

Згідно з формою №Н6.01
Наказ Міністерства освіти і науки,
молоді та спорту України
29 березня 2012
року №384

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ,
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
УКРАЇНИ

Кафедра технології захисту навколишнього середовища і деревини та
безпеки життєдіяльності

Пояснювальна записка

до дипломної роботи бакалавра на тему:

**«Рециклінг відходів деревинностружкових плит:
технологічні можливості та екологічні переваги»**
(«Recycling of particleboard waste: technological possibilities and environmental
benefits»)

Студента групи ТЗНС-41

Спеціальність 183

«Технології захисту
навколишнього середовища»

Цяпко Богдана Ігорівна

Керівник: Сомар Г.В.

Рецензент: *доц. Ференч О.Б.*

Львів - 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут
Кафедра

деревообробних технологій і дизайну
технологій захисту навколишнього
середовища і деревини та безпеки
життєдіяльності

Рівень вищої освіти **бакалавр**

Спеціальність **183«Технології захисту
навколишнього середовища»**

проф. Кшивецький Б. Я.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТЗНС Д БЖД

.. 14 02 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Цяпко Богдані Ігорівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **«Рециклінг відходів деревинностружкових плит:
технологічні можливості та екологічні переваги»**
(«Recycling of particleboard waste: technological possibilities and environmental
benefits»)

керівник роботи Сомар Галина, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "14" лютого 2025 року № С-91

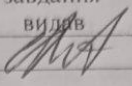
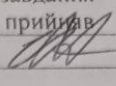
2. Строк подання студентом роботи до 15 травня 2025

3. Вихідні дані до роботи Проектом передбачити використання сучасних
технологій захисту навколишнього середовища, способів та методів захисту
від забруднень повітря та виробничих стічних вод. Максимальну увагу
приділити питанням комплексної переробки відходів та мінімізації
негативного впливу виробництва на довкілля

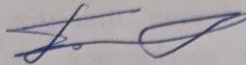
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити)

1. Загальний розділ;
2. Проектно-технологічний розділ;
3. Охорона праці;
4. Висновки.

5. Графічний матеріал (15-20 слайдів)
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видані	завдання прийняті
Охорона праці	доц. Соколовський І.А.		

7. Дата видачі завдання 14 лютого 2025 року

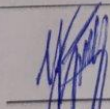


Керівник проекту доц. Сомар Г.В.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

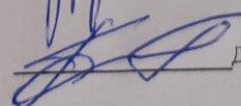
№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Загальний розділ	до 25.03.25	
2.	Проектно-технологічний розділ	до 10.04.25	
3.	Охорона праці	до 30.04.25	
4.	Оформлення бакалаврської роботи	до 15.05.25	

Студент



Цяпко Б. І.

Керівник проекту



доц. Сомар Г.В.

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи
на тему: «Рециклінг відходів деревинноструктурних плит: технологічні
можливості та екологічні переваги»

У бакалаврській роботі досліджено проблему утворення та породження з відходами деревообробних плит (ДСП), яка є одним із найбільш поширених видів промислових і побутових відходів у деревообробній галузі. У роботі проаналізовано виробничі та експлуатаційні джерела утворення вихідних речовин, їх хімічний склад, фізико-механічні властивості та екологічну небезпеку, пов'язану з вмістом токсичних компонентів, зокрема формальдегіду.

Особливу увагу приділено аналізу сучасних технологій рециклінгу ДСП: механічному подрібненню з повторним використанням стружки, термічній утилізації з рекуперацією тепла, хімічній регенерації смол. Проведено порівняльну оцінку технологій за критеріями екологічної ефективності, енергоспоживання та економічної доцільності.

У роботі розроблено оптимізовану технологічну схему рециклінгу відходів ДСП для деревообробних підприємств, виконану розрахунок екологічних (зниження обсягів захоронення, скорочення викидів формальдегіду) та економічних (зменшення витрат на сировину, повернення інвестицій) переваг впровадження. Надано практичні рекомендації щодо організації ефективної системи збору, сортування та переробки відходів.

Результати дослідження можуть бути використані підприємствами галузі для впровадження ресурсоефективних та управління екологічно безпечними технологіями з відходами ДСП, а також для подальшого удосконалення систем промисловими відходами

ЗМІСТ

Вступ.....	7
-------------------	----------

Розділ 1. Аналіз утворення та властивостей відходів деревинностружкових плит.....	9
--	----------

1.1. Виробничі та побутові джерела утворення відходів ДСП.....	9
1.2. Хімічний склад та фізико-механічні характеристики відходів.....	11
1.3. Класифікація відходів ДСП за рівнем забрудненості	14
1.4. Екологічна небезпека несорттованих і неконтрольованих відходів.....	16
1.5. Висновки до розділу 1.....	18

Розділ 2. Існуючі технології рециклінгу ДСП та їх ефективність.....	20
--	-----------

2.1. Механічне подрібнення і повторне використання стружки.....	20
2.2. Термічна утилізація з рекуперацією тепла: плюси і мінуси.....	21
2.3. Хімічна регенерація смол та детоксикація залишків.....	23
2.4. Порівняльна характеристика технологій за критеріями: вартість, енергоспоживання, рівень шкідливих викидів.....	27
2.5. Висновки до розділу 2.....	28

Розділ 3. Розробка та обґрунтування технологічної схеми рециклінгу ДСП.....	30
--	-----------

3.1. Вибір оптимального методу утилізації для підприємства	30
3.2. Опис технологічної схеми переробки.....	31

3.3. Розрахунок екологічної ефективності (зниження обсягів сміття, викидів формальдегіду).....	37
3.4. Розрахунок економічної доцільності (вартість обладнання, витрати, повернення інвестицій).....	48
3.5. Висновки до розділу 3.....	50
ОХРОНА ПРАЦІ.....	53
Висновки.....	59
Список використаних джерел.....	60

ВСТУП

Актуальність теми

Сучасна деревообробна промисловість активно використовує деревинностружкові плити (ДСП) як економічно вигідний, технологічно універсальний і широко доступний матеріал. Проте значні обсяги виробничих та експлуатаційних відходів ДСП створюють серйозну екологічну проблему. Ці відходи містять формальдегідні смоли, токсичні речовини та дрібнодисперсні частинки, що при спалюванні або неконтрольованому захороненні забруднюють атмосферне повітря, воду й ґрунти. У зв'язку з посиленням екологічних норм і зростанням вартості природних ресурсів зростає потреба в розробці технологій повторного використання та утилізації відходів ДСП. Рециклінг стає не лише екологічною необхідністю, а й джерелом вторинної сировини, що знижує виробничі витрати. Саме тому оптимізація методів переробки цих відходів набуває особливого значення.

Метою роботи є обґрунтування доцільності та розробка технологічних рішень для ефективного рециклінгу відходів деревинностружкових плит з урахуванням їх екологічного впливу.

Основні завдання дослідження:

Проаналізувати особливості складу та екологічної небезпеки відходів ДСП. Дослідити існуючі технології переробки та їх ефективність. Розробити оптимальну схему рециклінгу з розрахунком екологічних і економічних переваг.

Надати практичні рекомендації щодо впровадження технології на деревообробних підприємствах.

Об'єктом дослідження є відходи деревинностружкових плит, що утворюються в процесі виробництва, обробки та демонтажу меблів або будівельних конструкцій.

Предметом дослідження є технологічні підходи до рециклінгу цих відходів та їх вплив на навколишнє середовище.

У роботі використовувалися такі методи:аналітичний - для вивчення властивостей відходів та чинного законодавства;порівняльний - для аналізу різних технологій переробки;інженерно-розрахунковий - для оцінки ефективності обраного рішення;графічний-для побудови технологічної схеми;екологічна експертна оцінка-для визначення переваг впровадження рециклінгу.

Робота складається з вступу, трьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі розглянуто характеристики відходів ДСП та оцінено їхню екологічну небезпеку. У другому - проаналізовано існуючі способи утилізації та переробки. У третьому - розроблено технологічну схему рециклінгу, виконано розрахунки її ефективності та надано практичні рекомендації.

Розділ 1. Аналіз утворення та властивостей відходів деревинностружкових плит

1.1. Виробничі та побутові джерела утворення відходів деревинностружкових плит (ДСП)

Загальна характеристика утворення відходів

Деревинностружкові плити (ДСП) – це листові композитні матеріали, отримані шляхом пресування деревної стружки, змішаної з термореактивними смолами. Вони є ключовим конструктивним елементом у меблевому виробництві, будівництві, інтер'єрі. Проте їх активне використання супроводжується значним утворенням відходів на різних етапах життєвого циклу: від виробництва до списання готової продукції.

Відходи ДСП класифікуються як виробничі (що утворюються в процесі обробки нових плит) та побутові/експлуатаційні (що виникають після використання продукції у побуті або комерційній діяльності).

Виробничі джерела утворення відходів

У промисловості відходи ДСП генеруються на таких основних етапах:

1) Розкрій плит

Найбільший обсяг залишків утворюється при первинному розкрої плит на заготовки для меблевих деталей. Через геометричну невідповідність розміру плити та потрібних деталей формується обрізь-шматки неправильної форми. Наприклад, при розкрої стандартної плити 2800×2070 мм на шафові деталі залишається до 10–15% неефективно використаного матеріалу.

2) Механічна обробка

Фрезерування, шліфування, свердління, облицювання генерують дрібну стружку, пил та шліфувальний абразивний залишок, що містить смоли. Ці частинки забруднюють повітря, мають підвищену летючість та потребують спеціальної системи аспірації.

3) Технологічні обслуговування і налагодження обладнання

Витрати плит на пробні пуски, калібрування ліній, налаштування пресів - ще одне джерело некондиційної продукції.

4) Відбракування готових деталей

Деякі партії заготовок вибраковуються через дефекти (розшарування, сколи, дефекти ламінування, підвищений вміст формальдегіду).

Такі елементи накопичуються на виробництві й потребують утилізації.

Типова структура виробничих відходів ДСП на меблевому підприємстві [3]:

обрізки – 45–60%;

пил – 20–30%;

шліфувальний пил – 10–15%;

браковані деталі – 5–10%.

Побутові та післяексплуатаційні джерела утворення

Використані деревинностружкові плити продовжують генерувати відходи вже поза межами виробництва, серед яких: демонтаж меблів, внутрішнього оздоблення; списання або ремонт старих меблів, офісного та побутового інтер'єру створює великі об'єми вторинного сміття з ДСП; Такі відходи зазвичай мають ламіноване або декоративне покриття, а також металеві або пластикові елементи кріплення.

Будівельне та ремонтне сміття

ДСП використовуються як конструкційні панелі в тимчасових перегородках, чорнових підлогах, дахових щитах. Після демонтажу в результаті ремонтів вони йдуть на звалище у вигляді змішаного будівельного сміття.

Відходи побутових споживачів

Домашні користувачі, змінюючи меблі або модифікуючи наявні, утворюють дрібні фрагменти, обрізки, старі полицки тощо.

Через відсутність централізованого збору такі відходи часто потрапляють на несанкціоновані звалища.

Комерційні підприємства (торгові мережі, салони)

Склади, магазини, виставкові зали утворюють відходи у вигляді старих вітрин, стендів, зразків меблів. Через складність демонтажу та великі об'єми ці відходи часто просто спалюються або захоронюються.

Особливості поводження з відходами ДСП

Усі вищезазначені джерела є потенційними об'єктами для рециклінгу, однак перешкодою є вміст токсичних смол (формальдегід) і гетерогенність структури (метал, ПВХ, клей, фарба). Пилоподібні залишки важко зібрати та використовувати через вибухонебезпечність і токсичність. Побутові відходи потребують попереднього сортування та очистки, що підвищує витрати на переробку.

1.2. Хімічний склад та фізико-механічні характеристики відходів

Відходи деревинностружкових плит (ДСП), які утворюються як у виробництві, так і після експлуатації, зберігають основні властивості самого матеріалу. Для подальшого поводження з ними-рециклінгу або утилізації - важливо розуміти їхній хімічний склад та фізико-механічні характеристики, які впливають на екологічну безпеку, технологічність повторного використання і ризику для здоров'я.

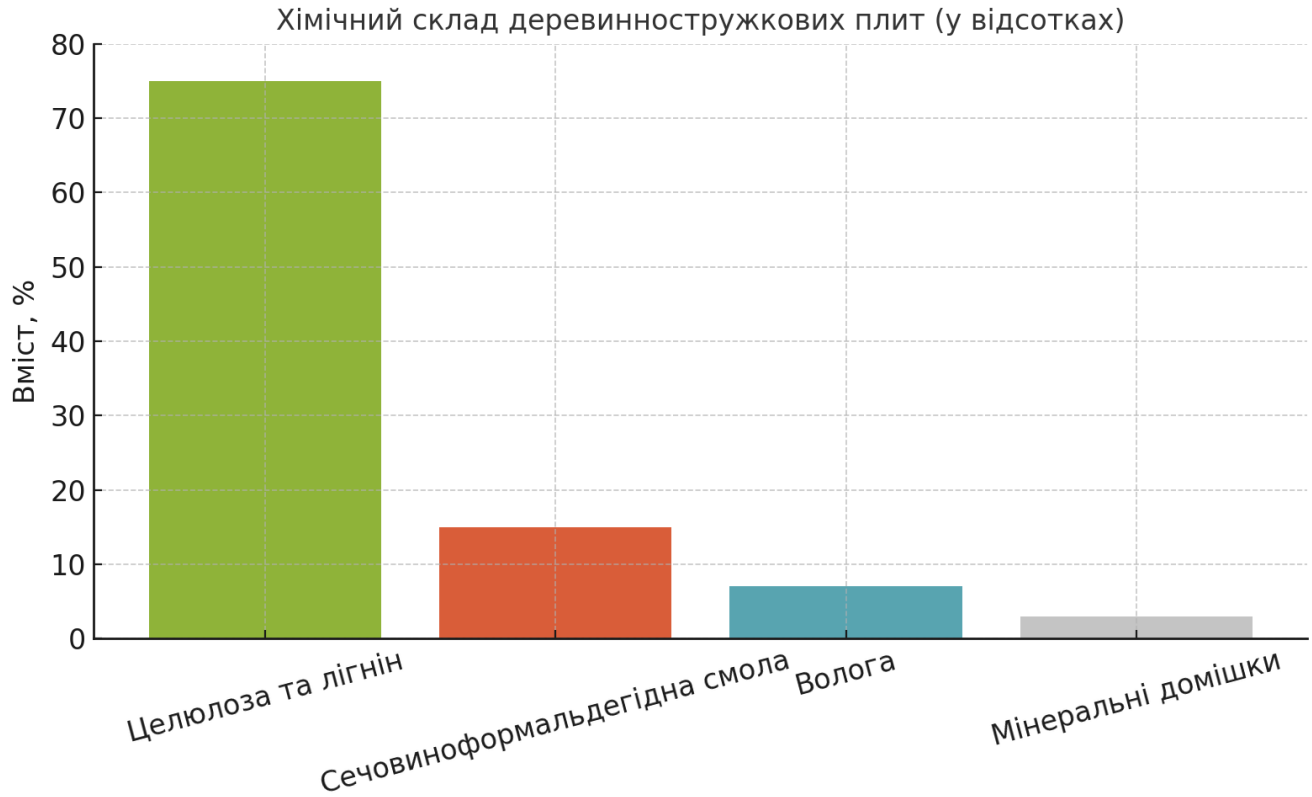


Рис.1 Хімічний склад відходів ДСП

Основу деревинностружкових плит становлять деревні компоненти целюлоза, геміцелюлоза, лігнін); зв'язуючі смоли, переважно сечовиноформальдегідні; волога (у процесі експлуатації або при зберіганні її вміст зростає) та мінеральні домішки (пігменти, добавки, пил, залишки абразивів).

Графік: «Хімічний склад деревинностружкових плит» наочно ілюструє співвідношення основних компонентів у відходах плит.

Таблиця 1. Основні компоненти складу відходів ДСП

Компонент	Вміст, % маси
Целюлоза, лігнін, деревна основа	70–75%
Сечовиноформальдегідна смола	10–15%
Волога	5–10%
Мінеральні домішки, пігменти	2–5%

Фізико-механічні властивості відходів

Відходи ДСП, особливо великі обрізки та браковані деталі, зберігають частину фізико-механічних характеристик початкового матеріалу (табл.3). Це дозволяє потенційно їх повторно використовувати, зокрема після подрібнення або термічної обробки.

Таблиця 2. Основні фізико-механічні параметри

Показник	Середнє значення	Примітка
Густина	600–750 кг/м ³	Залежить від марки плити
Межа міцності на вигин	10–18 МПа	Знижується з часом експлуатації
Вологість (в умовах зберігання)	8–12%	Може бути вищою у вуличних умовах
Температура займання	близько 250° С	Високий ризик займання
Вміст формальдегіду	0,1–0,3 мг/м ³	Клас емісії залежить від типу смоли
Стійкість до стирання, атмосферного впливу	Низька	Плити не призначені для тривалого вуличного використання

Екологічні аспекти складу

Формальдегід, що входить до складу зв'язуючих смол, є канцерогеном 1 групи (за класифікацією ВООЗ). У процесі експлуатації або зберігання старих ДСП можлива вторинна емісія газоподібного формальдегіду в повітря. При спалюванні відходів без належної температури відбувається утворення токсичних продуктів-формаліну, фенолу, оксидів азоту.

1.3. Класифікація відходів ДСП за рівнем забрудненості

Для ефективного поводження з відходами деревинностружкових плит (ДСП) важливо їх попередньо класифікувати за ступенем забруднення та потенційної небезпеки. Це дозволяє визначити подальший шлях утилізації або рециклінгу: повторне використання, подрібнення для виготовлення нових плит, спалювання з рекуперацією тепла чи захороння.

Загалом, відходи ДСП можна умовно розділити на чотири основні категорії:

Таблиця 3. Класифікаційні групи відходів ДСП

Категорія	Походження	Опис	Приклади	Рівень забрудненості
1. Нові (чисті)	Виробничі обрізки, залишки розкрою	Мають первинну якість, не містять домішок, часто без покриття	Обрізки з фабрик, зразки плит	Низький
2. Ламіновані	Оздоблені поверхні (ламініат, ПВХ, фольга)	Покриті декором, складніші для переробки через багат шарову структуру	Деталі меблів, двері, полиці	Середній–високий
3. Експлуатовані	Списана продукція з побуту чи офісів	Можуть мати забруднення, механічні пошкодження, зношення	Старі меблі, шафи, столи	Високий
4. Забруднені /комбіновані	Плити з домішками, покриттям, фурнітурою	Містять сторонні матеріали: метал, скло, пластик, клей, текстиль	Вітрини, офісні перегородки, монтажні елементи	Дуже високий

Характеристика груп забрудненості

Нові (чисті) відходи - найпридатніші для повторного використання або гранулювання. Можуть без додаткової підготовки використовуватись для виробництва нових плит.

Ламіновані відходи складніші в переробці. Покриття часто створює труднощі при подрібненні, бо воно знижує однорідність фракції. та вимагають попереднього зняття декоративного шару або подрібнення з подальшим відсівом.

Експлуатовані відходи мають ризик біологічного забруднення (пліснява, грибок), побутових домішок. Емітуючи формальдегід, вони підлягають або ізоляції, або безпечному спалюванню при високих температурах.

Забруднені (комбіновані) відходи - найпроблемніші. Вони часто містять елементи металевої фурнітури, клейових з'єднань, пластиків, текстилю.

Для рециклінгу потребують складної лінії попереднього сортування та сепарації.

Висновки щодо класифікації

Класифікація за рівнем забруднення - ключовий етап перед будь-якою спробою переробки чи утилізації. Найперспективнішими з точки зору рециклінгу є чисті виробничі залишки. Експлуатовані та комбіновані відходи потребують додаткових витрат на обробку, а іноді-технічної неможливості повторного використання.

1.4. Екологічна небезпека несортованих і неконтрольованих відходів

Несортовані та неконтрольовані відходи деревинностружкових плит (ДСП) становлять серйозну загрозу для довкілля та здоров'я людини.

Причина полягає у складі матеріалу, особливо у вмісті синтетичних смол і домішок, які не розкладаються природним чином, а в процесі деградації або спалювання виділяють шкідливі речовини (рис. 2).



Рис. 2

Особливу небезпеку створює токсичність викидів при неконтрольованому спалюванні. Сечовиноформальдегідні смоли, які використовуються як зв'язуюче у ДСП, містять формальдегід-токсичну, канцерогенну речовину. Під час згоряння плит у побутових умовах або на нелегальних звалищах вивільняється формальдегід, фенол, оксиди азоту, діоксини. Ці речовини потрапляють в атмосферу, створюючи ризики для органів дихання, нервової системи, та спричиняючи алергії.

Формальдегід входить до списку канцерогенів групи 1 за класифікацією ВООЗ.

Забруднення ґрунтів і водного середовища при захороненні плит у загальних звалищах або в несанкціонованих місцях призводить до вимивання смол і домішок під дією опадів. В результаті забруднюються ґрунтові води, що може призвести до порушення балансу водних екосистем і потрапляння токсинів у джерела питної води.

Біологічна стійкість та об'ємне навантаження на полігони - ще один негативний наслідок від відходів ДСП, оскільки відходи ДСП мають дуже низьку біодеградацію, тобто зберігаються в середовищі десятиліттями. Тому займають значний об'єм на полігонах через тверду структуру, що ускладнює компактування, створюють тривале навантаження на полігони, зменшуючи їхній строк експлуатації.

Побутова небезпека при повторному використанні пов'язана з тим, що іноді старі плити використовуються вдруге (наприклад, на дачах, складах, в господарстві) без належної обробки. Це також несе загрозу, бо плити можуть продовжувати випаровувати формальдегід навіть через роки після виготовлення. Особливо небезпечні вони в погано вентильованих приміщеннях або поблизу джерел тепла.

1.5. Висновки до розділу 1

У результаті аналізу особливостей утворення, складу та класифікації відходів деревинностружкових плит (ДСП), можна зробити наступні висновки:

1. Основні джерела утворення відходів ДСП-це виробничі залишки (обрізки, брак), а також побутові та комерційні відходи, пов'язані з експлуатацією меблів, конструкцій і оздоблювальних матеріалів на основі ДСП. Найбільше відходів

утворюється на етапах меблевого виробництва та після завершення життєвого циклу продукції.

2. Хімічний склад відходів ДСП характеризується вмістом деревних частинок, синтетичних смол (здебільшого сечовиноформальдегідних), а також домішками у вигляді покриттів, лакофарбових матеріалів і фурнітури. Це створює певні технологічні труднощі при утилізації та рециклінгу таких відходів.
3. Фізико-механічні характеристики відходів, такі як щільність, вологість, міцність на вигин, мають значення для визначення доцільності та методу повторного використання. Найбільш придатними до рециклінгу є нові (виробничі) залишки плит.
4. Класифікація відходів ДСП за ступенем забруднення дозволяє раціонально підійти до вибору способу їх подальшої утилізації. Відходи поділяються на нові (чисті), ламіновані, експлуатовані та комбіновані. Чим вищий рівень забруднення, тим складніша і дорожча переробка.
5. Несортовані та неконтрольовані відходи ДСП є джерелом екологічної небезпеки: при спалюванні вони виділяють токсичні сполуки, при захороненні-забруднюють ґрунти та воду. Крім того, низька біодеградація таких відходів створює додаткове навантаження на полігони.
6. Таким чином, ефективне управління потоком відходів ДСП потребує впровадження системи сортування, оцінки їхнього складу і ступеня забрудненості, а також вибору оптимальної стратегії утилізації або рециклінгу, що дозволить зменшити їхній негативний вплив на довкілля.

Розділ 2. Існуючі технології рециклінгу ДСП та їх ефективність

2.1. Механічне подрібнення і повторне використання стружки

Одним з основних і найпоширеніших напрямів рециклінгу відходів деревинностружкових плит (ДСП) є механічне подрібнення, яке передбачає перетворення старих плит у деревну стружку, придатну для повторного використання у виробництві нових плит або як сировину для інших деревовмісних матеріалів.

Суть процесу є в наступному. Механічне подрібнення полягає у подрібненні плит на частинки за допомогою дробарок, шредерів або молоткових млинів. У результаті отримується фракція, наближена до структури первинної стружки, яку можна частково або повністю використовувати як заміник чистої деревини.

Загальна схема процесу включає такі етапи:

1. Попереднє сортування плит (відокремлення покриттів, фурнітури, металу).
2. Подрібнення до потрібної фракції.
3. Сушіння та очищення отриманої стружки.
4. Додавання до основної сировини при виробництві нових плит.

Переваги методу - це зменшення обсягів відходів, що потрапляють на полігони; збереження деревини та зниження потреби у первинній сировині; відносно проста технологія, придатна для впровадження на багатьох підприємствах.

Обмеження і виклики даного методу все ж існують. Стружка з відпрацьованих плит має знижену міцність і якість через залишки смол і забруднювачів. Також можлива висока концентрація формальдегіду, що ускладнює подальше використання у побутових плитах.

Необхідність ретельного сортування і фільтрації матеріалу перед використанням, особливо при переробці ламінованих плит створює додаткові технологічні складнощі.

Типове застосування такі матеріали знайшли у виробництві ДСП технічного або конструкційного призначення (не для внутрішнього оздоблення) шляхом додавання подрібненої стружки до OSB-плит або арболіту чи створення пелет або брикетів-за умови додаткової очистки від смол.

Механічний рециклінг-ефективне рішення для первинної утилізації відходів ДСП, однак його доцільно поєднувати з іншими методами для досягнення високої якості кінцевого продукту та екологічної безпеки.

2.2. Термічна утилізація з рекуперацією тепла: переваги і недоліки

Термічна утилізація відходів деревинностружкових плит (ДСП) - один з найпоширеніших методів зменшення їхнього об'єму. В умовах, коли механічний рециклінг не є економічно доцільним або технічно можливим, спалювання з рекуперацією тепла дозволяє перетворити енергетичний потенціал матеріалу на тепло або електроенергію.

Суть процесу - відходи ДСП спалюються у спеціалізованих печах або котлах з тепловою утилізацією: теплова енергія, що вивільняється, використовується для обігріву, гарячого водопостачання чи виробництва пари. У сучасних установках передбачено очистку димових газів для зменшення шкідливих викидів.

Переваги термічної утилізації в значному зменшенні обсягів відходів-до 90% маси знищується в процесі згоряння. Отримання додаткової енергії - ще одна перевага, оскільки тепло можна використовувати безпосередньо на

підприємстві. Плюсом в користь методу є порівняно низькі витрати на зберігання та транспортування, якщо утилізація здійснюється на місці.

Можливість утилізації відходів будь-якого ступеня забруднення, включаючи ламіновані, з фурнітурою тощо.

Недоліки та ризики вбачаємо у виділенні токсичних речовин: при згорянні смол (утворюються формальдегід, феноли, діоксини), що потребує обов'язкової системи фільтрації (циклонів, скрубєрів, електрофільтрів).

Також виникає потреба в значних капіталовкладеннях для створення безпечної інфраструктури. Неєкологічність при використанні застарілих котлів або в умовах порушення режиму горіння та попіл і шлаки після спалювання потребують додаткової утилізації як промислових відходів.

Відомо багато прикладів теплової утилізації в меблевій промисловості попри певні застереження. Багато меблевих фабрик у Європі (зокрема в Німеччині та Польщі) використовують замкнуті системи теплопостачання, в яких паливом виступають власні відходи ДСП. Це дозволяє суттєво зменшити витрати на енергоносії, водночас контролюючи емісії.

Таблиця 5 Порівняння ефективності механічного рециклінгу та термічної утилізації ДСП

Параметр	Термічна утилізація з рекуперацією	Механічний рециклінг
Обсяг утилізації	Високий	Середній
Вимоги до сортування	Мінімальні	Високі
Екологічні ризики	Високі без фільтрації	Помірні
Отримання вторинного продукту	Теплова енергія	Стружка для виробництва
Капіталовкладення	Високі	Середні

Термічна утилізація з рекуперацією тепла-**ефективне енергетичне рішення**, яке може бути екологічно безпечним лише за умов **сучасного технічного оснащення і суворого контролю за викидами**.

2.3. Хімічна регенерація смол та детоксикація залишків

Одним із перспективних напрямів рециклінгу відходів деревинностружкових плит (ДСП) є хімічна переробка, яка дозволяє не просто утилізувати матеріал, а й відновити цінні компоненти, зокрема синтетичні смоли, та знешкодити токсичні залишки.

Хімічна регенерація передбачає руйнування полімерної матриці ДСП спеціальними реагентами (лужними або кислотними розчинами, органічними розчинниками). У результаті хімічних реакцій смоли розкладаються на простіші сполуки, які можна використовувати повторно; деревна складова

частково відновлюється для подальшого застосування (наприклад, у виробництві технічної стружки); зменшується вміст шкідливих речовин у відходах.

Основні методи хімічної регенерації - гідроліз, сольволіз та каталітичне руйнування.

Гідроліз - обробка відходів гарячими кислотами або лугами для розщеплення полімерних зв'язків.

Сольволіз - застосування органічних розчинників для селективного розчинення смол.

Каталітичне руйнування: використання каталізаторів для прискорення розкладу формальдегіду та інших токсичних компонентів.

Переваги методу в можливості повторного використання компонентів, що знижує витрати на сировину; зменшенні токсичності відходів, що спрощує їх подальшу утилізацію або захоронення. Хімічна регенерація - це відкриття шляхів для створення нових матеріалів на основі регенерованих смол.

Недоліки та виклики

- Висока енергетична вартість процесу (необхідність підігріву, використання хімічних реагентів).
- Проблеми поводження із залишковими хімікатами після процесу регенерації.
- Необхідність точного контролю параметрів реакції для забезпечення безпеки та ефективності.

Схематичне зображення процесу подамо наступним чином:

Відходи ДСП → Подрібнення → Хімічна обробка → Відновлення смол та деревних частинок → Детоксикація залишків

Таблиця 6. Порівняння основних методів хімічної переробки

Метод	Реагенти	Температура, °C	Основний результат
Гідроліз	Луги, кислоти	100–150	Розщеплення смол, очищення деревини
Сольволіз	Органічні розчинники	80–120	Відділення смол
Каталітичне руйнування	Каталізатори	150–200	Детоксикація токсичних залишків

Хімічна регенерація-це технологічно складний, але екологічно перспективний метод роботи з відходами ДСП, який дозволяє не лише зменшити вплив на довкілля, а й повернути цінні ресурси у виробничий цикл.

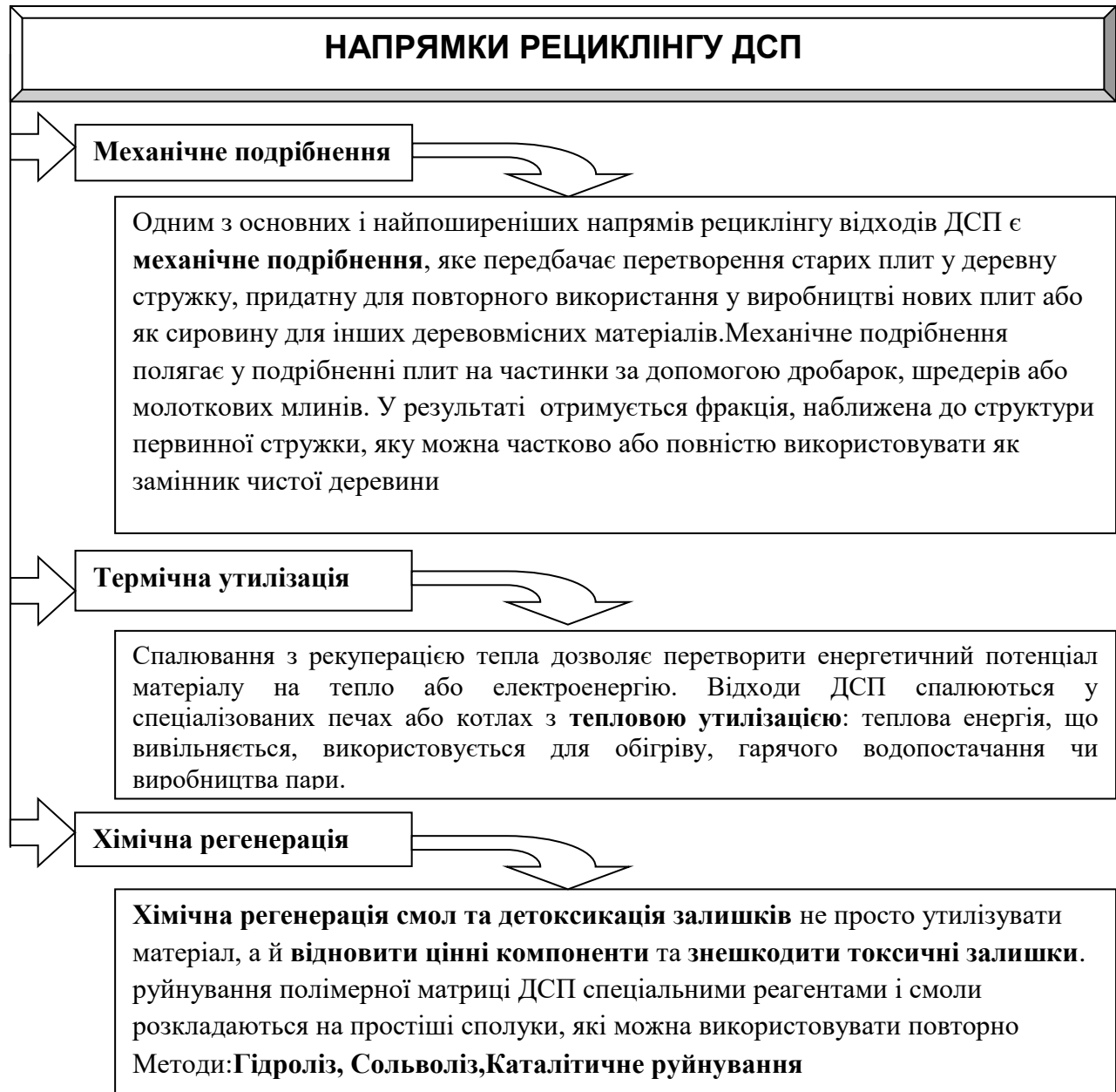


Рисунок 3

2.4. Порівняльна характеристика технологій за критеріями: вартість, енергоспоживання, рівень шкідливих викидів

Для прийняття інженерно обґрунтованих рішень щодо впровадження технології рециклінгу відходів деревинностружкових плит (ДСП) необхідно здійснити порівняльну оцінку найбільш поширених підходів за низкою ключових критеріїв: економічна доцільність, енергоефективність та екологічна безпека.

Критеріями оцінювання виступають; вартість впровадження (враховує вартість обладнання, утримання, хімікатів, робіт); енергоспоживання (показує кількість енергії, необхідної на одиницю оброблених відходів); рівень шкідливих викидів-(оцінює токсичність відходів після обробки та ризику для довкілля).

Таблиця 7. Порівняльна досліджуваних технологій рециклінгу ДСП

Технологія	Вартість впровадження	Енергоспоживання	Рівень шкідливих викидів
Механічне подрібнення	Низька	Низьке	Низький
Термічна утилізація	Висока	Високе	Високий (без фільтрації)
Хімічна регенерація смол	Висока	Середнє–високе	Низький (при правильній утилізації реагентів)

Аналіз:

- **Механічне подрібнення**-найбільш дешевий та енергоефективний варіант, однак потребує **ретельного сортування** та підходить переважно для **чистих відходів**.
- **Термічна утилізація** дозволяє швидко утилізувати великі обсяги різномірних матеріалів, але без належної очистки спричиняє значні **екологічні ризики**.
- **Хімічна регенерація** є найскладнішою в реалізації, однак вона **забезпечує найглибший рівень очистки** та відкриває можливість **вторинного використання цінних компонентів**.

Висновок: жодна з технологій не є універсальною. Оптимальне рішення полягає у комбінуванні кількох методів з урахуванням специфіки відходів, технічних можливостей підприємства та екологічних вимог регіону.

2.5. Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено аналіз основних технологій рециклінгу відходів деревинностружкових плит (ДСП), їх переваг, недоліків та ефективності з точки зору інженерних і екологічних критеріїв.

Механічне подрібнення є найпростішим та найдоступнішим методом, який забезпечує мінімальні витрати та низький рівень забруднення, але вимагає ретельного сортування матеріалів і не вирішує проблему токсичних речовин, пов'язаних із формальдегідними смолами.

Термічна утилізація з рекуперацією тепла дозволяє ефективно знешкоджувати значні обсяги змішаних відходів та отримувати корисну енергію. Водночас вона потребує значних інвестицій в обладнання та системи газоочистки для зниження рівня шкідливих викидів.

Хімічна регенерація смол і детоксикація залишків є найбільш високотехнологічним підходом, який забезпечує глибоку переробку та

відновлення цінних компонентів, проте потребує складного технологічного контролю та супутньої утилізації хімічних реагентів.

Проведена порівняльна характеристика цих методів показала, що жодна з технологій не є універсальною. Вибір оптимального рішення має базуватись на поєднанні кількох критеріїв: типу відходів, масштабів виробництва, наявного обладнання, екологічних вимог та економічних можливостей підприємства.

Таким чином, раціональний підхід до рециклінгу відходів ДСП передбачає комбінування технологій з метою досягнення максимального ефекту утилізації при мінімальному впливі на довкілля.

Розділ 3. Розробка та обґрунтування технологічної схеми рециклінгу ДСП

3.1. Вибір оптимального методу утилізації для підприємства

На основі аналізу існуючих технологій переробки деревинностружкових плит (ДСП) доцільним є вибір такої схеми рециклінгу, яка поєднує ефективність, економічну доцільність і екологічну безпеку.

Для умов середнього або великого підприємства, яке працює з ДСП (наприклад, з виробництвом меблів чи будівельних матеріалів), оптимальним методом є механічне подрібнення з подальшим повторним використанням стружки у виробництві нових плит або допоміжної продукції.

Обґрунтування вибору базується на економічних факторах, таких як механічне подрібнення потребує відносно невеликих інвестицій у обладнання (подрібнювачі, сепаратори) і дозволяє швидко отримувати придатну вторинну сировину.

Технологічні можливості також в користь даної технології, адже отриману стружку можна використовувати як часткову заміну нової деревної стружки при виробництві ДСП, що дозволяє економити на закупівлі первинної сировини.

Екологічний аспект полягає у повторному використанні стружки, що мінімізує кількість відходів, що потрапляють на полігони, та знижує потребу в спалюванні, що суттєво зменшує обсяги шкідливих викидів в атмосферу.

Якість продукції при правильному сортуванні та очищенні подрібненої стружки (видалення ламінованих поверхонь, лакофарбових покриттів) також можна досягти достатнього рівня для виробництва не лише чорнових плит, а й елементів конструктивного призначення.

Для ефективної реалізації даної технології на підприємстві необхідно врахувати кілька умов:

1. Сортування відходів: окреме збирання чистих плит та плит із покриттями.
2. Первинне очищення: видалення сторонніх домішок (металевих включень, кріплень).
3. Контроль за якістю вторинної стружки: вміст клеючих залишків не повинен перевищувати допустимі норми, встановлені для нової продукції.

Схема загального технологічного процесу рециклінгу ДСП виглядає наступним чином:

Збір відходів → Сортування → Подрібнення → Очищення → Подача у виробничий процес

Отже, вибір технології механічного подрібнення і повторного використання стружки є найбільш збалансованим рішенням для підприємства, яке прагне оптимізувати витрати та мінімізувати негативний вплив на довкілля.

3.2. Опис технологічної схеми переробки

Розробка технологічної схеми переробки відходів деревинностружкових плит (ДСП) передбачає створення ефективної та економічно доцільної послідовності операцій для отримання якісної вторинної сировини.

Запропонована схема має бути максимально **автоматизованою**, забезпечувати **мінімальні втрати матеріалу** та **низький рівень шкідливих викидів**.

Етапи технологічного процесу

1. Збір і первинне сортування відходів

- Розділення плит за типами: чисті, ламіновані, забруднені.
- Відокремлення сторонніх матеріалів (метал, пластик).

2. Попереднє подрібнення

➤ Використання грубого подрібнювача для отримання фрагментів розміром 30–50 мм.

3. Магнітна сепарація

➤ Видалення металевих домішок за допомогою магнітних барабанів або стрічкових сепараторів.

4. Тонке подрібнення

➤ Дробарки чи молоткові млини з отриманням стружки фракції 1–3 мм, придатної для повторного використання.

5. Фракціонування

- Сортування стружки за розмірами за допомогою вібраційних сит:
 - Надто велика фракція повертається на повторне подрібнення.
 - Стандартна фракція-на виробництво.

6. Очищення і знепилювання

➤ Пневматичні системи очищення для зменшення кількості пилу і дрібнодисперсних частинок.

7. Складування готової вторинної сировини

➤ Стружка зберігається в окремих бункерах до моменту використання у виробництві нових плит.

Графічне зображення технологічної схеми (рис. 6)

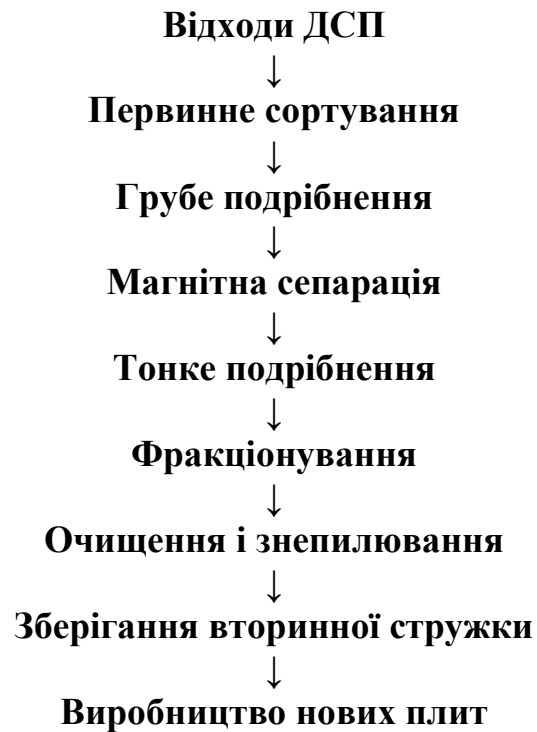


Рис.6

Переваги запропонованої схеми:

Економічність: мінімізація витрат на сировину шляхом повторного використання відходів.

Якість: отримання контрольованої за розміром та складом стружки.

Масштабованість: можливість адаптації процесу для різних обсягів переробки.

Екологічність: значне скорочення кількості відходів, які вивозяться на полігони та технологічні можливості нейтралізації формальдегіду як в повітрі, так і в стічних водах.

Очищення повітря та стічних вод від формальдегіду

Такий комбінований процес дозволяє організацію масштабного виробничого процесу, для якого стають доступними складні та продуктивні системи очищення від формальдегіду як повітря, так і води. Адже, очищення повітря або стічних вод від формальдегіду (НСНО) - це складний процес, який залежить від фази забруднення (газ чи рідина), концентрації, умов виробництва й вимог до очищення. Формальдегід - летка, токсична речовина, поширена особливо при виробництві ДСП

Основні методи очищення від формальдегіду зведені в таблицю 8-9)

Таблиця 8. Газова фаза (очищення повітря):

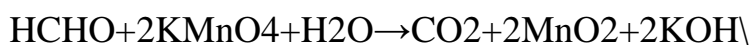
Метод	Принцип
Абсорбція	Розчинення НСНО у воді або лужному розчині
Адсорбція	Захоплення НСНО активованим вугіллям, цеолітом
Каталітичне окиснення	Перетворення НСНО на CO_2 і H_2O при 200–400°C
Фотокаталітичне окиснення	Під дією UV та TiO_2
Біофільтри / біоскрубер	Біологічне розкладання НСНО мікроорганізмами

Таблиця 9. Рідка фаза (стічні води):

Метод	Принцип
Окиснення (хім.)	Використання KMnO_4 , NaClO , H_2O_2
Біологічне очищення	Розклад ферментами або мікроорганізмами
Адсорбція (гранули)	Активоване вугілля або синтетичні смоли
Перманганатна оксидація	$\text{KMnO}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{MnO}_2$

Методика хімічного окиснення формальдегіду в стоках

Реакція:



Вхідні дані для прикладу:

Об'єм стічної води: 2 м³/год

Концентрація формальдегіду: 40 мг/л

Допустима після очищення: < 1 мг/л

Окисник: перманганат калію (KMnO_4)

Надлишок окисника: 20%

Крок 1: Розрахунок маси НСНО , що підлягає видаленню

$$M_{\text{НСНО}} = 2 \text{ м}^3/\text{год} \cdot 1000 \text{ л}/\text{м}^3 \cdot (40 - 1) \text{ мг}/\text{л} = 78,000 \text{ мг} = 78 \text{ г}/\text{год}$$

Крок 2: Розрахунок теоретичної кількості KMnO_4

Молярна маса $\text{НСНО} \approx 30 \text{ г}/\text{моль}$

Молярна маса $\text{KMnO}_4 \approx 158 \text{ г}/\text{моль}$

Стехіометрія: 1 моль $\text{НСНО} \rightarrow 2 \text{ моль } \text{KMnO}_4$

$$n_{\text{НСНО}} = 78/30 = 2.6 \text{ моль}$$

$$n\text{KMnO}_4=2.6 \cdot 2=5.2 \text{ моль} \Rightarrow m\text{KMnO}_4=5.2 \cdot 158=821.6 \text{ г}$$

З урахуванням надлишку 20%:

$$m\text{KMnO}_4\text{реальне}=821.6 \cdot 1.2 \approx 986 \text{ г/год}$$

Крок 3: Підбір обладнання

Реактор-окиснювач, час контакту – 20–30 хв

Мішалка / дозатор KMnO_4

Відстійник – для осаду MnO_2

3. Приклад біофільтру для повітря

Вхідні дані:

Концентрація НСНО : 2 мг/м³

Витрата повітря: 3000 м³/год

Біофільтр (торф/деревне вугілля), ефективність 90%

Маса НСНО :

$$M=3000 \cdot 2=6000 \text{ мг/год}=6 \text{ г/год}$$

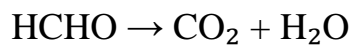
Потрібний об'єм фільтруючого шару (емпірично):

$$V=Q / v_{\text{специф}}=3000 / 100=30 \text{ м}^3$$

(при питомому навантаженні 100 м³/м³·год)

4. Альтернатива – фотокаталітичне очищення

УФ-лампа + поверхня з TiO_2



Працює при кімнатній температурі

Використовується в приміщеннях з невеликим навантаженням

Таблиця 10. Результати розрахунку

Метод	Переваги	Недоліки
Хімічне окиснення	Ефективно для стоків	Утворення осаду, витрати на реагенти
Біофільтр/біореактор	Екологічно чисто	Чутливість до умов
Фотокаталітичне очищення	Безпечно, без реагентів	Повільне, низька продуктивність
Каталітичне окиснення	Висока ефективність при високих Т	Вартість, нагрівання

3.3 Розрахунок екологічної ефективності

(зниження обсягів сміття, викидів формальдегіду)

Впровадження системи рециклінгу деревинностружкових плит (ДСП) дозволяє суттєво скоротити негативний вплив підприємства на довкілля за рахунок:

- Зменшення кількості відходів, що захоронюються на полігонах.
- Зниження обсягів шкідливих викидів, зокрема формальдегіду.

Проведемо попередній розрахунок екологічної ефективності на прикладі умовного підприємства.

Вхідні дані для розрахунку

- ✓ Загальна кількість відходів ДСП за рік: 500 тонн.
- ✓ Частка відходів, придатних для повторного використання після подрібнення: 80%.
- ✓ Вміст залишкового формальдегіду у відходах: до 0,1% маси.

- Формальдегід, що вивільняється при захороненні або термічній утилізації: **70% від наявного у матеріалі.**

Розрахунок зменшення кількості відходів

Кількість відходів, що підлягають рециклінгу:

$$500 \times 80 = 400 \text{ тонн}$$

Кількість відходів, що потребують утилізації або захоронення:

$$500 - 400 = 100 \text{ тонн}$$

Таким чином, обсяг відходів, що вивозяться на полігони, знижується на:

$$400 / 500 \times 100 = 80 \%$$

Висновок: Рециклінг дозволяє зменшити обсяги захоронення відходів на 80%.

Розрахунок зменшення викидів формальдегіду

Кількість формальдегіду у всіх відходах:

$$500 \text{ тонн} \times 0,1\% = 0,5 \text{ тонн} = 500 \text{ кг}$$

Кількість формальдегіду, що могла би вивільнитись при спалюванні або захороненні:

$$500 \text{ кг} \times 70\% = 350 \text{ кг}$$

Оскільки 80% відходів буде перероблено без спалювання чи захоронення, пропорційно скоротиться і кількість викидів:

Фактичне зниження викидів формальдегіду:

$$350 \text{ кг} \times 80\% = 280 \text{ кг}$$

Залишкові викиди від 100 тонн неперероблених відходів:

$$100 \text{ тонн} \times 0,1\% \times 70\% = 70 \text{ кг}$$

Таблиця 11. Підсумкові результати

Показник	Значення
Початковий обсяг відходів	500 тонн
Перероблені відходи	400 тонн
Зниження обсягу сміття	80%
Початкові можливі викиди формальдегіду	350 кг
Зменшення викидів формальдегіду	280 кг (80%)
Залишкові викиди	70 кг

Розрахунок абсорбційних установок для очищення атмосфери від формальдегіду

Очищення атмосферного повітря від газових викидів методом абсорбції в інженерній практиці часто називають скрубєрними процесом. Абсорбційний метод очищення повітря від газових забруднень полягає в розділенні газоповітряної суміші на складові частини шляхом поглинання одного або декількох газових компонентів (абсорбатів) цієї суміші рідким поглиначем (абсорбентом) з утворенням розчину.

Рушійною силою тут є градієнт концентрації на межі фаз „газ-рідина”. Розчинений у рідині абсорбат завдяки дифузії проникає у внутрішні шари абсорбента. Процес протікає швидше тоді, коли збільшуються поверхня розділення фаз, турбулентність потоків і дифузія.

Для вилучення із технологічних викидів таких газів як аміак, хлористий або фтористий водень, доцільно в якості поглинальної рідини (поглинача) застосовувати воду, оскільки розчинність їх у воді складає сотні грамів на 1 кг H_2O . В окремих випадках, замість води застосовують водні розчини сірчистої кислоти, в'язкі масла та ін.

Контакт газового потоку з рідким розчинником (поглиначем) може створюватися трьома способами:

- 1) пропусканням газу через насадкову колонку (башту),
- 2) розпиленням рідини;
- 3) барботажем газу через шар абсорбуючої рідини.

Залежно від прийнятого способу контакту фаз „газ – рідина” розглядають: насадкові абсорбери; форсункові, відцентрові, барботажно-пінні та тарільчасті скрубери, а також скрубери Вентурі.

На рис. 8 наведена схема протитічного насадкового абсорбера.

Принцип роботи протитічного насадкового абсорбера (рис.1) полягає в наступному. Забруднене шкідливим газом повітря входить у нижню частину 1 абсорбера, а очищене повітря виходить через верхню частину 3 установки, куди за допомогою одного або декількох розбризкувачів 4 вводять чистий поглинач. Відбувається змішування поглинача (води або іншої рідкої речовини) із забруднювачем (газом).

Поглиналина рідина (вода), яка розчинила газ, виводиться через нижню частину 7 абсорбера за межі установки. Забруднена газом рідина (вода), що покидає абсорбер, піддається регенерації, десорбуючи забруднювальну

речовину, знову повертається в процес очищення, або виводиться як побічний продукт (відходи). Хімічно інертна насадка, яка знаходиться в рідині 5, заповнює внутрішню частину абсорбера, і призначається для збільшення поверхні контакту з газоповітряною сумішшю.

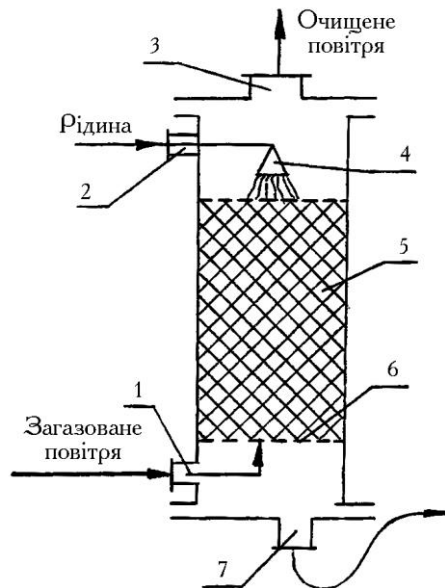


Рис.8. Схема протитічного насадкового абсорбера: 1 – вхідний патрубок для подачі загазованого повітря; 2 – вхідний патрубок для подачі рідини; 3 – вихідний патрубок для відведення чистого повітря; 4 – розбризкувач; 5 – шар рідини з насадкою; 6 – сітка; 7 – вихідний патрубок для відведення забрудненої води

В якості насадки використовують тіла різної геометричної форми. Типові форми насадок наведені на рис. 9.

Матеріали для виготовлення насадок (кераміка, фарфор, пластмаси, метали) вибирають виходячи із міркувань антикорозійної стійкості.

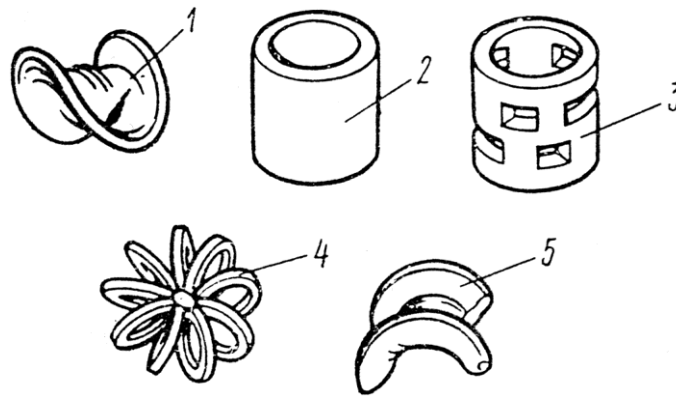


Рис. 9. Типові форми стандартних насадок для абсорберів: 1 – сідло Берля; 2 – кільце Рашинга; 3 – кільце Паля; 4 – розетка Теллера

Для створення більш ефективних конструкцій абсорбційних установок і підвищення категорії якості очистки атмосферного повітря важливим є розрахунок режимних і конструктивних параметрів абсорберів.

Розрахунок абсорбційної установки зводиться до визначення: об’ємної витрати поглинальної рідини (поглинача); необхідної поверхні контакту газоповітряної суміші з поглинальною рідиною; параметрів допоміжної апаратури (потужності насосів, розміри баків).

Об’ємну витрату поглинальної рідини (поглинача) Q_{Π} визначають із рівняння матеріального балансу процесу абсорбції – маса поглинального газу m , який вилучений із газоповітряної суміші, повинна біти рівною масі усього компонента, що перейшла в поглинальну рідину [8]:

$$m = Q_{гпс} (C_1 - C_2) = Q_{\Pi} (C'_2 - C'_1), \quad (1)$$

$$\text{звідки } Q_{\Pi} = \frac{Q_{гпс} (C_1 - C_2)}{C'_2 - C'_1}, \quad (2)$$

де $Q_{ГПС}$ – об’ємна витрата газоповітряної суміші, що підлягає очищенню, м³/с; C_2, C_1 – початкова й кінцева концентрації газу в очищуваній газоповітряній суміші, г/м³; C'_1, C'_2 – початкова й кінцева концентрації газу й поглинальної рідини (поглинача), г/м³.

Необхідну площу поверхні контакту газоповітряної суміші з поглинальною рідиною (поглиначем) визначають за формулою [8]:

$$S_k = \frac{10^3 \cdot Q_{\Pi}}{k_{аб} \cdot \Delta P_{сер}}, \quad (3)$$

де $k_{аб}$ – коефіцієнт абсорбції, кг/(м²годПа); $\Delta P_{сер}$ – середня рушійна сила абсорбції, Па.

Коефіцієнт абсорбції характеризує швидкість розчинення газового компонента в поглинальній рідині, й визначається загальним опором дифузії цього компонента в поглинальній рідині, й визначається загальним опором дифузії цього компонента через газово-рідинну плівку. Для добре розчинних газів коефіцієнт абсорбції визначають за формулою:

$$k_{аб} = \frac{53,7 \cdot 10^6 \cdot M \cdot \omega_{zn}^{0,75} (0,0011T - 0,18)^{0,25}}{(13,7 + \sqrt{\omega}) d_{екв}^{0,25}}, \quad (4)$$

де M – молярна маса поглинаючого газу, кг; ω_{zn} – швидкість газоповітряного потоку у вільному перерізі скрубера, м/с; T – абсолютна температура газоповітряної суміші, °К; $d_{екв}$ – еквівалентний діаметр насадки, що визначається з виразу:

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot S'_{зс.н}}{S'_n}, \quad (5)$$

$S_{ж.н}$ – площа живого перетину насадки, м²; S_n' – питома поверхня, м².

Середню рушійну силу абсорбції визначають за формулою [8]:

$$\Delta P_{сер} = \frac{(P'_Г - P''_Г) - (P'_p - P''_p)}{\ln[(P'_Г - P'_p)/(P''_Г - P''_p)]}, \quad (6)$$

де $P'_Г$ і $P''_Г$ – відповідно парціальні тиски поглинального компонента (поглинача) в газовій фазі на вході та виході з апарата; P'_p і P''_p – відповідно парціальні зрівноважені тиски поглинального компонента над рідиною на вході та виході з апарата.

Принагідно при цьому зауважити, що під час протитічного процесу абсорбції значення $\Delta P_{сер}$ значно зростає порівняно з прямотічним. Це говорить про те, що протитічний процес є більш вигідний, оскільки для абсорбції можуть застосовуватися апарати менших розмірів.

Розрахунок потужності електродвигуна насосу, що подає газоповітряну суміш і абсорбер, зводиться до визначення потужності електродвигуна за формулою [4]:

$$N_{ел} = \frac{K' \frac{n}{n-1} \cdot P_1 V \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{1000 \eta_m}, \text{ кВт}, \quad (7)$$

де K' – коефіцієнт запасу потужності електродвигуна (приймають $K' = 1,1$); n – показник політропи (для поршневих насосів приймають 1,2..1,25). V – об'єм повітря, що нагнітається насосом, м³/с; P_1, P_2 – початковий і кінцевий

тиск у насосі, Па; η_m – коефіцієнт використання електродвигуна насоса (приймають 0,85...0,92).

2 Порядок розрахунку абсорбційної установки.

1) За формулою (2) визначають об'ємну витрату поглинальної рідини (поглинача);

2) За формулою (6) визначають середню рушійну силу абсорбції;

3) За формулою (5) визначають еквівалентний діаметр насадки;

4) За формулою (4) визначають коефіцієнт абсорбції;

5) За формулою (3) визначають площу контакту газоповітряної суміші з поглинальною рідиною;

6) За формулою (7) визначають потужність електродвигуна насосу

Розраховуємо режимні та конструктивні параметри абсорбційної установки для вловлювання формальдегіду, зокрема, визначаємо:

- ✓ об'ємну витрату поглинача;
- ✓ необхідну площу контакту формальдегідовмісної суміші з поглинальною рідиною (поглиначем);
- ✓ потужність насосів абсорбера.

Вихідні дані для розрахунку:

- ✓ забруднювальний газ – формальдегід;
- ✓ ГДК формальдегіду в атмосфері населених пунктів – 0,02 мг/м³;
- ✓ ГДК формальдегіду в повітрі робочої зони – 0,05 мг/м³;
- ✓ об'ємна витрата газоповітряної суміші – 50 м³/с;
- ✓ початкова концентрація формальдегіду в газоповітряній суміші – 0,8 г/м³;
- ✓ кінцева концентрація формальдегіду в очищуваному повітрі – 0,2 г/м³;

- ✓ початкова концентрація формальдегіду в поглинутій рідині – 6,0 г/м³;
- ✓ кінцева концентрація формальдегіду 9,0 г/м³;
- ✓ швидкість газоповітряної суміші, що подається в абсорбер – 16 м/с;
- ✓ площа живого перерізу насадки – 0,9 м²;
- ✓ питома поверхня насадки – 1,5 м²;
- ✓ температура повітря за межами абсорбера 14 °С;
- ✓ парціальні тиски відповідно поглинальної рідини в газовій фазі на вході $P'_r = 1900$ Па, на виході $P''_r = 1300$ Па;
- ✓ парціальні зрівноважені тиски поглинального газу над рідиною на вході $P'_p = 1100$ Па і виході з апарата $P''_p = 1200$ Па.

Розв'язок

1) За формулою (2) визначаємо об'ємну витрату поглинальної рідини (поглинач):

$$Q_{II} = \frac{50 \cdot (0.8 - 0.2)}{9 - 6} = 100 \text{ м}^3/\text{с};$$

2) За формулою (6) визначаємо середню рушійну силу абсорбції:

$$\Delta P_{сер} = \frac{(1900 - 1300) - (1300 - 900)}{\ln[(1900 - 110)/(1300 - 900)]} = 50, \text{ Па};$$

3) За формулою (5) визначаємо еквівалентний діаметр насадки:

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot 0,9}{1,5} = 2,4, \text{ м};$$

4) За формулою (4) визначаємо коефіцієнт абсорбції. для цього з довідкової літератури знаходимо молярну масу ксилолу – 106,17 г (або 0,10617 кг).

Абсолютна температура газоповітряної суміші становить:

$$T = t + 273 = 14 + 273 = 287, \text{ } ^\circ\text{K};$$

Отже величина коефіцієнта абсорбції становить:

$$k_{аб} = \frac{53,7 \cdot 10^6 \cdot 0,10617 \cdot 16^{0,75} (0,0011 \cdot 287 - 0,18)^{0,25}}{(13,7 + \sqrt{16}) \cdot 2,4} = 6,52 \cdot 10^5;$$

5) За формулою (3) визначаємо площу контакту газоповітряної суміші з поглинальною рідиною:

$$S_k = \frac{10^3 \cdot 60}{6,52 \cdot 10^5 \cdot 50} = 0,02, \text{ м}^2;$$

б) За формулою (7) визначають потужність електродвигуна насосу

$$N_{ел} = \frac{1,1 \frac{1,3}{1,3-1} \cdot 1100 \cdot 100 \left[\left(\frac{1200}{1100} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} - 1 \right]}{1000 \cdot 0,90} = 6,18, \text{ кВт.}$$

Для нормальної роботи насосу вибираємо стандартну потужність його електродвигуна – 6,5 кВт.

Висновок: реалізація технології рециклінгу дозволяє:

- Зменшити кількість викидів на 80%,
- Скоротити викиди формальдегіду на 280 кг щорічно,
- Зменшити навантаження на полігони і повітря, підвищити екологічну безпеку регіону.

3.4. Розрахунок економічної доцільності (вартість обладнання, витрати, повернення інвестицій)

Для впровадження технології рециклінгу ДСП необхідні базові інвестиції у закупівлю обладнання та запуск процесу.

Вхідні дані для розрахунку:

- ✓ Вартість комплекту обладнання для переробки (подрібнювач, сепаратор, фракціонатор, системи очищення): 80 000 у.о..
- ✓ Щорічна вартість експлуатаційних витрат (електроенергія, обслуговування, зарплата персоналу): 15 000 у.о..
- ✓ Вартість утилізації відходів на полігоні без рециклінгу: 50 у.о./тонна.
- ✓ Кількість відходів, які б вивозились на полігон без рециклінгу: 500 тонн/рік.
- ✓ Кількість відходів після впровадження рециклінгу: 100 тонн/рік.

Економія на вивезенні відходів:

До впровадження:

$$50 \text{ тонн} \times 50 \text{ у.о.} = 25\,000 \text{ у.о./рік}$$

Після впровадження:

$$100 \text{ тонн} \times 50 \text{ у.о.} = 25\,000 \text{ у.о./рік}$$

Річна економія:

$$25\,000 - 5\,000 = 20\,000 \text{ у.о./рік}$$

Чистий прибуток після врахування експлуатаційних витрат:

$$20\,000 - 15\,000 = 5\,000 \text{ у.о./рік}$$

Окупність інвестицій становить:

Термін окупності:

$$80\,000 / 5\,000 = 16 \text{ років}$$

Примітка: Окупність можна пришвидшити за рахунок продажу вторинної сировини або державних екологічних програм підтримки. Попри доволі тривалий базовий термін окупності (16 років), рециклінг суттєво зменшує витрати на утилізацію і відкриває можливості для додаткового прибутку при використанні вторинної сировини.

3.5. Висновки до розділу 3

У третьому розділі було проведено обґрунтування вибору оптимального способу рециклінгу відходів деревинностружкових плит для умов підприємства. З урахуванням екологічних та економічних чинників найефективнішим рішенням є механічне подрібнення з подальшим використанням стружки для виробництва нових плит.

Розроблена технологічна схема забезпечує:

- Зменшення обсягів захоронення відходів на 80%;
- Скорочення викидів формальдегіду на 280 кг/рік;
- Створення замкнутого циклу використання ресурсів, що

відповідає принципам сталого розвитку.

- Економічний розрахунок показав, що при річній економії вивезення відходів у 20 000 у.о. та витратах на експлуатацію у 15 000 у.о., чистий річний прибуток складає 5 000 у.о.. Орієнтовний термін окупності інвестицій становить 16 років, але його можна зменшити за рахунок продажу вторинної сировини або отримання екологічних грантів.

Таким чином, впровадження запропонованої технології є не лише екологічно виправданим, але й економічно доцільним кроком для підприємства.

Узагальнення отриманих результатів

- Виявлено основні виробничі та побутові джерела утворення відходів ДСП.
- Систематизовано фізико-хімічні характеристики залишків та їхню класифікацію за ступенем забруднення.
- Встановлено, що несортовані відходи ДСП мають високий рівень екологічної небезпеки через наявність формальдегіду.

- Проаналізовано основні технологічні методи рециклінгу, визначено їхні переваги і недоліки.
- Обґрунтовано вибір механічного подрібнення як найбільш ефективного способу утилізації у заданих умовах.
- Проведено розрахунки, які підтверджують екологічну та економічну доцільність запропонованої технології.

Практичні висновки та пропозиції щодо впровадження

1. Впровадження технології механічного рециклінгу дозволить зменшити обсяги відходів на підприємстві до 80%, а також скоротити витрати на вивезення сміття.

2. Необхідно встановити сучасні системи подрібнення та сортування, що дадуть змогу якісно готувати вторинну сировину до подальшого використання.

3. Рекомендується провести додаткове навчання персоналу для забезпечення ефективної експлуатації обладнання та дотримання екологічних стандартів.

4. Доцільно розглянути можливість залучення грантів або екологічних програм підтримки, що допоможе зменшити термін окупності проекту.

Перспективи подальшого розвитку теми рециклінгу відходів ДСП

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

- Оптимізацію процесів сортування та очищення відходів, щоб забезпечити ще вищу якість вторинної сировини.
- Розробку комбінованих технологій рециклінгу, які поєднуюватимуть механічну і хімічну переробку для максимального використання ресурсного потенціалу.

- Оцінку впливу вторинної продукції на якість нових деревинностружкових плит та їх відповідність стандартам екологічної безпеки.
- Моделювання систем замкненого циклу виробництва на основі рециклінгу ДСП у масштабах регіону або країни.

ОХОРОНА ПРАЦІ

Аналіз стану охорони праці та довкілля

У відповідності із законом України під охороною праці розуміють систему заходів, законодавчих актів, соціально-економічних, організаційно-технічних, гігієнічних, лікувально-профілактичних заходів, які направлені на збереження здоров'я та працездатності людини у під час праці.

Служба охорони праці на підприємстві з виробництва ДСП 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.

Аналіз стану охорони праці проводився за небезпечними і шкідливими виробничими факторами. Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого за певних умов може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника. Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника і виникнення професійного захворювання.

Для попередження і профілактики травматизму і захворювання на підприємстві проводяться інструктажі з охорони праці. Відповідальність за проведення інструктажів несе інженер з охорони праці, а також особи відповідальні за стан охорони праці підрозділів, дільниць, цехів тощо.

Аналіз умов праці на підприємстві

Технологічний процес виготовлення ДСП достатньо механізований, відповідно рівень травматизму незначний.

У табл. 12 подана характеристика технологічного процесу за небезпечними виробничими факторами.

Таблиця 12. Характеристика технологічного процесу за небезпечними виробничими факторами

Назва технологічного процесу	Небезпечний виробничий фактор	Клас приміщення за ступенем ураження електричним струмом по ПУЕ
Процес приготування клею та змішування його із стружкою	ризик вибухо- і пожежонебезпеки через підвищену концентрацію летких компонентів, зокрема - формальдегіду	Високий ступінь електронебезпеки П-1- клас пожежонебезпеки; В-1 – клас вибухонебезпеки
	погана теплоізоляція сушарок	
	підвищена вологість повітря	

З табл. 13. можна зробити висновок, що технологічний процес у цеху виготовлення ДСП має ряд небезпечних виробничих чинників, що відповідно впливає на продуктивність праці працівників і ефективність виробництва, а також і на кількість захворювань і рівень травматизму на підприємстві.

Аналізуючи умови праці (енерговитрати працівників) в цеху можна зробити висновок що переважна більшість робіт відноситься до другої категорії важкості – Пб. У табл. 13 подана характеристика технологічного процесу виготовлення ДСП за шкідливими виробничими факторами.

Таблиця 13. Характеристика технологічного процесу за шкідливими виробничими факторами

Назва техно- логічного проце-су	Метрологічні умови						Забруднен ня повітря		Шум		Вібрація	
	температ у-ра, °С		віднос- на воло- гість, %		швидкість руху повітря, м/с		Формальде гід, мг/м ³		Рівень звукового тиску, дБ		Рівень вібрації, дБ	
	н	ф	н	ф	н	ф	н	ф	н	ф	н	ф
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
Процес виготовлення ДСП	17- 19	19- 20	60	84	0,3	0,4	0,05	0,6	80	87	65	80
	20- 22*	19- 25*	60 *	87 *	0,3*	0,6*		0,8				

н – нормативне значення, ф — фактичне значення,

* значення показників в теплий період року

Як видно з табл. 13, в цеху температура перевищує допустиму норму в холодний і теплий період року. Відносна вологість суттєво перевищує норму, а швидкість руху повітря є в межах допустимих відхилень.

Концентрація формальдегіду в повітрі є надто висока, вібрація (76 дБ) також

не відповідає нормативним і значно перевищує допустимі норми. Освітлення на робочих місцях становить 150...200 лк, що є достатнім для виконуваних операцій.

Пожежна і електробезпека в цехах з виробництва ДСП

Цехи з виробництва ДСП відносяться до пожежонебезпечних об'єктів деревообробної промисловості. Основними чинниками є наявність великої кількості горючих матеріалів (стружка, пил, смоли), висока температура обладнання, а також широке використання електроенергії.

Таблиця 14 Основні джерела загоряння

Джерело загоряння	Причина виникнення	Приклад
Перегрів обладнання	Погана вентиляція, знос підшипників	Прес-гідравлічний
Електрична іскра	Коротке замикання	Подрібнювач стружки
Самозаймання пилу	Скупчення в повітроводах, фільтрах	Циклон, фільтр
Відкрите полум'я	Ремонтні роботи, куріння	Цех з гарячим пресуванням

Класифікація пожежонебезпечних зон

Згідно з ДБН В.1.1-7:2016, у виробництві ДСП виділяють зони:

- Клас П-Ша – приміщення з пиловибухонебезпечним середовищем.
- Клас П-П – приміщення з горючим пилом без вибухонебезпеки.

Таблиця 15. Група горючості матеріалів

Матеріал	Група горючості	Примітка
Стружка	Г4 (сильно горюча)	Швидке займання
Пил деревний	Г4	Вибухонебезпечний у повітрі
Формальдегідна смола	Г3	Горюча, токсична
Плити ДСП (сухі)	Г3	Повільне горіння

Системи пожежогасіння

Первинні засоби пожежогасіння

Вогнегасники: порошкові типу ВП-5, ВП-10 — на кожні 20 м².

Ящики з піском і лопатами.

Вогнегасні покривала.

Автоматичне пожежогасіння

Таблиця 16. Типи автоматичних систем пожежогасіння

Тип системи	Де застосовується	Особливості
Спринклерна система	Приміщення гарячого пресування	Вода під тиском
Аерозольна система	Електрощити	Компактність
Газова система	Серверні, щитові	Інертні гази
Піна низької кратності	Зони з пилом та смолою	Миттєве покриття

Система попередження та евакуації

Сигналізація типу С2000 з виносними табло.

Звукове та світлове сповіщення.

Резервне освітлення евакуаційних виходів.

Ширина евакуаційного проходу — не менше 1,2 м.

Електробезпека на виробництві

Класифікація за умовами електробезпеки

Виробничі цехи належать до приміщень з підвищеною небезпекою, через:

високу запиленість;

наявність струмопровідних частинок у повітрі;

підвищену температуру;

можливість вологи (системи пресування, змащування тощо).

Таблиця 17. Основні заходи електробезпеки

Захід	Сутність
Заземлення	Нейтральне заземлення корпусів обладнання
Використання УЗО	В автоматах керування електродвигунами
Ізоляція провідників	Подвійна, з захистом від стирання
Перевірка опору ізоляції	1 раз на 6 місяців
Доступ до щитів	Обмежено, замикання, таблички «СТІЙ! НАПРУГА!»

Засоби індивідуального захисту

Діелектричні рукавиці.

Гумові килимки.

Інструмент з ізольованими ручками.

Індикатори напруги (типу «Контакт», ІНН-1).

Інструктажі і навчання персоналу

Таблиця 18. Види інструктажів

Вид інструктажу	Частота	Хто проводить
Вступний	при прийомі	Інженер з охорони праці
Первинний на робочому місці	при початку роботи	Майстер/начальник зміни
Повторний	раз на 6 міс	Відповідальна особа
Позаплановий	при зміні обладнання	Згідно з інструкціями
Цільовий	перед роботою з підвищеним ризиком	Майстер, ІТП

Цехи з виробництва ДСП потребують посиленої уваги до пожежної та електробезпеки. Основні загрози - пил, смоли та перегрів обладнання. Упровадження систем автоматичного пожежогасіння, надійного заземлення, своєчасного інструктування персоналу та засобів захисту дає змогу зменшити ризики аварій та нещасних випадків.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показав, що відходи деревинноструктурних плит (ДСП) є значним джерелом забруднення довкілля через вміст токсичних компонентів, зокрема формальдегіду, а також через великі обсяги утворення як на виробництві, так і у побуті. Ефективне управління цими відходами є екологічно необхідним завданням сучасної деревообробної галузі

Дослідження існуючих технологій рециклінгу ДСП засвідчило, що найбільш перспективними є механічне подрібнення з повторним використанням стружки та хімічна регенерація смол. Вибір конкретної технології залежить від складу та ступеня забрудненості відходів, а також від економічних і екологічних критеріїв

Розроблена оптимізована технологічна схема рециклінгу дозволяє суттєво пошкодити обсяги захоронення відходів, зменшити викиди формальдегіду в атмосфері та скоротити витрати на закупівлю первинної сировини. Це підтверджено інженерно-розрахунковими та економічними оцінками, проведеними в рамках роботи

Впровадження сучасних технологій переробки відходів ДСП на підприємствах сприяє не лише покращенню екологічної ситуації, а й підвищенню ресурсоефективності виробництва. Це відкриває додаткові можливості для отримання вторинної сировини та зменшення виробничих витрат

Практичні рекомендації, розроблені в роботі, можуть бути використані деревообробними підприємствами для організації системи збору, сортування та переробки відходів ДСП. Дальший розвиток цієї тематики пов'язаний із вдосконаленням технологій детоксикації та пошуком нових напрямків використання вторинної продукції

Список використаних джерел

1. ДСТУ EN 312:2018 Плити деревинностружкові. Технічні умови. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 34 с.
2. Білоконь А.І., Савченко С.В. Технологія переробки деревних відходів. – Київ: Либідь, 2016. – 192 с.
3. Ковальов С.О., Ткаченко В.М. Охорона навколишнього середовища в деревообробній промисловості. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2017. – 156 с.
4. Радченко Л.О. Переробка деревинних плитних матеріалів: проблеми та перспективи // Науковий вісник НУБіП України. – 2020. – Вип. 5. – С. 77–83.
5. Єрмаков О.В. Екологічні аспекти утилізації промислових відходів // Екологічний вісник. – 2019. – №2. – С. 45–51.
6. ISO 12460-5:2015. Wood-based panels – Determination of formaldehyde release – Part 5: Extraction method (called the perforator method).
7. Nestic S., Stana-Kleinschek K., Kopitar D. Recycling of wood-based panel waste: Approaches and technologies // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 320. – 124674.

8. Жидецький В.Ц, Джигирей В.С., Сторожук В.С. та ін, Практикум із охорони праці. – Львів: Афіша, 2000, - 349 с.
9. Пелипенко І.В. Методи рециклінгу деревинних матеріалів: сучасний стан та перспективи розвитку // Екологія та промисловість. – 2021. – №3. – С. 25–30.
10. Офіційний сайт компанії «Kronospan». Технології переробки деревних плитних матеріалів. – Режим доступу: <https://www.kronospan-worldwide.com>
11. Curran, M. A. (2012): Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products. Wiley, 636 S. ISBN 9781118099728
12. Hendrickson, C. T. et al. (2010): Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services : An Input-Output Approach. Taylor and Francis, 273 S. ISBN 9781933115238
13. Системи екологічного управління: сучасні тенденції та міжнародні стандарти. Посібник /С.В.Берзіна, Яреськовська та ін./ - К: Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. - 134с.
14. Сомар Г.В. Конспект лекцій з дисципліни "Оцінка життєвого циклу" в форматі PDF, Львів, 2023. – 76 с.
15. Апостолюк С.О., Апостолюк А.С., Джигирей В.С. та ін. Охорона навколишнього середовища в деревообробній промисловості.-К.: Основа, 2003,-174 с.
16. Сторожук В.М. Виробничий шум: природа та шляхи знищення.-К.: Основа, 2003.-384 с.
17. Жидецький В.Ц, Джигирей В.С., Сторожук В.С. та ін, Практикум із охорони праці. – Львів: Афіша, 2000, - 349 с.

