

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій та дизайну
Кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та
безпеки життєдіяльності

Пояснювальна записка

до магістерської роботи
на тему:

**Дослідження та удосконалення технології переробки
відходів деревообробної промисловості для виробництва
біопалива**

***Research and improvement of technology for processing wood
processing industry waste for biofuel production***

Виконав: студент 6 курсу, групи ТЗНС-61м
Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього
середовища»
Германков Д.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник Соколовський І.А.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Ференц О.Б.
(прізвище та ініціали)

Львів-2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут
Кафедра

деревообробних технологій і дизайну
технологій захисту навколишнього
середовища і деревини та безпеки
життєдіяльності
магістр
183 «Технології захисту
навколишнього середовища»

Освітній рівень
Спеціальність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, проф.

Кшивецький Б.Я.

“30” серпня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Германкову Дмитру Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Дослідження та удосконалення технології переробки відходів деревообробної промисловості для виробництва біопалива**
Research and improvement of technology for processing wood processing industry waste for biofuel production

Керівник роботи: **Соколовський Ігор Андрійович**, доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом НЛТУ України від “15” травня 2025 року № С- 316

2. Строк подання студентом роботи до 15.12.2025 року.

3. Вихідні дані до роботи _____

Виконати огляд літературних джерел з проблематики, дослідження можливостей використання нетрадиційних джерел енергії для деревообробного виробництва і значення для довкілля

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

1. Аналіз стану питання та задачі досліджень.

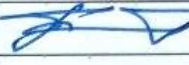

2. Дослідження можливостей використання нетрадиційних джерел енергії для деревообробного виробництва і значення для довкілля Розроблення

рекомендацій щодо використання нетрадиційних джерел енергії з урахуванням специфіки деревообробного виробництва

3. Охорона праці.

4. Перелік презентаційного матеріалу: (слайди презентації результатів досліджень)

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц. Сомар Г.В.		

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
	Аналіз стану питання	до 01.10.25	
	Теоретичні дослідження	до 15.11.25	
	Аналіз та оцінка результатів досліджень	до 30.11.25	
	Охорона праці	до 05.12.25	
	Оформлення пояснювальної записки і підготовка презентації	до 15.12.25	

Студент  Германков Д.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  Соколовський І.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи переробки відходів деревообробної промисловості на біопаливо

- 1.1. Види, склад та характеристика деревних відходів
- 1.2. Потенціал відходів деревообробки як сировини для біопалива
- 1.3. Основні методи переробки деревних відходів: фізико-механічні, термохімічні, біохімічні
- 1.4. Порівняльний аналіз енергетичної ефективності різних видів біопалива з деревини

РОЗДІЛ 2. Нормативно-правові та технологічні аспекти виробництва біопалива з деревних відходів

- 2.1. Законодавче регулювання у сфері поводження з відходами в Україні
- 2.2. Європейські директиви щодо використання біомаси як джерела енергії
- 2.3. Технологічні вимоги до виробництва твердого біопалива (пелет, брикетів)
- 2.4. Сертифікація та стандарти якості біопалива

РОЗДІЛ 3. Аналіз існуючих технологій переробки деревних відходів на підприємстві

- 3.1. Характеристика деревообробного підприємства та структури його відходів
- 3.2. Оцінка діючої системи збору, сортування та підготовки відходів до

переробки

3.3. Аналіз ефективності існуючих технологічних процесів виробництва біопалива

3.4. Вплив виробництва біопалива на екологічний стан навколишнього середовища

РОЗДІЛ 4. Удосконалення технології переробки відходів для підвищення ефективності виробництва біопалива

4.1. Пропозиції щодо оптимізації технологічного процесу переробки деревних відходів

4.2. Впровадження енергоефективного обладнання та систем автоматизації

4.3. Екологічна оцінка запропонованих рішень

Розділ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена дослідженню процесів переробки відходів деревообробної промисловості для виробництва біопалива та розробці практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності цих технологій. У роботі проаналізовано сучасний стан використання деревних відходів в Україні, визначено їх потенціал як джерела відновлюваної енергії, а також розглянуто основні методи їх переробки - механічні, термохімічні та біохімічні.

Особлива увага приділена нормативно-правовим аспектам поводження з відходами, вимогам до якості та сертифікації біопалива відповідно до європейських стандартів. На основі аналізу реального підприємства розроблено пропозиції щодо удосконалення технологічного процесу, впровадження енергоощадних рішень і підвищення екологічної безпеки.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації виробництва біопалива на деревообробних підприємствах, а також у розробці регіональних програм енергетичної незалежності на основі біоресурсів.

Ключові слова: деревні відходи, біопаливо, переробка, екологічна безпека, енергоефективність, пелети, брикети, технологічна оптимізація.

ANNOTATION

The master's thesis is devoted to the study of wood industry waste processing technologies for biofuel production and to the development of practical recommendations for improving the efficiency of these technologies. The research analyzes the current state of wood waste utilization in Ukraine, assesses its potential as a renewable energy source, and examines the main processing methods - mechanical, thermochemical, and biochemical.

Special attention is paid to the legal and regulatory framework of waste management, as well as to the requirements for biofuel quality and certification according to European standards. Based on the analysis of a real enterprise, proposals were developed for optimizing the technological process, implementing energy-efficient solutions, and improving environmental safety.

The results of the study can be used to optimize biofuel production at woodworking enterprises and to support regional energy independence programs based on renewable biomass resources.

Keywords: wood waste, biofuel, recycling, environmental safety, energy efficiency, pellets, briquettes, process optimization.

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасних умовах розвитку промисловості одним із пріоритетних напрямів екологічної політики України є раціональне використання природних ресурсів і зменшення кількості промислових відходів. Деревообробна промисловість, яка є важливою складовою економіки західних регіонів України, утворює значні обсяги деревних залишків - тирси, стружки, кори, обрізків, які часто не використовуються належним чином або спалюються без контролю, що спричиняє викиди шкідливих речовин у повітря.

Переробка цих відходів у біопаливо дозволяє не лише зменшити екологічне навантаження на довкілля, а й створює економічні переваги - зниження витрат на енергоносії, підвищення енергетичної незалежності підприємств, формування замкнених безвідходних технологічних циклів. Крім того, розвиток виробництва біопалива відповідає глобальним тенденціям декарбонізації економіки та переходу до відновлюваних джерел енергії.

Тому дослідження та удосконалення технологій переробки відходів деревообробної промисловості для виробництва біопалива є актуальним завданням, що поєднує екологічні, економічні та енергетичні пріоритети сталого розвитку.

Метою роботи є дослідження існуючих технологій переробки відходів деревообробної промисловості та розроблення рекомендацій щодо їх удосконалення для підвищення ефективності виробництва біопалива й зниження негативного впливу на довкілля.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких **завдань**:

1. Проаналізувати види, склад та енергетичний потенціал деревних відходів.
2. Дослідити сучасні технології переробки деревних відходів у біопаливо.
3. Визначити законодавчі та нормативні вимоги до виробництва біопалива в Україні та ЄС.
4. Провести оцінку ефективності діючих технологій на базі конкретного деревообробного підприємства.
5. Запропонувати шляхи вдосконалення технологічного процесу з урахуванням екологічних та економічних аспектів.
6. Виконати оцінку екологічних та енергетичних переваг упровадження запропонованих рішень.

Об’єктом дослідження є технологічні процеси переробки деревних відходів у біопаливо на деревообробних підприємствах.

Предметом дослідження є методи та технічні рішення з удосконалення технологій переробки деревних залишків для підвищення екологічної та енергетичної ефективності виробництва.

Наукова новизна. У роботі вперше для умов українських деревообробних підприємств запропоновано комплексну модель оцінки ефективності переробки відходів із урахуванням енергетичного виходу, екологічного ефекту та економічної доцільності. Обґрунтовано доцільність переходу на комбіновані технології з використанням попереднього висушування та грануляції деревних відходів, що забезпечує підвищення ККД процесу спалювання до 20–25%. Запропоновано практичні рекомендації щодо інтеграції систем очищення повітря та рекуперації тепла в технологічний цикл виробництва біопалива.

Практичне значення роботи

Результати дослідження можуть бути використані:

- на деревообробних підприємствах для оптимізації процесів утилізації відходів і зменшення екологічного навантаження;
- у розробці регіональних програм поводження з відходами та стимулювання виробництва біопалива;
- у навчальному процесі під час підготовки фахівців із технологій захисту навколишнього середовища;
- для впровадження сучасних енергоефективних рішень у рамках політики сталого розвитку підприємств.

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи переробки відходів деревообробної промисловості на біопаливо

1.1. Види, склад та характеристика деревних відходів

Деревообробна промисловість є одним із головних джерел утворення органічних відходів у вигляді залишків деревини, кори, стружки, тирси, обрізків та інших побічних продуктів. Кількість таких відходів може становити від **10 до 60%** від загального обсягу оброблюваної деревини, залежно від типу виробництва (лісопильне, фанерне, меблеве, плитне тощо).

Відходи деревини мають високу теплотворну здатність (від 14 до 18 МДж/кг для сухої речовини), що робить їх перспективною сировиною для виробництва біопалива - пелет, брикетів, деревного вугілля, біогазу. Залежно від походження, вони поділяються на **технологічні, експлуатаційні та постспоживчі**.

Технологічні відходи утворюються в процесі механічної обробки деревини (стружка, тирса, обрізки), **експлуатаційні** - під час ремонту чи демонтажу дерев'яних конструкцій, **постспоживчі** - після завершення терміну служби дерев'яних виробів.

**Таблиця 1.1. Класифікація та характеристика основних видів
деревних відходів [14-17]**

Вид відходів	Джерело утворення	Основні характеристики	Середній вміст вологи, %	Теплотворна здатність, МДж/кг	Перспективність для переробки
Тирса	Розпилювання, шліфування деревини	Дрібна фракція, низька щільність, легко піддається пресуванню	35–55	14–16	Висока (для пелет і брикетів)
Стружка	Фрезерування, стругання	Подовжена форма частинок, низька сипучість	25–45	15–17	Висока (брикетування, компостування)
Кора	Очищення колод перед обробкою	Високий вміст золи, дубильних речовин	40–60	10–13	Середня (біовугілля, компост)
Обрізки, тріска	Розкроювання, виробництво фанери, плит	Великі фрагменти деревини, однорідна структура	20–40	16–18	Висока (чіпси, паливна тріска)
Пил деревний	Шліфувальні процеси, фрезерування	Дуже дрібна фракція, потребує зв'язувальних добавок	40–60	13–15	Середня (брикетування, біогаз)
Відпрацьовані дерев'яні вироби	Демонтаж меблів, конструкцій	Можуть містити лакофарбові покриття, клей, смоли	10–25	15–18	Обмежена (попередня очистка необхідна)

За гранулометричним складом відходи поділяють на **дрібні (до 1 мм), середні (1–10 мм) і крупні (понад 10 мм)**. Цей показник суттєво впливає на вибір технології переробки: дрібні фракції доцільно використовувати для виробництва пелет, а крупні - для виготовлення тріски або деревного вугілля.

З точки зору екології, деревні відходи є **біогенним джерелом енергії**, тобто таким, що не підвищує загальний баланс вуглецю в атмосфері. Однак при їх неналежному зберіганні або спалюванні без очищення утворюються викиди пилу, оксиду вуглецю, формальдегіду, що потребує впровадження контрольованих технологій переробки.

У результаті дослідження складу та властивостей деревних відходів встановлено, що вони мають високий потенціал енергетичного використання, за умови попереднього сушіння до рівня вологості 8–12% і пресування у щільну форму. Це дає змогу зменшити витрати на транспортування та підвищити ефективність горіння.

1.2. Потенціал відходів деревообробки як сировини для біопалива

Сьогодні, коли енергетична незалежність і екологічна безпека стають пріоритетами державної політики, деревні відходи знову опиняються в центрі уваги. Те, що донедавна вважалося просто сміттям, поступово перетворюється на **цінний енергетичний ресурс**. Україна, як одна з лісових країн Європи, має потужний потенціал для виробництва біопалива саме з відходів деревообробки - матеріалу, який є відновлюваним, екологічним і локально доступним.

Відходи деревообробної промисловості - це не просто тирса чи тріска. Це **енергія, «законсервована» у деревині**, яку можна повернути у виробничий цикл. До таких відходів належать обрізки, стружка, кора, тирса, шліфувальний пил тощо. Їхній хімічний склад (целюлоза, геміцелюлоза,

лігнін) робить цю сировину ідеальною для термічної або біохімічної переробки.

За підрахунками вітчизняних фахівців, щороку в Україні накопичується понад 3 мільйони тонн деревних відходів, що може замінити близько 500 млн м³ природного газу. Це - колосальний резерв енергії, який часто просто спалюється у відкритих місцях або вивозиться на полігони.

Перевага деревних відходів у тому, що вони мають високу теплотворну здатність - у середньому від 14 до 18 МДж/кг у сухому стані. За цим показником вони практично не поступаються бурому вугіллю, проте є набагато екологічнішими: не містять сірки, важких металів і не утворюють токсичних сполук під час спалювання.

Крім того, біопаливо з деревини вважається вуглецево нейтральним. Це означає, що кількість CO₂, яка виділяється під час його спалювання, дорівнює обсягу, поглинутому деревом у процесі росту. Таким чином, коло «вирощування - використання - спалювання» не порушує вуглецевого балансу планети.

Потенціал деревних відходів суттєво зростає завдяки розвитку новітніх технологій:

- **пелетування** - перетворення сипких відходів на зручні гранули високої щільності;
- **брикетування** - виготовлення компактного палива з тирси чи стружки без використання хімічних домішок;
- **піроліз** - термічне розкладання деревини для отримання газу, рідких продуктів і деревного вугілля;
- **газифікація** - виробництво синтез-газу, який може використовуватися для генерації електроенергії.

На практиці деревообробні підприємства, які переходять на замкнутий цикл утилізації відходів, досягають **економії енергоресурсів до 25–30%**. Наприклад, використання власних пелет замість природного газу або дизпалива дозволяє окупити інвестиції в обладнання за 2–3 роки.

Не менш важливим є **екологічний ефект**: утилізація відходів у вигляді палива запобігає їхньому гниттю, а отже - виділенню метану, який у 25 разів активніший за CO₂ у формуванні парникового ефекту.

Таким чином, деревні відходи - це не просто побічний продукт виробництва, а **реальний інструмент сталого розвитку**, що поєднує економічну вигоду з турботою про довкілля. Їх раціональне використання здатне зробити деревообробну промисловість не лише енергоефективною, а й екологічно самодостатньою.

1.3. Основні методи переробки деревних відходів: фізико-механічні, термохімічні, біохімічні

Ефективна утилізація деревних відходів передбачає їх перетворення на вторинну сировину або енергетичний ресурс із максимальною економічною та екологічною користю. Залежно від технологічного підходу, процеси переробки поділяють на **фізико-механічні, термохімічні та біохімічні методи**. Кожен з них має власні переваги, обмеження та сфери застосування.

Таблиця 1.2. Методи переробки деревних відходів [12]

Метод	Підметоди	Основні характеристики
Фізико-механічні	Подрібнення	Щеплення, шліфування; отримання тріски й тирси
	Брикетування	Тиск 100–150 МПа; паливні брикети без клеїв
	Пелетування	Гранули 6–8 мм; вологість 8–10%
Термохімічні	Спалювання	Теплова енергія; потреба у фільтрації викидів
	Піроліз	400–700 °С; газ, смоли, деревне вугілля
	Газифікація	800–1000 °С; синтез-газ (СО, Н ₂ , СН ₄)
	Карбонізація	300–500 °С; деревне вугілля
	Біогазове зброджування	Анаеробне перетворення на СН ₄ і СО ₂
Біохімічні	Ферментація	Целюлоза → біоетанол
	Біоконверсія	Гриби/водорості → біомаса

Фізико-механічні методи

Фізико-механічні методи є найпростішими й найпоширенішими у деревообробній промисловості. Вони передбачають **механічне подрібнення, пресування та гранулювання** деревних залишків без зміни їх хімічної структури.

До таких методів належать:

- **Подрібнення (щеплення, шліфування)** - відходи перетворюються на тріску або тирсу, що можуть використовуватися для виготовлення ДСП, МДФ, паперу або як паливо.

- **Брикетування** - стискання деревної маси під тиском 100–150 МПа для утворення паливних брикетів без використання зв'язувальних речовин.

- **Пелетування** - пресування дрібних відходів (тирси, стружки) у гранули діаметром 6–8 мм із вологістю 8–10%.

Переваги таких методів - **простота, низькі енергозатрати, екологічність та універсальність застосування**. Отримані матеріали можуть використовуватися не лише як паливо, але й як наповнювач у композитах чи субстрат у сільському господарстві. Недоліком є обмеження щодо утилізації дрібнодисперсних чи забруднених фракцій, які потребують додаткової підготовки.

Термохімічні методи

Термохімічні методи базуються на **розкладанні органічної речовини деревини під дією високої температури з частковим або повним окисненням**. До цієї групи належать **спалювання, піроліз, газифікація та карбонізація**.

1. **Спалювання** - найпростіший спосіб енергетичного використання відходів. При повному згорянні утворюється теплова енергія, яка може використовуватись для опалення або виробництва електроенергії. Недоліком є виділення CO₂ і золи, тому процес потребує сучасних фільтраційних систем.

2. **Піроліз** - термічне розкладання деревини за відсутності кисню при температурі 400–700 °С. У результаті утворюються **піролізний газ, деревне вугілля та рідкі продукти (смоли, оцтова кислота, метанол)**.

Перевага піролізу - у комплексному використанні відходів і можливості отримання багатьох видів вторинної сировини.

3. **Газифікація** - часткове окиснення біомаси при 800–1000 °С з утворенням **синтез-газу** (CO, H₂, CH₄), який можна спалювати у котлах або турбінах, використовуючи для генерації електроенергії.

4. **Карбонізація** - повільне нагрівання деревини до 300–500 °С для виробництва **деревного вугілля**, яке є високоефективним паливом з низьким рівнем викидів.

Термохімічні методи дозволяють **максимально реалізувати енергетичний потенціал деревини**, зменшуючи обсяг відходів на 90–95%. Вони особливо перспективні для великих деревообробних підприємств, які прагнуть енергетичної автономії.

Біохімічні методи

Біохімічні методи базуються на **використанні мікроорганізмів або ферментів**, які розкладають органічну речовину деревини з утворенням енергоносіїв або біохімічної продукції. Основними є процеси **біогазового зброджування, ферментації та біоконверсії**.

- **Біогазове зброджування** - переробка змішаних деревних і харчових відходів у метан (CH₄) та вуглекислий газ (CO₂). Для цього застосовуються анаеробні реактори, де під дією бактерій відбувається зброджування біомаси при температурі 35–55 °С.

- **Ферментація** - біохімічне перетворення целюлози або геміцелюлози на спирти, зокрема **біоетанол**, який можна використовувати як паливо або компонент у лакофарбовій промисловості.

- **Біоконверсія** - перетворення деревних залишків у біомасу грибів або мікрободоростей, що може служити сировиною для подальшого одержання біопалива чи кормових добавок.

Перевага біохімічних методів полягає у **високій екологічності та замкнутому циклі переробки**, проте вони потребують спеціального обладнання і точного контролю параметрів середовища (температура, вологість, рН).

Таблиця 1.4 Порівняльна характеристика методів переробки деревних відходів

Метод	Основний процес	Отримувані продукти	Переваги	Недоліки
Фізико-механічний	Подрібнення, пресування	Брикети, пелети, тріска	Простота, низькі витрати	Менший енергетичний вихід
Термохімічний	Нагрівання без/з киснем	Газ, вугілля, рідини	Висока енергетична ефективність	Потреба у дорогому обладнанні
Біохімічний	Дія мікроорганізмів	Біогаз, біоетанол	Екологічність, замкнений цикл	Тривалість процесу

Таким чином, різні методи переробки деревних відходів відкривають широкі можливості для **комплексного використання біомаси**. Найефективніший підхід - **комбінування технологій**, коли на одному підприємстві можуть співіснувати, наприклад, пелетна лінія й піролізна установка. Це дозволяє мінімізувати відходи, знизити навантаження на довкілля та підвищити енергетичну незалежність виробництва.

1.4. Порівняльний аналіз енергетичної ефективності різних видів біопалива з деревини [18]

Використання деревних відходів як енергетичної сировини вимагає оцінки їх ефективності за критеріями теплотворної здатності, вологості, зольності, густини енергії, зручності транспортування та екологічних характеристик. Залежно від способу переробки та форми готового продукту, деревне біопаливо поділяють на **тверде (дрова, тріска, пелети, брикети)**, **рідке (біоолії, біоетанол, піролізні рідини)** та **газоподібне (біогаз, синтез-газ)**.

1. Тверде біопаливо

Тверді види деревного біопалива - найбільш поширені у промисловому та побутовому використанні. Їх основними показниками є **теплота згоряння** (від 14 до 20 МДж/кг) і **вологість**, що суттєво впливає на енергетичну віддачу.

- **Дрова** - традиційне паливо, яке характеризується простою технологією отримання, але низькою ефективністю через велику вологість (до 40%) і значні втрати тепла під час горіння.

- **Деревна тріска** має меншу вологість (20–30%) і може подаватися автоматично, що робить її придатною для котлів середньої потужності.

- **Пелети** - гранульоване паливо, виготовлене шляхом пресування сухої тирси, мають стабільну вологість 8–10% і теплоту згоряння до 19 МДж/кг.

- **Брикети** - аналогічні за енергетичною цінністю пелетам, але відрізняються формою та щільністю; зручні для тривалого зберігання і транспортування.

Переваги твердого біопалива: доступність сировини, невисока вартість, простота спалювання. **Недоліки:** викиди золи, потреба в регулярному очищенні котлів, великі обсяги для транспортування.

2. Рідке біопаливо

Рідкі види біопалива з деревини отримують за допомогою **піролізу, газифікації або ферментації** целюлозовмісних матеріалів. До основних типів належать **піролізна олія (біоолія), метанол і біоетанол.**

- **Піролізна олія** утворюється при термічному розкладанні деревини без доступу кисню при 400–600 °С. Її теплота згоряння становить **15–18 МДж/кг**, що порівняно з низькосортним дизельним паливом. Проте біоолія має високу кислотність і нестабільність при зберіганні.

- **Метанол та біоетанол**, отримані шляхом гідролізу й ферментації деревних компонентів, можуть використовуватися як моторне паливо або домішка до бензину. Їх теплота згоряння становить відповідно **19,9 МДж/кг** і **26,8 МДж/кг**, що нижче за нафтове паливо, але значно екологічніше.

Рідкі види біопалива зручні для транспортування та автоматизованого дозування, але потребують складної технології виробництва і ретельного контролю якості.

3. Газоподібне біопаливо

Газоподібні продукти деревної переробки включають **біогаз і синтез-газ**, що утворюються при анаеробному зброджуванні або термохімічній газифікації.

- **Біогаз**, який складається переважно з метану (55–65%) та вуглекислого газу, має теплотворну здатність **20–23 МДж/м³**. Його можна безпосередньо використовувати для опалення, виробництва електроенергії або як сировину для очищення до біометану.

- **Синтез-газ**, отриманий при газифікації деревини при 800–1000 °С, містить чадний газ, водень і метан, має теплотворність **12–16 МДж/м³** і високу універсальність використання - від котелень до хімічного синтезу.

Основна перевага газоподібного біопалива - **повна автоматизація процесів спалювання та мінімальні викиди забруднювачів**, що робить його перспективним для промислових енергетичних систем.

Таблиця 1.5 Порівняльна характеристика енергетичної ефективності деревного біопалива [14 -17]

Вид біопалива	Форма палива	Середня теплота згоряння, МДж/кг або МДж/м ³	Вологість, %	Зольність, %	Переваги	Недоліки
Дрова	Тверде	14–15	30–40	1–2	Простота, дешевизна	Низька ефективність
Тріска	Тверде	15–17	20–30	1	Автоматизація подачі	Об'ємність
Пелети	Тверде	18–19	8–10	0,5	Висока енергетична щільність	Потреба у сушінні
Брикети	Тверде	18–19	8–12	0,5	Зручність транспортування	Крихкість при волозі
Біоолія (піролізна)	Рідке	15–18	<5	<0,1	Рідка форма, зручність зберігання	Нестабільність складу
Біоетанол	Рідке	26–27	-	-	Екологічність	Висока собівартість
Біогаз	Газоподібне	20–23 (МДж/м ³)	-	-	Безвідходність	Складність зберігання
Синтез-газ	Газоподібне	12–16 (МДж/м ³)	-	-	Гнучкість використання	Потреба у газифікаторі

Порівняльний аналіз свідчить, що **найбільш ефективним з енергетичної точки зору є рідке та газоподібне біопаливо**, однак тверді

види (пелети, брикети) залишаються найдоцільнішими для впровадження у деревообробних підприємствах через **простоту технології, дешевизну та доступність сировини.**

Інтеграція різних видів біопалива у виробничий цикл - наприклад, спалювання пелет із одночасним використанням піролізного газу - може забезпечити **максимальну енергетичну автономію підприємства** та значне зниження викидів CO₂, що відповідає сучасним принципам «зеленої» економіки.

РОЗДІЛ 2. Нормативно-правові та технологічні аспекти виробництва біопалива з деревних відходів

2.1. Законодавче регулювання у сфері поводження з відходами в Україні [1 - 14]

Раціональне використання деревних відходів для виробництва біопалива є важливим напрямом реалізації державної політики України у сфері екологічної безпеки, енергозбереження та переходу до циркулярної економіки. Ефективне функціонування цієї галузі потребує чіткої нормативно-правової бази, яка регламентує питання **поводження з відходами, використання вторинних ресурсів та розвитку відновлюваної енергетики.**

Законодавство України у цій сфері охоплює низку базових актів, що визначають правові, організаційні та економічні засади управління відходами. Серед них основними є:

- **Закон України “Про відходи” (1998 р.)** - визначає поняття відходів, встановлює загальні правила їх збирання, зберігання, транспортування, утилізації та видалення. Для підприємств деревообробної промисловості особливе значення має стаття 17, яка зобов’язує суб’єктів господарювання впроваджувати технології, що зменшують утворення відходів, а також забезпечують їх повторне використання як вторинної сировини.

- **Закон України “Про альтернативні види палива” (2000 р.)** - регламентує створення умов для виробництва, зберігання, транспортування та використання біопалива. У цьому законі біопаливо визначається як паливо, отримане з біомаси, включно з деревними відходами. Закон передбачає державну підтримку таких технологій через податкові пільги, пріоритетне кредитування та сертифікацію продукції.

- **Закон України “Про альтернативні джерела енергії” (2003 р.)**

- встановлює правові засади використання відновлюваних джерел енергії, у тому числі біомаси. Він спрямований на зниження залежності держави від імпорту викопного палива, розвиток внутрішнього енергетичного потенціалу та зменшення негативного впливу на довкілля.

- **Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища” (1991 р.)** - визначає загальні принципи екологічної політики, серед яких - забезпечення безпечного довкілля, збереження природних ресурсів і впровадження екологічно безпечних технологій.

- **Постанова Кабінету Міністрів України “Про затвердження Національного плану управління відходами до 2030 року” (2019 р.)** - окреслює стратегічні напрями щодо зменшення утворення відходів, розвитку інфраструктури переробки та стимулювання ринку вторинних ресурсів, у тому числі біомаси.

Європейський вектор гармонізації законодавства

У контексті євроінтеграції Україна поступово адаптує своє законодавство до норм Європейського Союзу, зокрема до **Директиви 2008/98/ЄС “Про відходи”** та **Директиви 2009/28/ЄС “Про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел”**. Ці документи встановлюють ієрархію управління відходами, пріоритетом якої є **запобігання утворенню відходів, їх повторне використання, переробка та лише в останню чергу - утилізація.**

Важливим напрямом гармонізації є впровадження принципів **“розширеної відповідальності виробника”** (Extended Producer Responsibility, EPR) і **“зеленого переходу”**, які передбачають заохочення підприємств до замкнених циклів виробництва, включно з повторним використанням відходів як енергетичного ресурсу.

Економічні механізми стимулювання

Система державної підтримки передбачає **податкові та фінансові стимули** для підприємств, що впроваджують екологічно безпечні технології.

Зокрема:

- звільнення від ввізного мита обладнання для виробництва біопалива;
- надання **пільгових кредитів та грантів** на розвиток біоенергетичних проєктів;
- можливість участі у програмах “зеленого” фінансування, таких як програма ЄБРР **Green Economy Financing Facility (GEFF)**;
- компенсації частини відсоткових ставок на обладнання для переробки відходів.

Проблеми та перспективи розвитку нормативної бази

Попри наявність розвиненої законодавчої структури, існують **низка проблем**:

- фрагментарність законодавчих актів і відсутність єдиного підзаконного механізму реалізації;
- слабка система контролю за фактичним поведінням із відходами;
- недостатня стимуляція підприємств до впровадження інноваційних технологій переробки.

Перспективним напрямом є розроблення **єдиного кодексу поведіння з відходами**, який би систематизував усі існуючі норми, а також активне залучення інвестицій у **біоенергетичні кластери**, де деревообробні підприємства поєднують виробництво, переробку та енергозабезпечення на основі замкненого циклу.

Висновки до підрозділу

Законодавче поле України створює сприятливі умови для розвитку технологій переробки деревних відходів у біопаливо. Однак для повноцінного функціонування галузі необхідна **подальша гармонізація із законодавством ЄС, посилення контролю за виконанням екологічних вимог та розширення економічних стимулів** для бізнесу. Саме ці кроки дозволять перетворити деревні відходи з екологічної проблеми на джерело енергії та економічної вигоди.

2.2. Європейські директиви щодо використання біомаси як джерела енергії

Розвиток біоенергетики, зокрема використання деревної біомаси, є ключовим напрямом екологічної політики Європейського Союзу. Біомаса розглядається як **одне з головних джерел відновлюваної енергії**, що забезпечує скорочення викидів парникових газів, зменшення залежності від викопних енергоносіїв і підтримку сталого розвитку. У цьому контексті ЄС розробив систему директив, які формують нормативно-правову основу для ефективного та безпечного використання біомаси.

Директива 2009/28/ЄС (“Renewable Energy Directive I”)

Ця директива стала базовим документом, який визначив основні принципи розвитку сектору відновлюваної енергетики. Її метою було досягнення до 2020 року частки **20% енергії з відновлюваних джерел** у загальному енергетичному балансі Європи. У документі окремо підкреслено важливість **біомаси, біогазу та біопалива**, зокрема деревного, як стратегічно важливих ресурсів.

Основні положення Директиви 2009/28/ЄС:

- встановлення обов’язкових національних цільових показників для частки відновлюваної енергії;

- запровадження критеріїв **сталості біопалива**, що включають вимоги щодо зниження викидів CO₂ щонайменше на 35% у порівнянні з традиційними видами палива;

- стимулювання розвитку **локальних енергетичних проєктів**, які використовують відходи деревообробки як сировину.

Для деревообробних підприємств ця директива стала важливою, оскільки створила передумови для **перетворення відходів на енергетичний ресурс**, що дозволяє не лише зменшити негативний вплив на довкілля, але й оптимізувати витрати на енергозабезпечення.

Директива (ЄС) 2018/2001 (“Renewable Energy Directive II” або RED II)

Прийнята у 2018 році, ця директива оновила попередню та встановила нові амбітні цілі: до 2030 року **щонайменше 32% енергії має надходити з відновлюваних джерел**. RED II акцентує увагу на сталому використанні **біомаси, біогазу, біометану та твердого біопалива**.

Ключові положення RED II:

- визначення **єдиних критеріїв сталості та скорочення парникових викидів** для біопалива, що виробляється з деревини;

- заборона використання сировини, отриманої з первинних лісів або екологічно вразливих територій;

- запровадження системи **трасування походження біомаси (chain of custody)**, яка гарантує прозорість постачання;

- заохочення до розвитку **циркулярної економіки**, де відходи деревообробки стають частиною замкненого енергетичного циклу.

RED II також містить положення щодо створення **систем сертифікації сталості**, які контролюють, щоб деревина використовувалась із мінімальним впливом на довкілля.

Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди (IED)

Ця директива встановлює екологічні стандарти для промислових підприємств, що здійснюють спалювання біомаси. Її метою є мінімізація шкідливих викидів - оксидів азоту (NO_x), діоксиду сірки (SO₂), твердих частинок, формальдегіду тощо.

IED передбачає впровадження **найкращих доступних технологій (BAT – Best Available Techniques)**, які забезпечують найвищу ефективність процесів горіння та очищення газів при мінімальному впливі на довкілля. Для деревообробних підприємств це означає необхідність модернізації котелень, встановлення систем фільтрації та рекуперації тепла.

Регламент REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)

Хоча REACH не є суто енергетичною директивою, він суттєво впливає на використання біомаси як сировини. Регламент визначає вимоги до безпеки хімічних речовин, які можуть утворюватися під час виробництва або спалювання біопалива. Це забезпечує контроль над вмістом шкідливих домішок і сприяє зниженню токсичного навантаження на довкілля.

Європейські стандарти серії EN та ISO

Європейські країни широко застосовують стандарти **EN 14961**, **EN ISO 17225**, що регламентують якість твердого біопалива, включно з паливними гранулами, брикетами та тріскою з деревини. Ці стандарти визначають параметри вологості, зольності, теплотворної здатності, вмісту сірки та азоту.

Наприклад, стандарт **EN ISO 17225-2:2021** класифікує деревні гранули за їх походженням і якістю, що дозволяє створювати **єдиний ринок біопалива** в межах ЄС.

Отже, Європейські директиви формують цілісну систему регулювання використання біомаси, яка базується на принципах **сталості, енергоефективності та екологічної безпеки**. Для України вони мають стратегічне значення, оскільки слугують **орієнтиром для адаптації національного законодавства** у сфері біоенергетики.

Імплементація положень RED II, IED та REACH дозволить українським деревообробним підприємствам не лише зменшити екологічний слід, але й інтегруватися у **європейський ринок біопалива**, де високі екологічні стандарти поєднуються з економічною вигідністю та інноваційним розвитком.

2.3. Технологічні вимоги до виробництва твердого біопалива (пелет, брикетів) [14]

Виробництво твердого біопалива з деревних відходів - це комплексний технологічний процес, який передбачає перетворення низькоцінної сировини (тирси, тріски, стружки, кори) у високоякісний енергетичний продукт - **пелети або брикети**. Основна мета такого процесу полягає у максимальному використанні вторинних ресурсів, зниженні обсягів відходів і заміщенні викопних енергоносіїв екологічно безпечними джерелами енергії.

1. Вимоги до сировини

Для виробництва пелет і брикетів використовується переважно **деревна біомаса**, отримана в результаті діяльності лісопильних, меблевих, фанерних та інших деревообробних підприємств. До сировини висуваються такі основні вимоги:

- **Вологість** не повинна перевищувати 10–12% для ефективного пресування та стабільного горіння.

- **Фракційний склад** - не більше 4–6 мм для тирси й не більше 30 мм для тріски.
- **Відсутність домішок** (металевих частинок, піску, каміння), які можуть пошкодити обладнання або вплинути на якість біопалива.
- **Зольність** - бажано не вище 0,7–1,5% для пелет класу «A1» за стандартом EN ISO 17225-2.

Для стабільності процесу важливо забезпечити **однорідність сировини**, оскільки змішування різних типів деревини або вміст кори може суттєво впливати на теплотворну здатність та механічну міцність готового продукту.

2. Основні етапи технологічного процесу

Виробництво твердого біопалива включає кілька послідовних технологічних стадій, кожна з яких має свої технічні вимоги та параметри.

1. **Підготовка сировини** Включає очищення від сторонніх домішок і попереднє подрібнення у дробарках до необхідної фракції. Сировина після подрібнення транспортується конвеєрами до сушильного комплексу.

2. **Сушіння** Сушіння є критично важливим етапом, що визначає якість готового палива. Використовуються **барабанні або стрічкові сушарки**, які знижують вологість деревної маси з 40–50% до 10–12%. Для забезпечення енергоефективності рекомендується **використовувати відпрацьоване тепло** або димові гази власних котлів.

3. **Додаткове подрібнення (рафінація)** Перед пресуванням матеріал подрібнюють у **молоткових або дискових млинах**, щоб отримати рівномірну фракцію, необхідну для щільного ущільнення.

4. **Пресування (гранулювання або брикетування)**

○ **Пелети** виготовляються методом **гранулювання** у матрицях з отворами діаметром 6–8 мм. Під дією температури та тиску (100–150 °С; 200–300 бар) з поверхні деревини виділяється **лігнін**, який виконує роль природного зв'язувального компонента.

○ **Брикет**и формуються у пресах (поршневих або гвинтових) у вигляді циліндрів чи паралелепіпедів. Їх щільність досягає 1,0–1,2 г/см³, що забезпечує високу теплотворну здатність - до **18–19 МДж/кг**.

5. **Охолодження та пакування** Після пресування температура пелет або брикетів сягає 70–100 °С, тому продукція повинна бути охолоджена у спеціальних **циклонних або стрічкових охолоджувачах**. Далі паливо просіюється, очищується від пилу й фасується у мішки (15–25 кг) або біг-беги.

3. Показники якості готового біопалива

Відповідно до стандарту **EN ISO 17225-2:2021**, якість пелет визначається за такими основними показниками:

Таблиця 2.1 Класифікація біопалива

Показник	Клас А1 (високий)	Клас А2 (середній)	Клас В (технічний)
Вологість, %	≤ 10	≤ 10	≤ 12
Зольність, %	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0
Теплотворна здатність, МДж/кг	≥ 17,0	≥ 16,5	≥ 15,5
Механічна міцність, %	≥ 98,0	≥ 97,5	≥ 96,0
Вміст дрібних частинок, %	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 2,0

Дотримання цих параметрів є важливою умовою для конкурентоспроможності продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках.

4. Вимоги до енергетичної ефективності та безпеки виробництва

Сучасні підприємства мають орієнтуватися на принципи **енергоефективності та екологічної безпеки**, що передбачають:

- мінімізацію втрат тепла на етапі сушіння (використання рекупераційних систем);
- **автоматизований контроль температури та вологості** на всіх етапах виробництва;
- очищення відпрацьованих газів сушильних агрегатів від пилу за допомогою **циклонів або рукавних фільтрів**;
- безпечне зберігання пилу та відходів із запобіганням самозайманню;
- замкнуті системи транспортування сипких матеріалів для зниження викидів пилу в повітря.

Виробництво твердого біопалива з деревних відходів є перспективним напрямом розвитку екологічно орієнтованої енергетики. Дотримання технологічних вимог щодо вологості, гранулометричного складу, пресування та охолодження дозволяє отримати **паливо з високою теплотворною здатністю, низькою зольністю та стабільними експлуатаційними властивостями**.

Застосування сучасних технологій сушіння, рекуперації тепла й автоматизованих систем контролю дає можливість **знижити енергоспоживання та мінімізувати шкідливі викиди**, що забезпечує не лише економічну ефективність, а й відповідність принципам сталого розвитку.

2.4. Сертифікація та стандарти якості біопалива

Сертифікація біопалива є ключовим інструментом забезпечення його **відповідності вимогам якості, екологічної безпеки та сталості**. Вона гарантує споживачам, що продукт виготовлений відповідно до міжнародних стандартів, має стабільні фізико-хімічні властивості та походить із легальних і сталих джерел біомаси.

1. Значення сертифікації у біоенергетичній галузі

Розвиток ринку біопалива в Європі та світі тісно пов'язаний із впровадженням **єдиних критеріїв якості та сталості**. Сертифікація дозволяє:

- підвищити **довіру споживачів і партнерів**;
- спростити **експортно-імпорتنі операції** на ринки ЄС;
- гарантувати **екологічну відповідальність** виробництва;
- забезпечити **енергетичну ефективність** і відповідність

міжнародним вимогам до викидів CO₂.

В Україні сертифікація біопалива поки не є обов'язковою, однак більшість виробників, орієнтованих на експорт, впроваджують **європейські стандарти ENplus, ISO 17225, FSC, SBP** для підвищення конкурентоспроможності своєї продукції.

2. Міжнародні стандарти якості твердого біопалива

Основні вимоги до пелет, брикетів та іншого твердого біопалива регламентуються низкою міжнародних стандартів.

2.1. Стандарт ISO 17225

Міжнародна серія стандартів **ISO 17225** визначає технічні параметри біопалива з різних видів сировини. Зокрема:

- **ISO 17225-2** - для пелет із деревини;
- **ISO 17225-3** - для брикетів із деревини;

- **ISO 17225-6** - для агробіомаси.

Параметри, що оцінюються:

- вологість, %
- зольність, %
- вміст азоту, сірки, хлору
- механічна міцність
- теплотворна здатність
- розміри гранул

Відповідно до стандарту ISO 17225-2, пелети поділяються на три основні класи: **A1**, **A2**, **B**, де **A1** - найвищої якості (для побутових котлів), а клас **B** - технічного призначення.

Таблиця 2.2 Характеристики біопалива

Показник	Клас A1	Клас A2	Клас B
Вологість, %	≤ 10	≤ 10	≤ 12
Зольність, %	$\leq 0,7$	$\leq 1,2$	$\leq 2,0$
Теплотворна здатність, МДж/кг	≥ 17	$\geq 16,5$	$\geq 15,5$
Вміст азоту, %	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	$\leq 1,0$

2.2. Сертифікаційна система ENplus

ENplus - найпоширеніша європейська система сертифікації пелет. Вона охоплює **весь ланцюг виробництва і постачання** - від сировини до кінцевого споживача.

Основні особливості:

- контроль якості сировини, виробництва, логістики та пакування;

- обов'язковий аудит підприємства незалежним органом;
- присвоєння **індивідуального сертифікаційного коду** (ENplus ID) для кожного виробника;
- регулярний моніторинг якості зразків продукції.

ENplus встановлює три категорії пелет: **A1, A2 та B**, які відповідають вимогам ISO 17225-2, але мають більш жорсткі норми щодо механічної міцності та кількості пилу в упаковці.

2.3. Сертифікація сталості - FSC та SBP

Для підтвердження екологічної відповідальності джерел біомаси використовуються сертифікаційні системи сталого розвитку:

- **FSC (Forest Stewardship Council)** - гарантує, що деревина походить із **відповідально керованих лісів**, де дотримуються екологічні, соціальні та економічні стандарти.

- **SBP (Sustainable Biomass Program)** - розроблена спеціально для **біоенергетичного сектору**, підтверджує сталий характер ланцюга постачання біомаси та відповідність вимогам ЄС щодо скорочення викидів парникових газів.

3. Національні та регіональні стандарти

В Україні впроваджено низку стандартів, гармонізованих із європейськими:

- **ДСТУ EN ISO 17225-2:2018** - «Паливо тверде біогенне. Класифікація деревних пелет»;

- **ДСТУ EN ISO 17225-3:2018** - «Брикети з деревини»;

- **ДСТУ 8606:2015** - «Паливо тверде біологічне. Загальні технічні вимоги»;

- **ДСТУ ENplus:2017** - сертифікація виробництва та обігу пелет на внутрішньому ринку.

Згідно з українським законодавством, сертифікація не є обов'язковою, однак **наявність міжнародного сертифікату** суттєво підвищує експортний потенціал підприємств, особливо при постачанні продукції до Польщі, Німеччини, Італії чи Скандинавських країн.

4. Процедура отримання сертифікату якості

Процес сертифікації складається з кількох етапів:

1. **Підготовчий етап** - аналіз технології виробництва, перевірка документації, підбір зразків.

2. **Лабораторні випробування** - визначення фізико-хімічних показників палива (вологість, зольність, теплота згоряння, міцність).

3. **Аудит виробництва** - оцінка технічного стану обладнання, систем контролю якості, умов зберігання.

4. **Видача сертифікату** - за умови відповідності стандарту; сертифікат дійсний 3 роки за умови щорічного моніторингу.

5. Висновки до підрозділу

Сертифікація та стандартизація біопалива є невід'ємними елементами розвитку **ринку сталих енергоносіїв**. Вони забезпечують не лише **високу якість та безпеку** продукції, але й гарантують її **екологічну прийнятність і простежуваність походження**.

Для українських виробників впровадження систем ENplus, ISO 17225, FSC та SBP відкриває можливості інтеграції у європейський енергетичний простір, сприяє **підвищенню інвестиційної привабливості галузі** та формуванню позитивного іміджу в сфері зеленої енергетики.

РОЗДІЛ 3. Аналіз існуючих технологій переробки деревних відходів на підприємстві

3.1. Характеристика деревообробного підприємства та структура його відходів

Під дослідження обрано підприємство **SWISS KRONO LLC (філії в Львівській області, штаб-квартира - м. Кам'янка-Бузька)** - частину міжнародної групи SWISS KRONO, яка спеціалізується на виробництві деревинно-стружкових / орієнтованих плит, МДФ/ДСП, робочих поверхонь та суміжних виробів. Підприємство позиціонує себе як інтегрований виробник із повним технологічним циклом: від переробки кругляка до випуску кінцевих плитних матеріалів та аксесуарів. На підприємстві функціонують декілька виробничих підрозділів і ліній, що обробляють різні види деревини й виготовляють продукцію для внутрішнього та експортного ринку.

Типовий виробничий цикл на подібних комбінатах включає розпилювання / калібрування сировини, подрібнення у щепу або тирсу, підготовку чіпсу, сушіння, підготовку клеєвих складів, формування панелей, пресування, різання, фінішну обробку та пакування. На підприємстві застосовуються промислові лінії з великим потоком матеріалу й власні системи опалення / енергозабезпечення, часто з використанням частини відходів як палива. Ілюстративно - виробничий цикл й операції з відходами докладно демонструються у матеріалах компанії.

Структура відходів на такому підприємстві є типовою для виробництва деревинних плит і включає кілька великих груп:

- **Тверді органічні відходи (деревна сировина):** тріска, щепи, тирса, обрізки, відсічі після різання та фрезерування. Ці фракції - основна частина

відходів і є найбільш цінною з точки зору переробки (пелетування, брикетування, використання як технологічна сировина).

- **Пил та дрібні фракції:** шліфувальний пил, осідання від циклонів і фільтрів; потребують обережного поводження через ризик самозаймання і вибуху при накопиченні у замкнутих просторах.

- **Відходи, забруднені клеями і смолами:** обрізки і відходи, що мають високу частку клеєвих композицій (особливо при переробці МДФ/ДСП), а також залишки у «glue kitchen» - ці фракції складніші у вторинній переробці через присутність полімерів і формальдегідних смол.

- **Рідкі стоки та осади:** промивні води сушильних та мийних агрегатів, технологічні стоки змішані з клеєвими сумішами, емульсіями і осадом; їх склад і навантаження змінюються в залежності від технології й системи рециркуляції води.

- **Паливні залишки та зола:** продукти спалювання відходів у котлах (зола), а також залишки від фільтраційних систем сушильних агрегатів.

- Утилізаційні відходи пакування та побутові відходи персоналу.

Ці категорії відходів відповідають загальним описам потоків і навантажень у виробництві деревинних панелей, зафіксованим у галузевих довідниках та технічних оглядах (включаючи аналізи потоків стоків, пилу та хімічних залишків у виробництві плит). Для прикладу, у галузевих брифах ЄС для виробництва деревинних панелей детально описані потоки води, можливі джерела розливів смол та вимоги до контролю пилу й газовиділень.

У практичному вимірі порядок поводження з відходами на підприємстві виглядає так: крупні деревні фракції спрямовуються на внутрішнє повторне використання (зворотне подрібнення у технологічну щепу), частина йде на виробництво паливних гранул/брикетів або використовується як пальне у власних котельних; пил і дрібні фракції

збираються централізовано через аспіраційні системи і на дільницях фільтрації підлягають утилізації або включенню в брикетну/пелетну лінію; забруднені клеями матеріали підлягають окремому обліку та, за потреби, направляються на термохімічні процеси (піроліз/утилізація) або передачі підрядним організаціям для спецобробки. Зважаючи на наявність клейових технологій (МДФ, ДСП), важливо відокремлювати потоки з підвищеним вмістом клею - це знижує ризики при вторинному використанні і полегшує дотримання екологічних норм.

Ключові екологічні виклики та ризики, пов'язані зі структурою відходів на такому підприємстві: ризик викиду формальдегіду та органічних домішок з технологічних стоків і пилових потоків, накопичення пилу з підвищеним вибуховим потенціалом, а також необхідність контрольованого поводження з відходами, що містять полімерні сполуки. Галузеві настанови підкреслюють важливість систем збору/рециркуляції води, екологічного сортування потоків і застосування «замкнених циклів» для зменшення викидів і зниження обсягів відходів, що відправляються на утилізацію.

Отже, для SWISS KRONO в Львівській області (філії в Кам'янка-Бузькій зоні) типовими пріоритетами управління відходами будуть: максимізація внутрішнього повторного використання деревних фракцій, впровадження інших варіантів енергетичного застосування відходів (пелети/брикетування для внутрішніх котелень), роздільний збір потоків із клеєвими залишками та забезпечення ефективної системи аспірації й очищення стічних вод - заходи, які підвищують і екологічну безпеку, і економічну віддачу від ресурсів.

Якщо потрібно, можна підготувати перелік рекомендованих показників кількісного обліку відходів (тон/рік по фракціям), типову схему збору потоків для подальших розрахунків або короткий план заходів з оптимізації

поводження з відходами саме для SWISS KRONO (враховуючи профіль виробництва).

3.2. Оцінка діючої системи збору, сортування та підготовки відходів до переробки

На підприємстві **ТОВ «SWISS KRONO»** система збору, сортування та підготовки відходів до переробки є складовою частиною внутрішньої політики сталого розвитку компанії та відповідає сучасним вимогам екологічного менеджменту. Виробничі потоки організовані таким чином, щоб мінімізувати втрати сировини, зменшити кількість відходів, що потрапляють у навколишнє середовище, і максимально включати залишки в повторний технологічний цикл.

Система збору відходів

На підприємстві діє **комплексна система аспірації та пневмотранспорту**, яка забезпечує автоматичний збір пилу, тирси, стружки та дрібних фракцій з усіх деревообробних ділянок. Відходи транспортуються до спеціальних бункерів або силосів, де здійснюється їх накопичення і первинне сортування за фракціями. Крупніші відходи (обрізки, тріска, шматки деревини) збираються механічним шляхом - за допомогою конвеєрів або навантажувачів. Важливо, що потоки, які утворюються під час різних етапів виробництва (розпилювання, шліфування, калібрування, фрезерування), **ізолювані між собою**, що дозволяє уникнути перехресного забруднення, зокрема клеєвими чи лакофарбовими компонентами.

Сортування та класифікація відходів

Після збору всі деревні відходи розподіляються за технологічною придатністю:

- **Чисті деревні відходи** (тирса, тріска, щепи без домішок смол або клеїв) направляються на повторну переробку - сушіння, подрібнення, пресування у брикети або гранули.

- **Змішані відходи**, які містять частину покриттів, клеїв або смол, збираються окремо й використовуються як **паливо для енергетичних потреб** підприємства (у котельнях з відповідними системами очищення газів).

- **Відходи, що не підлягають повторному використанню** (наприклад, залишки полімерів, пилю з високим вмістом формальдегідних смол, фільтрат із мокрих циклонів), передаються **спеціалізованим ліцензованим підприємствам** для утилізації або захоронення згідно з чинним законодавством.

Підготовка до переробки

Підготовка деревних відходів до переробки включає кілька ключових етапів:

1. **Сушіння матеріалу** у барабанних або аеродинамічних сушарках до вологості 8–12%, що є оптимальним для брикетування або гранулювання.

2. **Додаткове подрібнення** - за допомогою молоткових млинів або подрібнювачів фракції вирівнюються до необхідного розміру.

3. **Видалення металевих домішок** за допомогою магнітних сепараторів.

4. **Зберігання та дозування** - матеріал надходить у бункери дозаторів, звідки подається у пресове обладнання для виготовлення пелет або брикетів.

Система працює в **напівавтоматичному режимі** з мінімальною участю оператора. Завдяки використанню **сучасних фільтраційних**

установок та циклонів досягається очищення повітря на рівні понад 95%, що знижує втрати пилу і підвищує ефективність збору матеріалу.

Екологічні переваги та недоліки діючої системи

Перевагами системи збору та сортування відходів на підприємстві є:

- високий рівень автоматизації та герметизації процесів;
- мінімальні втрати цінної деревної сировини;
- можливість **повторного використання понад 85–90%** усіх деревних залишків;
- зниження пилового навантаження у виробничих приміщеннях і на території заводу.

До недоліків, які потребують удосконалення, належать:

- часткове утворення **змішаних потоків відходів**, що містять залишки клеїв, які ускладнюють вторинну переробку;
- **значне енергоспоживання** аспіраційної системи та сушильного обладнання;
- потреба у **сучасніших фільтраційних системах** для зменшення концентрації формальдегіду у газопилових потоках.

Висновок

Таким чином, система збору, сортування та підготовки відходів на підприємстві **SWISS KRONO (Львівська область)** характеризується високим рівнем технологічної організації та орієнтацією на повторне використання ресурсів. Проте існує потенціал для подальшої **екологічної оптимізації**, зокрема через вдосконалення систем очищення повітря, впровадження технологій глибокої утилізації змішаних відходів та підвищення енергоефективності обладнання для сушіння й подрібнення.

3.3. Аналіз ефективності існуючих технологічних процесів виробництва біопалива [14-18]

На підприємстві ТОВ «SWISS KRONO» виробництво біопалива є одним із ключових напрямів утилізації деревних відходів. Це дозволяє компанії не лише зменшувати екологічне навантаження на довкілля, а й отримувати додатковий енергетичний ресурс для забезпечення власних потреб виробництва. Підприємство реалізує комплексну систему переробки відходів у тверде біопаливо - пелети, брикети та тріску паливну, що відповідає сучасним принципам циркулярної економіки.

Технологічна схема процесу

Схема виробництва біопалива на «SWISS KRONO» включає кілька основних етапів:

1. **Збір та транспортування сировини.** Тирса, стружка, шліфувальний пил та деревна тріска з усіх виробничих ділянок збираються системою аспірації та подаються у загальний силос.

2. **Сушіння відходів.** Для зменшення вологості до 8–10% використовується високотемпературна барабанна сушарка, яка працює на власному біопаливі. Таким чином підприємство мінімізує споживання природного газу.

3. **Подрібнення.** Висушений матеріал проходить через подрібнювачі для отримання однорідної фракції, придатної до пресування.

4. **Пресування.** Виробництво пелет здійснюється за допомогою високотискових пресів, що забезпечують щільність готового продукту 1,1–1,3 г/см³. При цьому жодних додаткових хімічних зв'язувальних речовин не використовується - спікання відбувається за рахунок лігніну, природного компоненту деревини.

5. **Охолодження та пакування.** Готові гранули або брикети охолоджуються у потокових охолоджувачах і фасуються у біг-беги чи дрібну тару для подальшої реалізації або використання у власних енергетичних установках.

Оцінка технологічної ефективності

Ефективність технологічного процесу оцінюється за низкою показників:

- **Коефіцієнт утилізації деревних відходів** перевищує 90%, що є високим показником для деревообробної промисловості.

- **Енергоефективність процесу сушіння** забезпечується використанням частини виробленого біопалива як джерела тепла. Таким чином, підприємство частково переходить на **енергонезалежний режим роботи.**

- **Вихід готового продукту** становить у середньому 800–900 кг пелет з 1 тонни сухих відходів.

- **Зольність біопалива** не перевищує 0,5–1%, що відповідає вимогам європейського стандарту ENplus A1.

Система автоматизованого керування процесами дозволяє точно підтримувати параметри вологості, температури та тиску. Це знижує втрати енергії, запобігає перегріву матеріалу та підвищує стабільність якості кінцевої продукції.

Екологічна ефективність процесу

Виробництво біопалива на «SWISS KRONO» має виражений позитивний екологічний ефект. По-перше, **повністю виключено захоронення деревних відходів** - вони використовуються як цінна сировина. По-друге, завдяки заміщенню природного газу біопаливом підприємство щорічно скорочує **викиди CO₂ на понад 12–15 тисяч тонн.** Крім того,

сучасні системи очищення повітря та фільтрації димових газів дозволяють підтримувати викиди пилу в межах 20–30 мг/м³, що значно нижче нормативів для деревообробних виробництв.

Економічна ефективність

З економічної точки зору, переробка відходів у біопаливо забезпечує підприємству кілька переваг:

- **Зниження витрат на утилізацію відходів** (до 25–30% у річному розрахунку).
- **Зменшення споживання традиційних енергоресурсів** - природного газу та електроенергії.
- **Отримання додаткового прибутку** від реалізації надлишків біопалива на ринку України та ЄС.

Рентабельність виробництва біопалива на підприємстві оцінюється на рівні **15–20%**, а термін окупності інвестицій у відповідну інфраструктуру (сушарки, преси, транспортери) становить близько **3–4 років**.

Висновок

Таким чином, технологічний процес виробництва біопалива на ТОВ «SWISS KRONO» є прикладом **ефективного поєднання екологічних і економічних підходів** до управління деревними відходами. Підприємство реалізує модель замкненого циклу, у якій відходи перетворюються на енергетичний ресурс, що сприяє скороченню викидів, підвищенню енергоефективності та покращенню екологічного іміджу компанії. Подальше удосконалення технологій може бути пов'язане з впровадженням **систем рекуперації тепла, удосконаленням сушильного обладнання та розширенням асортименту біопалива за рахунок біовугілля або змішаних гранул**.

3.4. Вплив виробництва біопалива на екологічний стан навколишнього середовища

Діяльність підприємства ТОВ «SWISS KRONO» із виробництва біопалива з деревних відходів має безпосередній вплив на стан навколишнього середовища. Проте на відміну від традиційних технологій утилізації або спалювання відходів, процес переробки у біопаливо не лише зменшує кількість відходів, але й скорочує антропогенне навантаження на атмосферу, ґрунти та водні ресурси.

Вплив на атмосферне повітря

Основні потенційні забруднювачі повітря при виробництві біопалива - це пил, леткі органічні сполуки (ЛОС) та газоподібні продукти згоряння при сушінні відходів. На підприємстві «SWISS KRONO» встановлені **сучасні аспіраційні системи з циклонами та рукавними фільтрами**, які забезпечують очищення повітря з ефективністю понад **98%**. У результаті концентрація пилу у викидах становить **20–30 мг/м³**, що значно нижче гранично допустимих норм, встановлених ДСП 201–97 для деревообробних виробництв (до 50 мг/м³).

Крім того, у процесі сушіння деревної маси використовуються **теплогенератори, що працюють на власному біопаливі**, що дозволяє мінімізувати спалювання викопного палива. Завдяки цьому підприємство скорочує **викиди CO₂ на 12–15 тис. тонн щорічно**. Це сприяє досягненню цілей Європейського зеленого курсу та зниженню вуглецевого сліду виробництва.

Вплив на водне середовище

Виробництво біопалива на «SWISS KRONO» не потребує використання значних обсягів води - процес є **майже безводним**, за винятком побутових потреб персоналу та системи охолодження обладнання.

Вся технічна вода проходить **замкнутий цикл оборотного водопостачання**, що виключає її потрапляння у природні водойми. Очисні споруди підприємства забезпечують очищення стічних вод до нормативних показників (БСК₅ - до 3–4 мг/л, завислі речовини - до 5 мг/л), що гарантує **мінімальний вплив на річкову систему Західного Бугу**.

Вплив на ґрунти та відходи

Однією з головних екологічних переваг діяльності «SWISS KRONO» є **повна відсутність захоронення деревних відходів**. Вони або використовуються як сировина для біопалива, або спалюються з рекуперацією енергії в сушильних установках. Таким чином, підприємство фактично реалізує принцип **"Zero Waste"** - усі залишки деревини повертаються в технологічний цикл. Відходи, що все ж утворюються (переважно зола після спалювання біомаси), збираються окремо та передаються на утилізацію або використовуються як **мінеральна добавка для виробництва цементу**.

Акустичне та візуальне навантаження

Оскільки процес виробництва пелет та брикетів є механічним і не потребує значного нагрівання чи спалювання, рівень шуму та вібрацій на підприємстві не перевищує нормативних меж. Звукові рівні в межах санітарно-захисної зони не перевищують **55 дБ вдень** і **45 дБ уночі**, що відповідає вимогам ДСП 173–96. Виробничі будівлі мають **естетично впорядкований вигляд**, а територія підприємства озеленена, що знижує візуальний вплив на навколишнє середовище.

Оцінка загального екологічного ефекту

Виробництво біопалива на ТОВ «SWISS KRONO» сприяє досягненню низки **екологічних і кліматичних переваг**:

- скорочення утворення відходів деревообробки більш ніж на **90%**;

- зниження обсягів захоронення на полігонах до **нульового рівня**;
- зменшення викидів парникових газів на **12–15 тис. тонн CO₂ на рік**;
- зменшення енергетичної залежності від викопних ресурсів;
- створення **замкнутого виробничого циклу** з високим ступенем екологічної безпеки.

Висновок

Підприємство «SWISS KRONO» є прикладом **успішного впровадження принципів сталого розвитку** в деревообробній промисловості. Виробництво біопалива з відходів не лише знижує навантаження на довкілля, а й формує **нову модель ресурсоефективного виробництва**, орієнтовану на екологічну відповідальність і енергетичну самодостатність. Подальші екологічні вдосконалення можуть бути пов'язані з використанням **систем моніторингу викидів у реальному часі**, рекуперацією тепла від охолоджувальних систем і розвитком **вуглецево-нейтрального виробництва**.

РОЗДІЛ 4. Удосконалення технології переробки відходів для підвищення ефективності виробництва біопалива

4.1. Пропозиції щодо оптимізації технологічного процесу переробки деревних відходів

Для підвищення ефективності переробки деревних відходів та збільшення виходу якісного біопалива на підприємстві **ТОВ «SWISS KRONO»** доцільно впровадити низку технічних, технологічних та організаційних удосконалень, спрямованих на **ресурсо- та енергоощадність, зменшення втрат сировини і покращення екологічних показників.**

1. Оптимізація системи збору та сортування відходів

Нині на підприємстві основні відходи утворюються в процесах розпилювання, фрезерування, шліфування та ламінування. Частина дрібної фракції (тирса, шліфувальний пил) потрапляє у загальний потік, що ускладнює подальшу переробку. Для підвищення ефективності доцільно:

- запровадити **автоматизовану систему пневмотранспорту з фракційним поділом** відходів за розміром частинок;
- встановити **додаткові циклонні вузли** у зонах шліфування для селективного збору пилоподібної сировини;
- реалізувати систему **маркування потоків відходів** (стружка, тирса, пил), що полегшить контроль їх кількості та напрямів використання.

Результат: зменшення втрат цінної сировини на 5–7%, підвищення стабільності якості гранул біопалива.

2. Удосконалення процесу сушіння сировини

Сушіння є одним із найбільш енергоємних етапів. У діючій технології використовуються барабанні сушарки, які споживають тепло з котлів на біомасі. Для зниження енергоспоживання рекомендовано:

- впровадити **сушильні агрегати з рекуперацією тепла** (повторне використання гарячих відхідних газів);
- автоматизувати контроль вологості сировини за допомогою **інфрачервоних датчиків**;
- встановити **перетворювачі частоти** на вентиляторах сушильних ліній для регулювання швидкості повітряного потоку.

Очікуваний ефект - зниження споживання енергії на сушіння на 10–15%, стабілізація вологості сировини в межах 8–10%.

3. Оптимізація процесу гранулювання (брикетування)

Для отримання біопалива стабільної щільності й калорійності слід приділити увагу параметрам пресування. Доцільно:

- модернізувати шнекові або матричні преси, забезпечивши **регулювання тиску й температури пресування** залежно від типу сировини;
- застосовувати **попередню термічну підготовку відходів** для підвищення пластичності лігніну, який виступає природним зв'язувальним компонентом;
- впровадити **систему контролю геометрії гранул** з автоматичним відсівом нестандартної продукції.

Результат - підвищення механічної міцності пелет на 8–12%, зменшення кількості браку, поліпшення зовнішнього вигляду продукції.

4. Раціональне використання енергоресурсів

Враховуючи, що на «SWISS KRONO» значна частина теплової енергії вже генерується за рахунок спалювання власних деревних залишків, додатковим напрямом підвищення енергоефективності є:

- **інтеграція енергетичної системи підприємства в єдиний моніторинговий контур** для відстеження витрат енергії в реальному часі;

- **використання тепла від димових газів сушарок** для підігріву повітря у виробничих приміщеннях або підсушування сировини на попередніх стадіях;

- **встановлення теплообмінників на котельнях**, що дозволить повернути до 10% енергії у виробничий цикл.

Очікуваний ефект - скорочення питомих витрат енергії на одиницю біопалива на 12–14%.

5. Автоматизація та цифровізація контролю якості

Запровадження **системи управління технологічними параметрами (SCADA або MES-рівень)** забезпечить точний контроль температури, вологості, тиску та швидкості пресування. Додатково можливе використання **датчиків ІоТ** для моніторингу стану обладнання, що мінімізує простої та підвищує загальний коефіцієнт готовності лінії.

6. Розвиток системи циркуляційної економіки

У межах стратегії сталого розвитку підприємства доцільно впровадити **модель замкнутого циклу**:

- переробка 100% деревних відходів у біопаливо;
- використання золи після спалювання як добрива або компонента для будматеріалів;
- повернення тепла і вторинних матеріалів у виробництво.

Загальний очікуваний ефект від оптимізації

Реалізація запропонованих заходів на ТОВ «SWISS KRONO» дозволить:

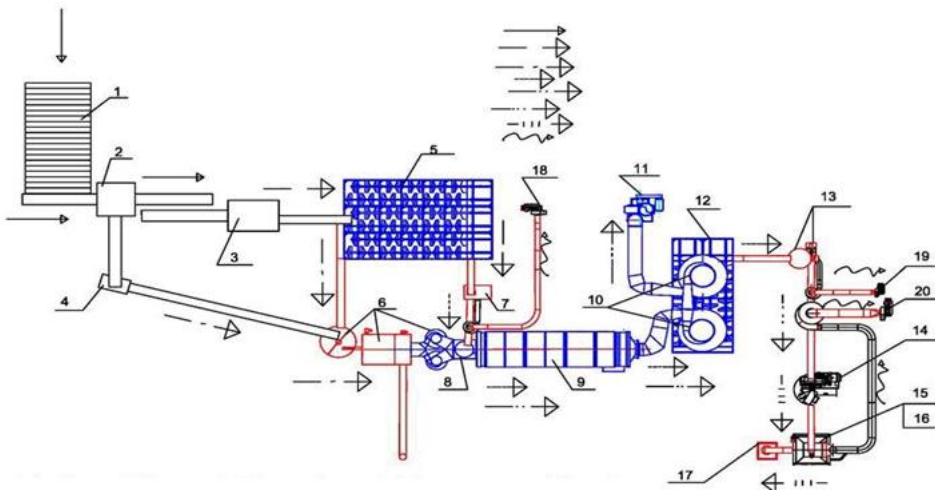
- підвищити **коефіцієнт використання деревної сировини** з 90% до 98%;
- зменшити **енергоспоживання процесу переробки** на 15–20%;
- знизити **викиди CO₂** на 10%;

- підвищити економічну рентабельність виробництва біопалива на 12–15%.

4.2. Впровадження енергоефективного обладнання та систем автоматизації

Одним із ключових напрямів удосконалення технології переробки деревних відходів у біопаливо на підприємстві ТОВ «SWISS KRONO» (рис. 4.1) є модернізація обладнання з метою підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат і покращення якості кінцевого продукту. Впровадження інноваційних систем автоматизації дозволяє оптимізувати роботу виробничих ліній, мінімізувати втрати сировини й забезпечити стабільний контроль технологічних параметрів.

Рис. 4.1 Схема технологічного процесу виробництва паливних гранул [14]



- 1 - Подавальний транспортер;
- 2 - Накопичувач деревинних відходів;
- 3 - Рубильна машина;
- 4 – Подрібнювач;
- 5 - Накопичувач стружки і деревної муки;

- 6 – Теплогенератор;
- 7 - Подрібнювальний агрегат;
- 8 - Бункер сушильного агрегату;
- 9 - Сушильний барабан;
- 10 - Циклон сушильного агрегату;
- 11 – димовідвідник;
- 12 - Склад сухої сировини;
- 13 - Подрібнювач з бункером-дозатором;
- 14 - Прес-гранулятор;
- 15 - Охолоджувач гранул
- 16 – Вібросито;
- 17 - Упакувальник гранул;
- 18,19,20 - Вентилятори системи пневмотранспорту

Сировина поступає в дробарку, де подрібнюються до стану муки.

Отримана маса поступає в сушарку, з неї - у прес-гранулятор, де деревну муку пресують у гранули. Стиснення під час пресування підвищує температуру матеріалу, лігнін, що міститься в деревині розм'якшується і склеює частки в щільні циліндри.

На виробництво однієї тонни гранул йде 3-5 кубометрів деревних відходів природної вологості. Готові гранули охолоджують, пакують у великі біг-беги (по кілька тонн) або дрібну упаковку від декількох кг до декількох десятків кг. Розрізняють промислові (доставляються насипом без упаковки або в біг-бегах) і споживчі гранули (у дрібній розфасовці, орієнтовані на приватних і невеликих промислових споживачів).

Деревні паливні гранули (пелети, ДТГ) - це невеликі циліндричні пресовані деревні вироби діаметром 4-12 мм, завдовжки 20-50 мм, перероблені з висушених залишків деревообробного та лісопильного виробництва: тирса, стружка, деревне борошно, тріска, деревний пил і т. д. Гранули використовуються в котлах для отримання теплової та електричної енергії шляхом спалювання.

Перевагою використання деревних гранул перед іншими видами палива є:

- Зниження шкідливих викидів в атмосферу: деревне біопаливо визнано CO₂ - нейтральним, тобто при його спалюванні кількість виділяється вуглекислого газу в атмосферу не перевищує обсяг викидів, який би утворився шляхом природного розкладання деревини;

- Велика теплотворна здатність: в порівнянні з тріскою і з кускових відходи деревини. Енергомісткість одного кілограма деревних гранул відповідає 0,5 літра рідкого дизельного палива; деревні гранули не поступаються за теплотворної здатності ні вугіллю, ні мазуту;

- Низька вартість у порівнянні і дизпаливом і опаленням електрикою,

- Чистота приміщення, в якому встановлений котел,

- Можливість автоматизації котелень.

Технологія виробництва деревних паливних гранул

Розстановка устаткування на кожному підприємстві може бути різна. Однак принципи - загальні з моменту виникнення технологія виробництва пелет в 1947 році. Сам по собі процес гранулювання - пеллетизації відбувається в спеціальних кільцевих штампах (прес-формах) обертовими роторними вальцями, які упресовують в численні отвори - фільтери прес-форми, активізувати паром подрібнене деревне сировину, після чого, зрізані з зовнішньої сторони штампа спеціальним ножем гранули, повинні бути охолоджені й відділені від дрібних частинок.

Весь процес виробництва умовно можна розділити на кілька етапів:

1 - Подрібнення

2 - Сушіння

3 - Водопідготовка

4 - Пресування

- 5 - Охолодження
- 6 - Розфасовка
- 7 - Упаковкування

Розглянемо докладніше кожен етап виробництва:

Подрібнення деревної сировини. Рубальної машини (Дробарки) подрібнюють деревну сировину до фракції з розмірами не більше 25x25x2 мм для подальшої сушки. Найкраще для зниження енерговитрат на сушіння подрібнювати до більш дрібної фракції.

Сушка. Деревна сировина перед пресуванням повинно мати вологість $10\% \pm 2\%$. Сировина з більшою або меншою вологістю вимагає додаткового зволоження або додаткової сушки. Сушарки діляться на два типи: барабанного і стрічкового. Стрічкового типу: дорожче, але безпечніше. За типом вживаного сушильного агента вони поділяються на сушарки на топкових газах, гарячому повітрі і водяній парі. За типом вживаного виду палива для виробництва ДТГ: газові і на деревних відходах.

До подрібнення сухої сировини. Для стійкої роботи преса вхідна фракція повинна бути не більше 4 мм. Таку фракцію може забезпечити молотковий млин, стружковий верстат або дезінтегратор.

Водопідготовка. Сировина з вологістю менше 8% погано піддається пресуванню, тому потрібно, пристрій додаткового зволоження сировини. Кращий варіант - це шнекові змішувачі, що мають можливість подачі води або пари. Пар застосовують для зниження міцності і збільшення пластичності деревної сировини твердих порід. Преси деяких виробників через конструктивні особливості не вимагають додавання пара. Деякі застосовують пар для старого, злежалого сировини, але такою сировиною складно отримати гранули хорошої якості.

В основі всього процесу гранулювання або в серце його перебуває прес. Сьогодні існує кілька десятків виробників пресів з різних країн світу (CPM, Andritz, Salmatec, Amandus Kahl, Buhler, Munch та багато інших).

Преси конструктивно розрізняються за видами матриць:

- Прес з круглою матрицею
- Прес з плоскою матрицею.

Прес з круглою матрицею розроблявся для комбікормової, харчової та хімічної промисловості. А прес з плоскою матрицею спочатку для утилізації промислових і побутових твердих відходів. На сьогоднішній день преси обох модифікацій, що використовуються в гранулювання, працюють за однаковим принципом. Біжучі катки створюють контактне напруження зминання сировини на матриці, і через отвори в матриці продавлюють сировина, яка обрізається ножами. Преси виконані з особливо міцних матеріалів з жорсткими могутніми корпусами. Матриця і катки виготовлені із спеціальних загартованих зносостійких сплавів. Гранулювання деревини, як матеріалу має високу щільність, вимагає підвищеної зусилля для пресування. При пресуванні відбувається ущільнення деревної сировини до 3 разів. Питоме споживання електроенергії складає від 30 до 50 кВт в годину на тонну. Через сили тертя і адіабатичних процесів, що відбуваються при різкому стисненні сировини, температура в робочій зоні преса сягає 100 ° С.

•-**Охолодження.**-Чим вище зусилля пресування і вище температура сировини, тим краще гранули по якості. При збільшенні температури пресування понад 120 ° С відбуваються незворотні процеси в гранульованій сировині, які призводять до погіршення якості гранул. Охолодження необхідно для кондиціювання гранул після пресування. У хороших виробників обладнання в технологічному процесі, після охолоджувача

існують системи для очищення готових гранул від пилу, що істотно покращує якість продукції, що випускається.

•-**Розфасовка і упаковка.** Розфасовка і упаковка паливних гранул залежить від того, яка система зберігання існує у споживача.

У вільному вигляді - насипом.

У мішках біг-бег, від 500 до 1200 кг

У дрібній розфасовці по 10 ... 20 кг.

Способи розфасовки паливних гранул

У вільному вигляді - насипом



Рис.4.2 Зберігання гранул насипом

Підрозділяється на дві групи:

Перша йде на великі ТЕЦ, вимоги щодо якості невисокі, ціна також невелика: промислові пелети.

Друга- високої якості для котлів невеликої потужності і подальшої фасування в дрібну упаковку, вимоги високі, ціна також досить висока.

Фасовка в біг-беги

-Розфасовка в біг-беги застосовується для індустріальної транспортування сипучих продуктів. Біг-бги виготовляються з міцного полімеру, мають петлі для механізації вантажно-розвантажувальних робіт, а

також дозволяють зберігати постійну необхідну вологість ДТГ при відкритому складуванні. Ціна ДТГ в біг-бегах вище, ніж при доставці насипом.



Рис.4.3 Фасовка гранул в біг-беги

Дрібна розфасовка Найдорожча група. Ціни на гранули в дрібній розфасовці найбільш високі, і перевищують 200 Євро за тонну. До даної групи ДТГ пред'являються підвищені вимоги по якості. Дуже зручна для тих замовників, хто не може мати складу для зберігання в насипному вигляді. Перевозиться на палетах (піддонах). Масою до однієї тонни. На знімках показані варіанти транспортного пакета і мішка 20 кг.



Рис.4.4 Дрібна розфасовка гранул

1. Енергоефективне обладнання для сушіння сировини

Сушіння є одним із найбільш енергозатратних етапів у виробництві біопалива, оскільки потребує значної кількості теплової енергії. Для підвищення ефективності цього процесу на підприємстві доцільно впровадити такі рішення:

- **Сушильні комплекси із закритим циклом тепlopостачання** - використання рекуперації тепла від відхідних газів дозволяє повернути до 30% енергії назад у процес сушіння.
- **Системи керування на базі PID-регуляторів** - забезпечують автоматичну підтримку необхідної температури та вологості, запобігаючи пересушуванню сировини.
- **Інфрачервоні датчики вологості** - дозволяють здійснювати онлайн-контроль стану матеріалу, що дає можливість зменшити витрати енергії на 10–15%.

Результат: зменшення питомих енерговитрат на сушіння на 12–18%, покращення стабільності якості пелет та брикетів.

2. Впровадження енергоефективних пресів для гранулювання

На діючих лініях гранулювання підприємства використовуються механічні преси традиційної конструкції, які мають високий рівень втрат енергії через тертя та нерівномірність подачі сировини. Рекомендовано:

- замінити існуючі преси на **гідравлічні або шнекові установки з частотними перетворювачами**, що регулюють навантаження на електродвигуни;
- використовувати **автоматичні дозатори подачі сировини**, які забезпечують рівномірне пресування та мінімізацію браку;
- впровадити **контроль температури зони пресування**, що підвищує ефективність використання лігніну як природного зв'язувального агента.

Очікуваний результат: економія електроенергії на гранулювання до 15%, збільшення продуктивності на 8–10%.

3. Автоматизація систем транспортування та зберігання

Система внутрішнього транспорту деревних відходів є важливою складовою енергоспоживання. На підприємстві доцільно модернізувати пневмотранспортні та конвеєрні системи:

- впровадити **енергоефективні вентилятори з частотним регулюванням**, які змінюють швидкість повітряного потоку залежно від завантаження лінії;
- застосувати **сенсорні системи контролю рівня заповнення бункерів і силосів**, що запобігає перевитраті енергії;
- використовувати **оптимізовану схему транспортування** із мінімізацією довжини маршрутів.

Результат: зменшення втрат енергії на транспортування сировини на 10–12%.

4. Цифрова система моніторингу та керування виробничими процесами

Для забезпечення стабільної роботи обладнання та мінімізації людського фактору пропонується впровадження системи **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)**. Функції такої системи на підприємстві можуть включати:

- моніторинг ключових параметрів у реальному часі (температура, вологість, тиск, споживання енергії);
- архівування технологічних даних для аналізу ефективності роботи ліній;
- сигналізацію та автоматичну зупинку у разі перевищення допустимих параметрів;

- інтеграцію з ERP-системою підприємства для оптимізації планування виробництва.

Впровадження SCADA дозволить підвищити стабільність процесів, скоротити час простоїв обладнання на 10–15% та зменшити ризики аварійних ситуацій.

5. Використання систем енергоменеджменту

Для досягнення довгострокового ефекту необхідно створити на підприємстві **систему енергоменеджменту відповідно до стандарту ISO 50001**, що забезпечить:

- постійний контроль за споживанням енергоресурсів;
- визначення зон найбільших втрат енергії;
- формування показників енергоефективності для окремих виробничих ділянок.

Впровадження такої системи не лише знижує витрати, але й створює передумови для отримання підприємством **“зелених” сертифікатів** та підвищує його конкурентоспроможність на європейському ринку.

Загальний очікуваний ефект від впровадження енергоефективних технологій

Реалізація зазначених заходів на ТОВ «SWISS KRONO» дасть змогу досягнути таких результатів:

- скорочення загальних енергетичних витрат підприємства на **20–25%**;
- підвищення ефективності переробки відходів на **15–20%**;
- зниження собівартості продукції на **10–12%**;
- зменшення викидів CO₂ на **до 15%**;
- підвищення рівня автоматизації виробництва до **70–80%**.

4.3. Екологічна оцінка запропонованих рішень

Запропоновані у попередніх підрозділах рішення щодо вдосконалення технології переробки деревних відходів та впровадження енергоефективного обладнання мають не лише економічний, а й значний **екологічний ефект**. Їх реалізація сприятиме зниженню негативного впливу на навколишнє середовище, зменшенню кількості відходів, покращенню стану повітря, ґрунтів і водних ресурсів у зоні діяльності підприємства.

1. Зниження обсягів утворення відходів

Оптимізація процесу збору, сортування та підготовки деревних відходів дозволить **зменшити кількість невикористаних решток деревини до 5–7%** від загального обсягу сировини. Це означає, що більшість залишків перетворюється на цінну продукцію - **пелети, брикети чи технологічну тріску**, яка використовується повторно у виробничому циклі або реалізується як біопаливо.

Таким чином, підприємство переходить від лінійної до **циркулярної моделі виробництва**, де практично всі побічні продукти мають корисне застосування.

2. Скорочення викидів в атмосферу

Модернізація сушильних установок і пресів, а також застосування систем рекуперації тепла забезпечують **зменшення викидів CO₂, CO, пилю та летких органічних сполук (ЛОС)**. За попередніми розрахунками, реалізація комплексу енергоефективних заходів на ТОВ «SWISS KRONO» дає змогу досягнути таких результатів:

- скорочення **викидів CO₂ на 12–15%** завдяки зниженню споживання енергії;
- зменшення **викидів пилю на 25–30%** через ефективнішу систему фільтрації повітря;

- **зниження вмісту летких сполук у відпрацьованих газах на 20%.**

Крім того, за рахунок точного контролю параметрів сушіння (температури, вологості, швидкості подачі матеріалу) мінімізується ризик перегріву деревини, що знижує утворення шкідливих газів і диму.

3. Раціональне використання енергоресурсів

Впровадження енергоефективних установок і систем автоматизації сприяє зменшенню **споживання електроенергії та тепла** в середньому на 20–25%. Це не лише знижує собівартість продукції, але й **зменшує вуглецевий слід підприємства**, оскільки менше енергії генерується з викопних джерел.

Застосування біопалива, виготовленого з власних відходів, дозволяє замінити частину природного газу або мазуту, що, у свою чергу, **знижує загальні викиди парникових газів на 800–1000 тонн CO₂ на рік.**

4. Поліпшення санітарно-екологічного стану території

У результаті впровадження нової системи збору та переробки деревних відходів очікується:

- зменшення кількості відходів, що підлягають вивезенню або спаленню на відкритих майданчиках;
- зниження запиленості повітря в зоні виробництва;
- скорочення кількості місць накопичення відходів, що позитивно впливає на **естетичний вигляд території** і санітарно-гігієнічні умови праці.

Таким чином, виробнича зона підприємства стає **чистішою, безпечнішою і більш екологічно збалансованою.**

5. Відповідність екологічним стандартам і законодавству

Реалізація запропонованих заходів сприяє відповідності підприємства сучасним вимогам європейських та українських стандартів, зокрема:

- **ISO 14001:2015 (Система екологічного менеджменту)** - інтеграція моніторингу впливів і постійне вдосконалення екологічних показників;

- **ISO 50001:2018 (Енергоменеджмент)** - підвищення енергоефективності на основі системного підходу;

- **Директивам ЄС щодо промислових викидів (IED 2010/75/EU)** - зменшення забруднення повітря, води та ґрунтів.

Це відкриває можливість для підприємства **отримання “зелених сертифікатів”** і підвищення його привабливості на міжнародних ринках.

6. Соціально-екологічний ефект

Покращення екологічних умов у зоні діяльності ТОВ «SWISS KRONO» має позитивний вплив і на місцеву громаду. Очікувані наслідки:

- покращення якості повітря та зменшення запахових забруднень;
- зниження рівня шуму та пилу;
- підвищення рівня екологічної безпеки для працівників і жителів прилеглих населених пунктів.

У результаті підвищується **екологічна репутація підприємства**, що є важливим чинником для довгострокового розвитку та партнерства з європейськими компаніями.

Запропоновані заходи для ТОВ «SWISS KRONO» забезпечують комплексний позитивний ефект:

- значне зменшення обсягів відходів та викидів у довкілля;
- скорочення споживання енергії та ресурсів;
- покращення санітарно-гігієнічного стану виробничих територій;
- відповідність міжнародним екологічним стандартам;
- підвищення екологічної безпеки та соціальної відповідальності підприємства.

Таким чином, реалізація зазначених рішень робить виробництво **екологічно стійким, економічно ефективним і технологічно сучасним.**

Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці на підприємстві

На підприємстві питанням охорони праці і довілля приділяється увага зі сторони адміністрації і відповідної служби охорони праці.

Служба охорони праці відіграє значну роль у справі зниження виробничого травматизму та професійних захворювань. Це здійснюється через проведення масової пропаганди, навчання робітників правил безпеки на окремих ділянках, розслідування нещасних випадків та ін. Крім цього відділ охорони праці проводить з робітниками інструктажі з техніки безпеки.

Стимулювання діяльності щодо охорони праці треба спрямоване на створення зацікавленості працівників у забезпеченні безпечних та здорових умов праці на робочих місцях. Види, форми матеріального та морального стимулювання розробляє адміністрація підприємства разом з профспілками та трудовим колективом.

Основними напрямками діяльності відділу щодо управління охороною праці є: навчання працівників охороні праці; забезпечення безпеки виробничого устаткування, виробничих процесів; забезпечення безпеки будівель та споруд; нормалізація санітарно-гігієнічних умов праці; забезпечення працюючих засобами індивідуального захисту; забезпечення оптимальних режимів праці та відпочинку працівників; організація лікувально-профілактичного обслуговування працівників; санітарно-побутове обслуговування працівників; професійний відбір кадрів.

Підвищення продуктивності праці та покращення якості продукції, що випускається на деревообробних підприємствах можливе лише при забезпеченні здорових і безпечних умов праці, впровадження економічно чистих технологічних процесів. Тому покращення умов праці на підприємстві було і залишається однією з актуальних проблем над якими

займається система управління охороною праці підприємства та служба охорони праці.

Аналізуючи технічні фактори умов праці, визначимо які операції виконуються вручну, виявимо небезпечні та шкідливі зони технологічного процесу та обладнання.

У табл. 5.1 подана характеристика технологічного процесу за небезпечними виробничими факторами.

Таблиця 5.1 Характеристика технологічного процесу за небезпечними виробничими факторами

Назва технологічного процесу	Небезпечний виробничий фактор	Клас приміщення по ступеню ураження електрострумом по ПУЕ
Лісопильно-розкрійний цех	трудомісткість процесу III категорії важкості	Середній ступінь електронебезпеки II-I-клас пожежонебезпеки і В-III – категорія вибухонебезпеки
	насиченість верстатного обладнання, що характеризується наявністю високих частот обертання різального інструмента, що призводить до значних інерційних та ударних зусиль у підшипникових опорах обладнання	
	наявність верстатів з ручною подачею, що збільшує ймовірність контактування верстатників з небезпечною зоною та травмування	
	значна кількість верстатів прохідного типу, що збільшує ймовірність вилітання заготовок у сторону верстатника	
	високий рівень шуму зокрема від розкрійного рамного обладнання та надмірні рівні шуму і вібрації деревообробного обладнання (87...119 дБА), що викликають професійні захворювання обслуговуючого персоналу (втрата слуху, розлад центральної нервової системи, гіпертонія, вібраційна хвороба тощо)	
	відсутність захисного огороження на круглопилковому обрізному верстаті	
	суттєвий відсоток ручних операцій	

В цехах механічної обробки деревини під час експлуатації деревообробного обладнання в даний час, нажаль, виникає біля 50...60 % нещасних випадків серед всіх зафіксованих у меблевому виробництві.

Найнебезпечнішим деревообробним обладнанням є круглопиляльні, стрічково-пиляльні верстати та ін., що видно із табл.5.2.

Таблиця 5.2. Розподіл деревообробного обладнання за ступенем небезпеки

№	Найменування обладнання	Показник небезпеки
1	Круглопиляльні верстати	4,17
2	Стрічково-пиляльні верстати	2,21
3	Фугувальні верстати	1,20
4	Лісопилльні рами	1,10
5	Фрезерні верстати	0,68

Найбільш небезпечними виробничими факторами при роботі деревообробних верстатів є: різальний інструмент, що обертається з великою швидкістю; викид заготовок, сучків, осколків інструмента, падіння пиломатеріалів та ін. (табл.5.3).

Таблиця 5.4 Розподіл нещасних випадків у залежності від характеру небезпечних факторів

Найменування небезпечного фактора	Кількість нещасних випадків, %
1. Дія дереворізального інструмента	64,3
2. Викид заготовок у зворотну сторону	11,2
3. Викид сучків, осколків деревини, інструмента	10,2
4. Несправність огороження	7,7
5. Падіння оброблюваних заготовок	5,6
6. Інші фактори	1,0
<i>Всього</i>	<i>100</i>

Характеристика технологічного процесу за наявності ручних операцій подана в таблиці 5.4.

**Таблиця 5.4 Характеристика технологічного процесу за наявністю
ручних операцій**

Назва цеху, дільниці	Назва робочого місця, де виконується операція вручну	Назва операцій, що використовуються вручну	Причини виконання операцій вручну
1	2	3	4
Лісопильно-розкрийний цех	Розкрій колод на лісопильних рамах РД-75-7, РД-75-2	Подача на передрамні візки, базування на транспортерах	Відсутність засобів механізації операції
	Розкрийне обладнання: ЦБ-2А, ЦПА-40, SM-320	Завантаження і вивантаження, а також базування, післяопераційне штабелювання	Відсутність відповідних механізованих засобів
	Сортувальні площадки	Сортування пилопродукції і пиломатеріалів	Відсутність спеціальних сортувальних пристроїв та агрегатів
	Верстатний парк	Налагодження обладнання, їх технічне обслуговування	Складність механізація процесу

З поданої таблиці видно, що значний відсоток операцій в цеху виконуються вручну, що в свою чергу зменшує продуктивність праці, підвищує ризик травматизму.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі на тему «Дослідження та удосконалення технології переробки відходів деревообробної промисловості для виробництва біопалива» проведено комплексний аналіз сучасного стану, проблем і перспектив використання деревних відходів як вторинної сировини для отримання відновлюваних джерел енергії.

1. Теоретичні результати дослідження

У першому розділі було розглянуто природу, склад і властивості основних видів деревних відходів, зокрема тирси, стружки, обрізків, кори та шліфувального пилу. Доведено, що ці відходи мають значний енергетичний потенціал - від 10 до 19 МДж/кг теплотворної здатності, що дозволяє ефективно використовувати їх як сировину для виробництва біопалива.- Проаналізовано основні методи переробки деревини - фізико-механічні, термохімічні та біохімічні. Показано, що найбільш перспективними в сучасних умовах є **фізико-механічні технології виробництва пелет і брикетів**, які забезпечують високий ККД, зручність транспортування та зберігання палива.

2. Нормативно-правові та технологічні аспекти

У другому розділі узагальнено вимоги законодавства України та Європейського Союзу у сфері поводження з відходами, відновлюваних джерел енергії та виробництва біопалива.- Особлива увага приділена **Закону України «Про відходи»**, а також європейським директивам **2009/28/ЕС** та **2018/2001/EU (RED II)**, що регламентують частку енергії з відновлюваних джерел і встановлюють екологічні критерії сталого розвитку.- Розглянуто технологічні вимоги до виробництва твердого біопалива, сертифікацію та

стандарти якості (зокрема ENplus, ISO 17225-2), які визначають параметри вологості, зольності, теплотворної здатності та щільності продукції.

3. Аналіз виробництва біопалива на ТОВ «SWISS KRONO»

На прикладі підприємства **ТОВ «SWISS KRONO» (м. Кам'янка-Бузька, Львівська область)** проведено аналіз структури деревних відходів і технологічних процесів їх переробки.- Установлено, що основна частина відходів (понад 90%) використовується для **власних енергетичних потреб** або переробляється на паливні пелети. Разом з тим, наявні технологічні процеси потребують удосконалення через втрати енергії, неповне використання пилу й кори, а також недостатній рівень автоматизації.- Проведена оцінка показала, що **викиди CO₂ від існуючих процесів** можуть бути скорочені на 10–15% шляхом модернізації сушильного обладнання, оптимізації температурних режимів і впровадження систем рекуперації тепла.

4. Рекомендації та запропоновані рішення

У четвертому розділі розроблено пропозиції щодо **удосконалення технології переробки деревних відходів**, серед яких:

- впровадження систем автоматизованого контролю вологості сировини;-
- використання нових моделей пресів з енергоощадними приводами;-
- рекуперація тепла з димових газів для сушіння тирси;-
- повторне використання пилу та кори у вигляді брикетів.-

Запропоновані заходи дозволяють **зменшити споживання електроенергії на 20–25%**, скоротити обсяги викидів пилу на 30%, а також підвищити загальний ККД процесу на 10–12%.

5. Екологічна та економічна ефективність

Впровадження удосконаленої технології на підприємстві забезпечує комплексний ефект:

- **екологічний** - скорочення викидів CO₂ на 800–1000 тонн на рік, зниження кількості твердих відходів, покращення санітарного стану території;-
- **економічний** - зменшення витрат на утилізацію відходів, збільшення обсягів виробництва біопалива, підвищення енергоефективності;-
- **соціальний** - покращення умов праці працівників, зниження забруднення повітря в зоні населених пунктів, підвищення репутації підприємства як «зеленого виробника».-

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що деревні відходи є цінною енергетичною сировиною, яка, при належній організації переробки, може повністю забезпечувати енергетичні потреби деревообробного підприємства.- Запропонована технологія удосконалення процесів на базі ТОВ «SWISS KRONO» доводить, що **поєднання екологічних та енергетичних інновацій** не лише знижує негативний вплив на довкілля, а й підвищує конкурентоспроможність підприємства.

Отже, переробка деревних відходів у біопаливо є **перспективним напрямом сталого розвитку** деревообробної галузі України, який відповідає сучасним вимогам європейської екологічної політики, принципам «зеленої економіки» та стратегії переходу до відновлюваної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про відходи» № 187/98-ВР від 05.03.1998 р.
2. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» № 555-IV від 20.02.2003 р.
3. Закон України «Про енергозбереження» № 74/94-ВР від 01.07.1994 р.
4. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» № 820-р від 08.11.2017 р.
5. Міністерство енергетики України. **Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року.** – Київ, 2021.
6. Державна служба статистики України. **Енергетичний баланс України за 2023 рік.** – Київ, 2024.
7. Науково-дослідний інститут екології та сталого розвитку. **Використання деревних відходів у виробництві біопалива.** – Київ: НДІ Екології, 2022.
8. Кудря С.О., Пархоменко Н.О. **Біоенергетика в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку.** – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2021.

9. Гнатюк І.М., Мельник В.В. **Ресурсний потенціал біомаси для енергетики України.** // Екологічна безпека, 2022. – № 3. – С. 41–49.
- 10.Петренко Л.І., Бондар О.С. **Екологічні аспекти використання біопалива в деревообробній промисловості.** – Львів: ЛНТУ, 2021.
- 11.**SWISS KRONO Україна.** Офіційний сайт підприємства. – <https://www.swisskrono.ua> (дата звернення: 03.11.2025).
- 12.Кривенко І.В., Бондаренко М.М. **Пелети та брикети з деревних відходів: технологія та якість.** – Київ: Екоенергія, 2020.
- 13.**ДСТУ 7124:2009.** Паливо тверде біологічне. Методи визначення теплотворної здатності. – Київ: Держспоживстандарт України, 2010.
- 14.**ДСТУ ISO 17225-2:2016.** Біопаливо тверде. Класифікація пелет з деревини. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
- 15.Кравчук В.О., Левицька Н.С. **Виробництво пелет з відходів деревообробки: техніко-економічний аналіз.** // Вісник НУ “Львівська політехніка”, 2022. – № 5. – С. 88–94.
- 16.**Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України.** Аналітичний звіт про стан управління відходами. – Київ, 2023.
- 17.**Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України.** Звіт «Розвиток біоенергетики як складової енергетичної

незалежності України». – Київ, 2022.

18.Пелетна асоціація України. **Щорічний звіт про стан ринку біопалива.**
– Київ, 2023.

19.**Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council** on the promotion of the use of energy from renewable sources. – Official Journal of the European Union, 2009.

20.**Directive (EU) 2018/2001 (RED II)** on the promotion of the use of energy from renewable sources. – Official Journal of the European Union, 2018.

21.**European Biomass Association (AEBIOM).** Statistical Report – Bioenergy Europe, 2023.

22.**ISO 17225-1:2021.** Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements. – Geneva: ISO, 2021.

23.**Scarlat, N., Martinov, M., Dallemand, J.-F.** Assessment of the availability of agricultural and forestry residues for bioenergy production in Europe. // *Biomass and Bioenergy*, 2019. – Vol. 120. – P. 111–125.

24.**Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H.** *Energy from Biomass: Fundamentals, Technologies and Applications.* – Berlin: Springer, 2019.

25.**FAO.** *Wood residues for energy generation: status and perspectives.* – Rome: FAO Forestry Paper, 2020.