставляються залізницею на лісохімкомбінат, або завантаженні готових мішків з деревним вугіллям на склади необхідно дотримуватись Правил охорони праці під час вантажно-розвантажувальних робіт [70]. До місць проведення вантажно-розвантажувальних робіт повинен бути доступ транспорту, на який здійснюється перевантаження сировини чи продукції для її завезення на склад чи у цехи. Розвантажування ведеться з того боку залізничної колії, до яких під'їжджають вантажні машини. Майданчик розвантажування повинен бути без нахилів. Ділянки вантажно-розвантажувальних робіт повинні бути добре освітлені, взимку очищені від снігу і за потреби посипані піском. Роботи по розвантаженню і вантаженню повинні виконуватись працівниками у спеціальному одязі та захисних рукавицях, за необхідності із використанням засобів індивідуального захисту.

Складські приміщення мають мати як мінімум два дверні прорізи. Двері у них мають відкриватись назовні або розсовуватися. Підлога в таких приміщеннях є рівною, стійкою до механічних впливів.

Потрібно враховувати, що по території підприємства та у виробничих приміщеннях здійснюється переміщення транспорту (вантажних машин, електрокарів, підймальних установок, рухомих платформ тощо), який є джерелом підвищеної небезпеки, тому неухильно повинні дотримуватись правил техніки безпеки, щоб уникнути травмування чи летальних випадків від наїзду транспортних засобів. Водіям, які керують цими транспортними засобами потрібно пересуватись по території підприємства зі швидкістю, що не перевищує 10 км/год, а у виробничих приміщеннях – 5 км/год. Правил відповідно до яких

повинен ні подаватись звукові застережні сигнали. Рух повинен відбуватись по схемі, заздалегідь затвердженій на підприємстві. Водій відповідає за те, що транспортний засіб був справний і повинен подати звукові сигнали на ділянках, де є поганий огляд [71].

Оскільки по території підприємства проходить залізнична колія, попри те, що рух по ній не є надто інтенсивним, працівникам потрібно дотримуватись Правил [72] відповідно до яких, перехід через колію можливий тільки тоді, коли на ній відсутній рух потягів, локомотивів. Категорично забороняється перелазити під вагонами, перебувати на колії поблизу контактної мережі.

Технологічні процеси на лісохімічних виробництвах повинні організовуватись із розумінням, що етапи роботи включають можливе виділення небезпечних токсичних речовин, які можуть потрапляти у приміщення виробничих цехів (зокрема у піролізному цеху) у випадку порушення функціонування обладнання або його розгерметизації. Тому щодо такого устаткування повинні бути дотримані всі експлуатаційні вимоги, вони повинно вчасно обслуговуватись і в разі виявлення неполадок їх необхідно якомога швидше усувати. Оскільки всі процеси на виробництві автоматизовані, то, як правило, збій у роботі обладнання чи певних етапах виробничих процесів буде відображений на моніторах комп'ютерів. Огляд і ремонтні роботи устаткування можна проводити тільки після ретельного очищення його від виробничих залишків. Але варто пам'ятати, що частина цих процесів відбувається за дуже високих температур, тому обстеження і виявлення неполадок роботи реторти чи іншого обладнання ведеться лише після її охолодження і з дотримання техніки безпеки.

Для створення комфортних умов роботи у виробничих приміщеннях повинен підтримуватись допустимий рівень шумового, вібраційного, електромагнітного навантаження, відповідний рівень освітленості, а працівники повинні бути забезпечені спецодягом і засобами індивідуального захисту.

## **5.2. Заходи із дотримання правил протипожежної безпеки на складах зберігання сировини (низькосортної деревини і лісопереробних залишків) і готової продукції (деревного вугілля)**

Лісопереробні залишки і деревне вугілля характеризуються як матеріали, які досить легко займаються і можуть тривалий час горіти. Тому місця їхнього зберігання відносяться до зон підвищеної пожежонебезпечності і потрібно строго дотримуватись комплексу заходів, щоб уникнути виникнення пожеж. Варто зазначити, що при зберіганні деревного вугілля у значних об'ємах на закритих складах може статись самозаймання внаслідок накопичення великої кількості пилу та наявності у деревному вугіллі летких речовин. Щоб уникнути таких ризиків, готову продукцію щільно укладають, а також передбачають застосування води та антипіренів для уникнення виникнення осередків самозаймання.

Необхідним має бути достатній запас води для потреб пожежогасіння. Пожежне обладнання та інвентар розташовується на легкодоступних місцях, воно повинно бути сертифіковане, а також необхідно контролювати його справність.

Дотримання заходів щодо пожежобезпеки повинні дотримуватись і при проведенні навантажувально-розвантажувальних робіт.

## **5.3. Вимоги до щодо дотримання правил безпеки для працівників складів сировини та готової продукції.**

Такі промислові підприємства характеризуються високим ризиком виникнення пожеж, отже, дотримання відповідних стандартів безпеки є необхідним для забезпечення безпеки працівників та уникнення аварійних ситуацій. Основні аспекти охорони праці і протипожежних заходів включають:

1. Організацію навчання та інструктаж з техніки безпеки: працівники повинні бути навчені правилам безпеки та процедурам реагування на небезпечні ситуації. Це включає навчання щодо використання захисного обладнання, правильної роботи з обладнанням та процедур евакуації у разі надзвичайних ситуацій.

2. Використання захисного обладнання: працівники повинні мати доступ до необхідного захисного обладнання, такого як каски, захисні окуляри, взуття з металевим носком, респіратори тощо. Вони повинні використовувати це обладнання під час роботи в потенційно небезпечних зонах.
3. Планування та організація аварійних ситуацій: підприємство повинно мати план надзвичайних ситуацій, який включає процедури реагування на пожежу, витоки газу, аварії тощо. План повинен бути відомим усім працівникам, а також повинні проводитись регулярні тренування і навчання щодо його виконання.
4. Перевірка обладнання та інфраструктури: важливо регулярно перевіряти технічний стан обладнання, систем вентиляції, електричного освітлення та інфраструктури, щоб переконатися, що вони працюють належним чином і відповідають вимогам безпеки. періодичні технічні огляди та обслуговування допомагають виявляти можливі несправності та усувати їх.
5. Регулярні інспекції та аудити: проведення регулярних інспекцій та аудитів допомагає виявляти потенційні проблеми з охороною праці та протипожежною безпекою. Це дозволяє вчасно вживати заходів для запобігання аваріям та покращення умов праці.
6. Система звітності та аналізу інцидентів: важливо мати систему звітності про інциденти та близькі до нещасних випадків ситуації. Аналіз таких інцидентів допомагає виявити причини та прийняти заходи для їх уникнення в майбутньому.
7. Облаштування всіх цехів підприємства протипожежними заходами, а на території повинен бути обладнаний протипожежний водопровід, з можливістю швидкого доєднання до пожежної водойми або водного об'єкта поблизу.

Ці заходи спрямовані на забезпечення безпеки працівників, запобігання аваріям та зниження негативного впливу на довкілля під час перероблення біосировини і виробництва біовугілля.

#### **5.4. Оцінювання потенційних небезпек для здоров'я працівників підприємства та забезпечення санітарно-гігієнічних норм для персоналу**

Розвантаження низькосортної деревини і деревинних залишків, їхнє розпилювання і розколювання, складування готової продукції характеризуються виділенням у повітря виробничих приміщень пилю різного походження і дисперсності, який може бути не тільки причиною виникнення пожеж на підприємстві, але й спричиняти негативні наслідки для здоров'я, насамперед порушуючи роботу дихальної системи. Окрім того, деревне вугілля може містити інші небезпечні для організму компоненти, такі як сажу, важкі метали, ароматичні вуглеводні тощо. Такі речовини можуть спричиняти порушення функціонування різних систем організму, викликати алергічні реакції, розвиток хронічних захворювань, впливати на якість і тривалість життя. Для запобігання таким порушенням важливим є контроль за якістю сировини, яка поступає на перероблення, дотримання заходів щодо безпеки етапів виробництва на всьому технологічному циклі та аналіз готової продукції.

Важливим є проходження щорічних профілактичних оглядів для персоналу, що залучений у виробництво, а також створення належних умов праці на самому підприємстві – наявність душових кабін, кімнат відпочинку, функціонування їдальні тощо.

Дотримання всіх вищеперерахованих правил, а також контроль щодо виконання комплексу природоохоронних заходів забезпечує не тільки значний економічний ефект від діяльності підприємства, але й не виявляє негативного впливу на компоненти довкілля.

#### **5.5. Дотримання правил безпеки при виникненні надзвичайних ситуацій.**

Надзвичайна ситуація на лісохімічному комбінату може бути викликана масштабною пожежею на великій площі або потенційним ракетним ударом, які можуть спричинити загрози життю людей або їх загибель, завдати значних матеріальних збитків і привести до таких наслідків, за яких шкода для довкілля

стане такою, що приведе до неможливості проживання на даній території впродовж певного часу.

Для уникнення загроз щодо ймовірної пожежі необхідно дотримуватись правил щодо охорони праці, викладених вище. У разі можливих ракетних обстрілів і оголошення повітряної тривоги необхідно припинити роботу, зупинити по можливості роботу обладнання і спуститись в укриття, перебуваючи там до завершення тривоги.

## ВИСНОВКИ

1. Для виробництва деревного вугілля можна застосовувати лісопереробні залишки різного походження (низькосортну деревину і деревинні залишки).
2. Склад та фізико-хімічні властивості вторинної сировини позначаються на якісних і кількісних характеристиках отриманого деревного вугілля.
3. Існують різні технології отримання деревного вугілля (піроліз, гідротермічна карбонізація, торрефікація), визначальними у яких є умови проведення (температура, швидкість і тривалість процесу, відсутність/наявність кисню).
4. Результатом термохімічного перероблення вторинної сировини є отримання твердої фракції (деревного вугілля), рідкої фракції (біоолії) і газоподібної фракції (біогазу) у різних співвідношеннях залежно від умов перероблення.
5. Деревне вугілля в основному отримують за допомогою піролізу, який відбувається за анаеробних умов і при високих температур.
6. Технологічний процес перероблення низькосортної деревини і деревинних залишків на Перечинському лісохімічному комбінаті включає транспортування, підготовку і перероблення сировини шляхом піролізу.
7. Різні умови піролізу приводять до отримання двох фракцій деревного вугілля – великих брикетів та дрібних частинок, які мають різне промислове призначення.
8. Приблизна вартість деревного вугілля Перечинського лісохімічного комбінату знаходиться в середньорівневому діапазоні коштів, які витрачаються на купівлю однієї тонни цієї продукції в країнах Європи.
9. Вироблене із низькосортної деревини і деревинних залишків деревне вугілля може застосовуватись як біопаливо на промислових підприємствах металургійної галузі України, підсилюючи енергетичну незалежність держави та скорочення викидів парникових газів, насамперед CO<sub>2</sub>.

## ВИКОРИСТАНІ ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil (aka IBI Biochar Standards) Version 2.1 - November 2015. 61 p.// [https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI\\_Biochar\\_Standards\\_V2.1\\_Final.pdf](https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf).
2. Lucchini, P., Quilliam, R.S., DeLuca, T.H., Vamerali, T., Jones, D.L., 2014. Increased bioavailability of metals in two contrasting agricultural soils treated with waste wood derived biochar and ash. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21, 3230–3240. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2272-y>.
3. Yao, Y., Gao, B., Inyang, M., Zimmerman, A.R., Cao, X., Pullammanappallil, P., Yang, L., 2011. Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: characterization and phosphate removal potential. *Bioresour. Technol.* 102, 6273–6278. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.006>.
4. Hoseini, R.Z., Goltapeh, E.M., Modarres-Sanavy, S.A.M., Heidarzadeh, A., 2021. Effect of the bio-fertilizers on the steviol glycosides (SGs) content and biomass in *Stevia A. Rombel*, P. Krasucka and P. Oleszczuk *Science of the Total Environment* 816 (2022) 151588 15 rebaudiana (Bert.) Bertoni at vegetative and flowering stages. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 275, 109658. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109658>.
5. Tomczyk, B., Siatecka, A., Gao, Y., Ok, Y.S., Bogusz, A., Oleszczuk, P., 2020. The conversion of sewage sludge to biochar as a sustainable tool of PAHs exposure reduction during agricultural utilization of sewage sludges. *J. Hazard. Mater.* 392, 122416. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122416>.
6. Abusweireh R.S., Rajamohan N., Sonne Ch., Vasseghian Y. Algae biogas production focusing on operating conditions and conversion mechanisms – A review. *Heliyon*, 2023. V. 9, Is.7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17757>.
7. Stefaniuk, M., Oleszczuk, P., 2016. Addition of biochar to sewage sludge decreases freely dissolved PAHs content and toxicity of sewage sludge-amended soil. *Environ. Pollut.* 218, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.063>.
8. Joseph S and Lehmann J (2009) Developing a biochar classification and test methods. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* , pp. 107 – 126 ( London : Earthscan.
9. Van Zwieten L , Kimber S , Morris S , Chan KY , Downie A , Rust J , Joseph SD and Cowie A ( 2010 ) Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility . *Plant and Soil* 327, 235 – 246 .
10. Van Zwieten L , Kimber S , Morris S , Chan KY , Downie A , Rust J , Joseph SD and Cowie A ( 2010 ) Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility . *Plant and Soil* 327, 235 – 246 .

11. L. Usevičiūtė, E. Baltrėnaitė-Gedienė Dependence of pyrolysis temperature and lignocellulosic physical-chemical properties of biochar on its wettability *Biomass Convers. Biorefinery* (2020), pp.1-19, 10.1007/s13399-020-00711-3.
12. C. Pituello, O. Francioso, G. Simonetti, A. Pisi, A. Torreggiani, A. Berti Characterization of chemical – physical , structural and morphological properties of biochars from biowastes produced at different temperatures *J. Soils Sediments* (2014), pp.1-13, 10.1007/s11368-014-0964-7.
13. Weber, K., & Quicker, P. (2018). *Properties of biochar. Fuel*, 217, 240–261. doi:10.1016/j.fuel.2017.12.054.
14. C. Briggs, J.M. Breiner. R.C. Graham Physical and chemical properties of *Pinus ponderosa* charcoal: implications for soil modification *Soil Sci.*, 177 (2012), pp.263-268, 10.1097/SS.0b013e3182482784.
15. G. Kwon, A. Bhatnagar, H. Wang, E.E. Kwon, H. Song, A review of recent advancements in utilization of biomass and industrial wastes into engineered biochar, *J. Hazard Mater.* (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123242>.
16. G. Sampatrao, *et al.* Review on biomass feedstocks , pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar : state-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy *J. Clean. Prod.*, 297 (2021), Article 126645, 10.1016/j.jclepro.2021.126645].
17. K. Jindo, H. Mizumoto, Y. Sawada, M.A. Sanchez-Monedero, T. Sonoki Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues *Biogeosciences* (2014), pp. 6613-6621, 10.5194/bg-11-6613-2014/.
18. Yun Lin Y., Munroe P., Joseph St., Henderso R., Ziolkowski A. Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochars, *Chemosphere*, V. 87, Is. 2, 2012, P. 151-157, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.12.007>.
19. Masto, R. E., Kumar, S., Rout, T. K., Sarkar, P., George, J., & Ram, L. C. (2013). *Biochar from water hyacinth (Eichornia crassipes) and its impact on soil biological activity. CATENA*, 111, 64–71. doi:10.1016/j.catena.2013.06.025. 10.1016/j.catena.2013.06.025.
20. Mukherjee, A. and Zimmerman, A.R. (2013) Organic Carbon and Nutrient Release from a Range of Laboratory-Produced Biochars and Biochar-Soil Mixtures. *Geoderma*, 193, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.002>.
21. Bergman PC., Boersma R, Zwart RWR, Kiel JH.. Torrefaction for biomass cofiring in existing coal-fired power stations. *Energy Res Cent Netherlands ECN ECNC05013* 2005:71.
22. Vassilev L. Usevičiūtė, E. Baltrėnaitė-Gedienė Dependence of pyrolysis temperature and lignocellulosic physical-chemical properties of biochar on its

- wettability *Biomass Convers. Biorefinery* (2020), pp.1-19, 10.1007/s13399-020-00711-3.
23. Shubh Pravat Singh Yadav, Sujan Bhandari, Dibya Bhatta, Anju Poudel, Susmita Bhattarai, Puja Yadav, Netra Ghimire, Prava Paudel, Pragya Paudel, Jiban Shrestha, Biplov Oli. Biochar application: A sustainable approach to improve soil health, *Journal of Agriculture and Food Research*, V. 11, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>.
  24. Гелету́ха Г., Матвеев Ю., Олійник Є., Куций Д. Практичний посібник з використання біомаси як палива в муніципальному секторі України. 2017. 29 с.
  25. Ключ С.В. Енергоефективне перетворення біомаси в горючий газ і біовугілля в газогенераторах щільного шару палива. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. 2016. Київ. 167 с.
  26. Що таке брикет з деревного вугілля або деревинновугільний брикет // <https://bio.ukr.bio/ua/articles/4098/>
  27. Wang, B., Gao, B., Fang, J., 2017. Recent advances in engineered biochar productions and applications. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 47, 2158e2207.
  28. Hussain, A., Maitra, J., Khan, K.A., 2017. Development of biochar and chitosan blend for heavy metals uptake from synthetic and industrial wastewater. *Applied Water Science* 4525e4537.
  29. Manikandan SK, Pallavi P, Shetty K, Bhattacharjee D, Giannakoudakis DA, Katsoyiannis IA, Nair V (2023) Effective Usage of Biochar and Microorganisms for the Removal of Heavy Metal Ions and Pesticides. *Molecules* 28(2): 719. [doi.org/10.3390/molecules28020719](https://doi.org/10.3390/molecules28020719).
  30. Графеновий шар допоможе сонячним панелям генерувати енергію від дощу // <https://ecotechnica.com.ua/uk/energy/solntse/grafenovyj-sloj-pomozhet-solnechnym-panelyam-generirovat-energiyu-ot-dozhdya>
  31. Ning, C. C., Wang, J. W. & Cai, K. Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review. *Ecol. Environ. Sci.* 25, 175–181. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.01.026> (2016).5,6.
  32. Lori, M., Symnaczik, S., Mäder, P., De Deyn, G. and Gattinger, A. 2017. Organic farming enhances soil microbial abundance and activity-A meta-analysis and meta-regression. *PloS one.* 12 (7): e0180442.
  33. Gupta S.; Kua HW, Koh HJ (2018). Application of biochar from food and wood waste as green admixture for cement mortar. *Science of The Total Environmen .* 619-620: 419–435. [doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.044](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.044).
  34. Gupta S., Kua HW, Pang SD., Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature, *Construction and Building Materials*, Volume 234, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117338>.
  35. Schmidt HP, Hagemann N, Draper K, Kammann C. The use of biochar in animal feeding. *PeerJ.* 2019 Jul 31;7:e7373. doi: 10.7717/peerj.7373. PMID: 31396445; PMCID: PMC6679646.
  36. Lean G. Ancient skills 'could reverse global warming' Trials begin of a technique used by Amazon Indians that takes CO<sub>2</sub> and locks it safely into soil.

December 2008. // <http://www.independent.co.uk/environment/climate-change/ancient-skills-could-reverse-global-warming-1055700.html>.

37. Yousaf, Balal; Liu, Guijian; Wang, Ruwei; Abbas, Qumber; Imtiaz, Muhammad; Liu, Ruijia (2017). Investigating the biochar effects on C-mineralization and sequestration of carbon in soil compared with conventional amendments using stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ) approach. *Global Change Biology Bioenergy* 9 (6): 1085–1099. doi:10.1111/gcbb.12401.

38. Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty. The Royal Society. 2009 // [https://royalsociety.org/-/media/Royal\\_Society\\_Content/policy/publications/2009/8693.pdf](https://royalsociety.org/-/media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf).

39. Dominic Woolf; James E. Amonette; F. Alayne Street-Perrott; Johannes Lehmann; Stephen Joseph (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* 1 (5): 56. doi:10.1038/ncomms1053.

40. Liu, Q., Meki, K., Zheng, H. *et al.* Biochar application in remediating salt-affected soil to achieve carbon neutrality and abate climate change. *Biochar* 5, 45 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00244-8/>

41. Fawzy S., Osman AI., Yang H. Doran J. Rooney DW. Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review *Environmental Chemistry Letters* (2021) 19:3023–3055 <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01210-1>.

42. Lamichhane B., Dunn B., Ouedraogo A., Singh H. Preparation of Biochar for Use as a Soil Amendment. 2023. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/preparation-of-biochar-for-use-as-a-soil-amendment.html>].

43. Yang H., Yan R., Chen H., Lee DH., Zheng Ch. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, V. 86, Is. 12–13, 2007, P.1781–1788, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>.

44. Hossain, M.Z., Bahar, M.M., Sarkar, B. *et al.* Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar* 2, 379–420 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00065-z>.

45. Paz-Ferreiro J, Nieto A, Méndez A, Askeland MPJ, Gascó G. Biochar from Biosolids Pyrolysis: A Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2018 May 10;15(5):956. doi: 10.3390/ijerph15050956. PMID: 29748488; PMCID: PMC5981995. 32.

46. Tripathi, Manoj; Sabu, J.N.; Ganesan, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2015) 55: P. 467–481. doi:10.1016/j.rser.2015.10.122.

47. Sakhiya, A.K., Anand, A. & Kaushal, P. Production, activation, and applications of biochar in recent times. *Biochar* 2, 253–285 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1>.

48. Wenjing W., Pelle M., Weihong Y., Chuan W., Anders H., Hassan S. Utilization of biomass for blast furnace in Sweden: Report I: Biomass availability and upgrading technologies. 2013. 97 p. DOI:10.13140/RG.2.2.13641.39522.
49. Guo, J. and A. C. Lua. 2000. Preparation Of Activated Carbons from OilPalm-Stone Chars By Microwave-Induced Carbon Dioxide Activation. *Carbon*. 38(14): 1985–1993.
50. Zhang Z., Zhu Z., Shen B., Liu L. Insights into biochar and hydrochar production and applications: a review. *Energy*, 171 (2019), pp. 581-598, 10.1016/j.energy.2019.01.035.
51. Islam, M.T.; Sultana, A.I.; Chambers, C.; Saha, S.; Saha, N.; Kirtania, K.; Reza, M.T. Recent Progress on Emerging Applications of Hydrochar. *Energies* 2022, 15, 9340. <https://doi.org/10.3390/en15249340>.
52. Kwoczynski Z., Čmelík J. Characterization of biomass wastes and its possibility of agriculture utilization due to biochar production by torrefaction process. *Journal of Cleaner Production*, V. 280, P. 2, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124302>.
53. Final Euroref\_Steel in figures. 2023. 61 p. [urofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2023/FINAL\\_EUROFER\\_Steel-in-Figures\\_2023.pdf](https://urofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2023/FINAL_EUROFER_Steel-in-Figures_2023.pdf).
54. Babich, D. Senk Biomass use in the steel industry: back to the future *Stahl Eisen*, 133 (5) (2013), pp. 57-67.
55. Safarian S. To what extent could biochar replace coal and coke in steel industries? *Fuel*, V. 339, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127401>.
56. S.A. Halim, J. Swithenbank Characterisation of Malaysian wood pellets and rubberwood using slow pyrolysis and microwave technology *J Anal Appl Pyrol*, 122 (2016), pp. 64-75
57. N.T. Farrokh, H. Suopajarvi, O. Mattila, K. Umeki, A. Phounglamcheik, H. Romar, *et al.* Slow pyrolysis of by-product lignin from wood-based ethanol production—A detailed analysis of the produced chars *Energy*, 164 (2018), pp. 112-123
58. D. Borah, M. Baruah, I. Haque Oxidation of high sulphur coal. Part 1. Desulphurisation and evidence of the formation of oxidised organic sulphur species *Fuel*, 80 (4) (2001), pp. 501-507
59. [https://uk.wikipedia.org/wiki/Металургійна\\_промисловість\\_України](https://uk.wikipedia.org/wiki/Металургійна_промисловість_України).
60. Агапова В. Що лишилось від української металургії <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/03/29/698540/>.
61. Зінченко С. Виклики для українського ГМК у 2024 році // <https://gmk.center/ua/posts/vyklyky-dlia-ukrainskoho-hmk-u-2024-rotsi>
62. Українські металурги збільшили виробництво сталі на 37% // <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3885179-ukrainski-metalurgi-zbilsili-virobnictvo-stali-na-37.html>

63. Крижний А. Металурги б'ють на сполох: окупація Покровська кратно обвалить виробництво сталі. 2024 // <https://pravda.com.ua/news/2024/10/16/720649/>
64. Що таке зелена металургія? // <https://greensteel.com.ua/zelena-metalurgiya/shho-take-zelena-metalurgiya/>
65. Закон України “Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії”
66. Проект постанови Кабінету Міністрів України “Про затвердження порядку надання довідки про підтвердження статусу підприємства “зеленої” електрометалургії”
67. Підприємства зеленої металургії в Україні // <https://greensteel.com.ua/pidpryyemstva-zelenoyi-metalurgiyi-v-ukrayini/>
68. Replacing coal with sustainable, circular carbon in our steelmaking processes // <https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/decarbonisation-technologies/torero-replacing-coal-with-sustainable-circular-carbon-in-our-steelmaking-processes>
69. Кшивецький Б.Я., Сторожук В.М., Маєвська О.М., Соколовський І.Я., Гайда С.В. Методичні рекомендації для підготовки магістерської кваліфікаційної роботи зі спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища». – Львів: НЛТУ України, 2023. – 44 с.
70. Про затвердження Правил охорони праці під час вантажно-розвантажувальних робі. Наказ № 21 від 19.01.2015 //
71. Костиця В. Забезпечуємо безпеку дорожнього руху на підприємстві. <https://pro-op.com.ua/article/855-bezpeka-dorojnogo-ruhu-na-pdprimstv>
72. Про затвердження Правил технічної експлуатації залізничного транспорту промислових підприємств // Наказ Міністерства промислової політики України від 15 лютого 2010 року № 70