МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота/проект

другий магістерський рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: **Технології зведення об'єктів будівництва з використанням рециклінгу будівельних матеріалів**

Виконав: студент ___2___ курсу, групи __8.1923-пцб-1___
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми промислове і цивільне будівництво
(код і назва освітньої програми)
Коряпін Роман Андрійович
(призвище та ініціали)

Керівник доц., к.т.н. Полтавець М.О.
(посада, вчене звання, науковий ступень, призвище та ініціали)

Рецензент доц., к.т.н. Данкевич Н.О.
(посада, вчене звання, науковий ступень, призвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра Промислового та цивільного будівництва
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
(шифр і назва)
Освітня програма «Промислове і цивільне будівництво»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
завідувач кафедри *промислового та цивільного будівництва*
проф. І.А. Арутюнян
"___" _____ 20___ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Коряпін Роман Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи (проекту) Технології зведення об'єктів будівництва з використанням рециклінгу будівельних матеріалів

Науковий керівник роботи доц., к.т.н., Полтавець Марина Олександрівна,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*30*" *09* 2024 року № *1486-с*
2. Термін подання студентом кваліфікаційної роботи *грудень 2024 р.*
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи *Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливості розвинення проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об'єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Проаналізувати стан питання зведення об'єктів будівництва з використання рециклінгу будівельних матеріалів. Розглянути технології зведення об'єктів з використанням рециклінгу будівельних матеріалів. Розробити проєкт будівництва заводу з переробки будівельних відходів. Обґрунтувати економічну ефективність будівництва з використанням рециклінгу.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Від восьми графічних плакатів (слайдів) із результатами аналітичних обґрунтувань наукового напряму досліджень, результатами чисельних розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних методів досліджень.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Полтавець М.О., доц.		
Розділ 2	Полтавець М.О., доц.		
Розділ 3	Полтавець М.О., доц.		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Огляд літератури та аналітичний огляд стану питання зведення об'єктів будівництва з використанням рециклінгу будівельних матеріалів	1 жовтня	
2	Розділ 2. Технології зведення об'єктів з використанням рециклінгу будівельних матеріалів	1 листопада	
3	Розділ 3. Проект будівництва заводу з переробки будівельних відходів	15 листопада	
4	Розділ 4. Економічна ефективність будівництва з використанням рециклінгу	1 грудня	

Студент _____ (підпис) Коряпін Р.А. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проєкту) _____ (підпис) Полтавець М.О. (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ (підпис) Данкевич Н.О. (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Коряпін Р.А. Технології зведення об’єктів будівництва з використанням рециклінгу будівельних матеріалів.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник М.О. Полтавець. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2024.

У роботі проаналізовано типи промислових відходів і вторинної сировини, а також їхні фізико-механічні властивості. Розглянуто сучасні технології переробки таких матеріалів для їхнього застосування у будівництві. Досліджено вплив використання вторинної сировини на економічну та екологічну ефективність будівельних процесів. Розроблено технічні рекомендації щодо застосування перероблених матеріалів у різних конструктивних елементах будівель. Оцінено переваги, ризики та обмеження використання матеріалів із промислових відходів.

Ключові слова: промислові відходи, переробка, вторинна сировина, будівництво, екологічна ефективність, економічна рентабельність.

ABSTRACT

Koriapin Roman Technologies of construction objects using recycling of building materials.

Qualification master's thesis for obtaining the degree of higher education in the specialty 192 Construction and Civil Engineering, scientific supervisor M.O. Poltavets. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia of Zaporizhzhia National University, Department of Industrial and Civil Construction, 2024.

The thesis analyzes the types of industrial waste and secondary raw materials, as well as their physical and mechanical properties. Modern recycling technologies for such materials and their application in construction are reviewed. The impact of using secondary raw materials on the economic and environmental efficiency of construction processes is studied. Technical recommendations for the application of recycled materials in various structural elements of buildings are developed. Advantages, risks, and limitations of using materials from industrial waste are evaluated.

Keywords: industrial waste, recycling, secondary raw materials, construction, environmental efficiency, economic profitability.

ЗМІСТ

ВСТУП **5**

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ ЗВЕДЕННЯ ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ **7**

1.1 Сучасні тенденції у будівництві з використанням рециклінгу будівельних матеріалів **7**

1.2 Нормативно-правове регулювання рециклінгу будівельних відходів **23**

1.3 Зарубіжний досвід у рециклінгу будівельних матеріалів **30**

1.4. Український досвід рециклінгу будівельних матеріалів **35**

2 ТЕХНОЛОГІЇ ЗВЕДЕННЯ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ **36**

2.1 Характеристика будівельних матеріалів, отриманих з відходів **36**

2.2 Технологічний процес рециклінгу будівельних матеріалів **47**

2.3 Вплив рецикльованих матеріалів на екологію та економіку будівництва **53**

2.4 Використання інноваційних методів у будівництві з рецикльованих матеріалів **58**

3 ПРОЕКТ БУДІВНИЦТВА ЗАВОДУ З ПЕРЕРОБКИ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ **66**

3.1 Місце розташування та обґрунтування вибору ділянки **66**

3.2 Проектування технологічного процесу переробки будівельних відходів .. **68**

3.3 Техніко-економічне обґрунтування будівництва заводу **69**

3.4 Екологічні аспекти та охорона навколишнього середовища **73**

4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГУ **75**

4.1 Аналіз витрат на будівництво з рецикльованих матеріалів **75**

4.2 Прогноз економічної вигоди від впровадження технологій рециклінгу ... **77**

4.3 Оцінка ризиків та їх мінімізація **79**

ВИСНОВКИ **81**

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ **83**

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасна будівельна галузь стикається з численними екологічними викликами, що вимагають впровадження інноваційних підходів до використання ресурсів. Зростання обсягів будівельних відходів та необхідність їх раціонального використання підсилюють потребу у впровадженні технологій рециклінгу. Переробка будівельних матеріалів дозволяє зменшити залежність від природних ресурсів, знизити витрати на матеріали та підвищити екологічність будівельного процесу. У цьому контексті розробка технологій рециклінгу та створення інфраструктури для переробки будівельних відходів є важливим аспектом сталого розвитку будівельної галузі.

Метою магістерської роботи є дослідження технологій рециклінгу будівельних матеріалів та їхнього використання в будівельному процесі, а також розробка проєкту будівництва заводу для переробки будівельних відходів.

Об'єктом дослідження є технології рециклінгу будівельних матеріалів та сучасні підходи до використання перероблених матеріалів у будівництві.

Предметом дослідження є методи та технології переробки будівельних відходів, а також їх застосування для будівництва нових об’єктів.

Для досягнення поставленої в процесі дослідження мети вирішені наступні **завдання:**

- аналіз сучасних технологій рециклінгу будівельних матеріалів та їхнього впровадження у будівельний процес;
- оцінка екологічної та економічної ефективності використання перероблених матеріалів у будівництві;
- розробка технічного рішення для будівництва заводу з переробки будівельних відходів;
- визначення оптимальних методів рециклінгу для їх подальшого використання у будівництві.

Методами дослідження є теоретичний аналіз літературних джерел з тематики рециклінгу, аналіз існуючих технологій переробки будівельних відходів, проектування заводу для їх переробки.

Наукова новизна. У роботі запропоновано нові підходи до рециклінгу будівельних відходів, зокрема, інтегровану модель виробничого процесу, яка включає сортування, подрібнення, очищення та повторне використання матеріалів. Розроблено технічне рішення для будівництва заводу з переробки будівельних відходів із використанням сучасних технологій автоматизації, що сприяє зниженню витрат і збільшенню обсягів переробки.

Практична цінність. Результати дослідження можуть бути використані для створення нормативно-правових актів щодо екологічної безпеки будівництва, вдосконалення стандартів рециклінгу будівельних матеріалів, а також для впровадження запропонованих технологій у будівельну практику.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати дослідження доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях, а також знайшли практичне застосування при розробці технічних рішень для підприємств будівельної галузі.

Структура і об'єм магістерської роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи становить 74 сторінки тексту, включає 9 рисунки, 6 таблиць. Список використаних джерел містить 26 найменувань.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ ЗВЕДЕННЯ ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Сучасні тенденції у будівництві з використанням рециклінгу будівельних матеріалів

Огляд літератури та аналітичний огляд стану питання зведення об'єктів будівництва з використанням рециклінгу будівельних матеріалів демонструє значне зростання наукового інтересу до цієї тематики в останні десятиліття. Основним стимулом для розвитку таких технологій є глобальні екологічні проблеми, зокрема надмірне утворення будівельних відходів та необхідність зниження навантаження на природні ресурси. У зв'язку з цим, дослідники та практики шукають інноваційні рішення для зведення будівель із застосуванням перероблених матеріалів, що дозволяє суттєво зменшити кількість сміття та використання первинної сировини (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Концепція замкнутого життєвого циклу проектів будівництва

У науковій літературі питання рециклінгу будівельних матеріалів та їхнього повторного використання отримало всебічне висвітлення. Дослідники звертають увагу на різні види будівельних відходів, які можуть бути використані повторно, серед яких переважають бетон, цегла, металеві елементи та пластмаси. Також активно розробляються методи переробки будівельних відходів, що включають механічне подрібнення, термічну обробку та хімічне перетворення для отримання вторинної сировини. Одним із найпоширеніших підходів є механічне подрібнення бетону, що дозволяє використовувати його як наповнювач для нових будівельних конструкцій. Дослідження показують, що використання переробленого бетону може суттєво знизити вартість будівельних робіт без втрати якості (рис. 1.2).

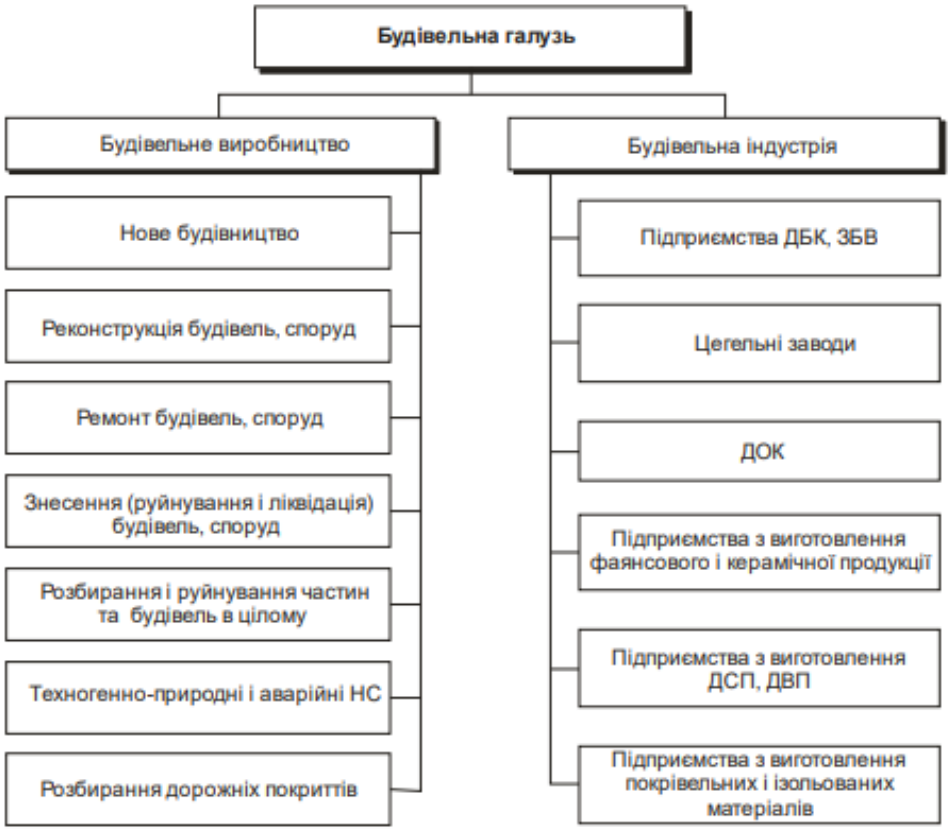


Рисунок. 1.2 – Основні джерела утворення будівельних відходів

Крім того, важливим аспектом рециклінгу будівельних матеріалів є можливість повторного використання сталевих та алюмінієвих конструкцій, які

також широко застосовуються в сучасному будівництві. Дослідники зазначають, що переробка металів потребує значно менших енергетичних ресурсів порівняно з видобутком нової руди, що робить цей процес екологічно вигідним. Металеві елементи після переробки можуть бути використані у конструкціях нових будівель або для виготовлення інших металевих виробів.

Аналіз стану питання також показує, що використання перероблених матеріалів у будівництві не лише позитивно впливає на екологію, але й економічно вигідне. Наукові дослідження демонструють, що впровадження рециклінгу у будівництві дозволяє знизити витрати на матеріали на 15-20% залежно від типу об'єкта та використаних технологій. Крім того, суттєвим фактором є скорочення витрат на утилізацію відходів, оскільки значна їх частина перетворюється на нові будівельні матеріали. Окрему увагу в наукових дослідженнях приділяють нормативно-правовому регулюванню використання рециклінгу в будівництві. У країнах Європейського Союзу та США прийнято низку нормативних актів, які заохочують використання перероблених матеріалів та встановлюють вимоги до їх якості. Це дозволяє створити стандарти для будівельних компаній і стимулює розвиток технологій рециклінгу. Дослідники також відзначають, що такі законодавчі ініціативи сприяють розвитку інфраструктури для переробки будівельних відходів, включаючи створення спеціалізованих заводів та центрів сортування відходів (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Рециклінг будівельних відходів

Однак існують і певні виклики, пов'язані з використанням перероблених будівельних матеріалів. Однією з основних проблем є питання якості та довговічності таких матеріалів. Деякі дослідники висловлюють побоювання щодо того, що перероблені матеріали можуть мати гірші технічні характеристики порівняно з первинними матеріалами. Особливо це стосується бетону, деякі види якого після переробки втрачають свої міцнісні властивості. Тому науковці активно працюють над розробкою нових методів переробки, які дозволять зберегти або навіть покращити властивості матеріалів. Крім того, важливим аспектом залишається питання економічної ефективності будівництва з використанням рециклінгу. Дослідження показують, що вартість створення інфраструктури для переробки будівельних відходів є значною, що може вплинути на загальну вартість будівельних проектів. Проте, у довгостроковій перспективі такі інвестиції є вигідними, оскільки дозволяють знизити витрати на будівельні матеріали та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище.

З огляду на ці виклики, сучасні дослідження спрямовані на подальший розвиток технологій рециклінгу будівельних матеріалів. Особлива увага приділяється вдосконаленню процесів переробки, які дозволять підвищити якість вторинних матеріалів, а також зниженню витрат на переробку та транспортування будівельних відходів. У перспективі, інноваційні рішення у цій сфері дозволять створити замкнутий цикл будівництва, де всі відходи перетворюються на нові матеріали, що використовуються для зведення нових об'єктів.

Отже, огляд літератури та аналіз сучасного стану питання рециклінгу будівельних матеріалів свідчить про значний прогрес у цій сфері, але також підкреслює наявність низки проблем, які потребують подальших досліджень. Важливими напрямками є поліпшення якості перероблених матеріалів, зниження витрат на переробку та впровадження законодавчих ініціатив, які сприятимуть розвитку цієї галузі. Сучасний розвиток технологій рециклінгу будівельних матеріалів демонструє високий потенціал для сталого будівництва, однак для його ефективного впровадження необхідно подолати кілька ключових перешкод. Однією з таких перешкод є відсутність чіткої інтеграції нових технологій у будівельні

стандарти, що в деяких випадках уповільнює процес масштабного впровадження рециклінгових рішень. Для цього необхідно здійснити масштабну адаптацію існуючих нормативних документів та стандартів будівництва, що дозволить спростити та стандартизувати процеси використання перероблених матеріалів у нових будівельних проектах.

Ще однією проблемою, яка часто виникає в дискусіях науковців, є питання сумісності перероблених матеріалів із традиційними будівельними матеріалами. Для того, щоб будівлі, зведені з використанням рециклінгових матеріалів, відповідали всім вимогам міцності та довговічності, необхідно забезпечити їх належну інтеграцію з іншими компонентами конструкцій. Це питання активно досліджується, зокрема з погляду змішування перероблених матеріалів з первинними, щоб отримати оптимальні технічні характеристики без шкоди для якості будівлі.

Станом на сьогодні, основні напрямки досліджень зосереджені на двох аспектах: удосконаленні технологій переробки та їх адаптації для масового використання у будівельній галузі. Одним із перспективних напрямків є розвиток автоматизованих систем сортування будівельних відходів, що дозволяють значно підвищити якість перероблених матеріалів та скоротити витрати на переробку. Такі рішення дозволяють швидко і точно відокремлювати матеріали за типом та ступенем забруднення, що, своєю чергою, сприяє підвищенню якості вторинної сировини [24].

Також слід зазначити роль державних і приватних інвестицій у розвиток інфраструктури для рециклінгу будівельних відходів. У багатьох країнах активно впроваджуються пільгові програми для підприємств, що займаються переробкою будівельних матеріалів, а також фінансові стимули для будівельних компаній, які використовують перероблені матеріали. Успіх таких ініціатив залежить від активної співпраці між державою та бізнесом, а також створення економічно вигідних умов для впровадження рециклінгу у будівельні проекти.

Важливим аспектом розвитку цієї галузі є також навчання фахівців, які зможуть професійно впроваджувати новітні технології у будівництво. Важливою складовою

є розробка нових навчальних програм для архітекторів, інженерів та інших фахівців будівельної галузі, що сприятиме поширенню знань про екологічні переваги та технологічні особливості використання перероблених будівельних матеріалів.

Поглиблені дослідження показують, що, незважаючи на певні виклики, потенціал використання рециклінгу будівельних матеріалів залишається високим. Інноваційні рішення у цій галузі дозволяють не тільки знизити негативний вплив на довкілля, але й створити нові економічні можливості для будівельних компаній. Поєднання екологічних технологій із сучасними будівельними практиками здатне створити основу для сталого будівництва в глобальному масштабі, що є особливо актуальним в умовах стрімкого зростання урбанізації та посилення екологічних викликів.

З огляду на вищевказане, можна констатувати, що рециклінг будівельних матеріалів не лише є актуальною темою для сучасної науки та промисловості, але й відкриває нові горизонти для будівельної галузі. Перехід на використання перероблених матеріалів у будівництві має потенціал стати одним із головних чинників у вирішенні екологічних проблем, пов'язаних із будівельними відходами, і водночас сприяти підвищенню економічної ефективності будівельних проектів у довгостроковій перспективі (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Аналіз провідних аспектів з використання рециклінгу будівельних матеріалів

Аспект	Опис
Основні матеріали для рециклінгу	Бетон, цегла, металеві конструкції, пластмаси.
Технології переробки	Механічне подрібнення, термічна обробка, хімічне перетворення.
Переваги використання перероблених матеріалів	Зменшення витрат на матеріали (на 15-20%), скорочення відходів, зниження навантаження на природні ресурси.

Продовження таблиці 1.1

Аспект	Опис
Основні виклики	Сумісність із первинними матеріалами, зниження міцності деяких матеріалів після переробки, висока вартість створення інфраструктури для переробки.
Нормативне регулювання	Стандарти у країнах ЄС та США, що заохочують використання перероблених матеріалів, розробка законодавчих ініціатив.
Інновації та перспективи	Розвиток автоматизованих систем сортування, підвищення якості перероблених матеріалів, створення замкнутого циклу будівництва.
Економічні вигоди	Зменшення витрат на утилізацію відходів, зниження вартості матеріалів у довгостроковій перспективі, підтримка інвестицій та державних програм.
Освітні потреби	Розробка навчальних програм для архітекторів та інженерів, які сприятимуть впровадженню екологічних практик та технологій у будівництві.

Сучасні тенденції у будівництві з використанням рециклінгу будівельних матеріалів відображають глобальний перехід будівельної галузі до більш сталого та екологічного підходу. Рециклінг будівельних відходів стає невід'ємною частиною сучасних будівельних практик, оскільки зростаюча кількість будівельних проектів спричиняє значні навантаження на природні ресурси та призводить до великого обсягу відходів. Використання вторинних матеріалів не лише знижує навантаження на навколишнє середовище, але й відкриває нові можливості для економії коштів у будівельній галузі. Однією з основних тенденцій є активне впровадження технологій переробки та повторного використання будівельних відходів. Сучасні технології дозволяють переробляти такі матеріали, як бетон, цегла, сталь, дерево, гіпсокартон та пластмаси, перетворюючи їх на нові будівельні матеріали. Ці

матеріали використовуються як у процесі зведення нових будівель, так і для відновлення старих споруд. Наприклад, у багатьох країнах активно використовують технологію подрібнення старого бетону для створення нового наповнювача, що зменшує необхідність у видобутку природного каменю та піску.

Також варто відзначити розвиток «зеленої» архітектури, яка передбачає використання екологічно чистих матеріалів і технологій. У цьому контексті рециклінг відіграє важливу роль, оскільки дозволяє зменшити викиди вуглекислого газу та вплив на довкілля. Багато сучасних архітекторів і будівельних компаній розглядають перероблені матеріали як основну частину своїх проектів, що дозволяє досягти сертифікації за міжнародними стандартами сталого будівництва, такими як LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) або BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method).

Ще однією значущою тенденцією є розвиток урбаністичного рециклінгу, що передбачає повторне використання будівельних матеріалів безпосередньо на місці будівництва. Це дає змогу скоротити витрати на транспортування відходів і зменшити кількість сміття, що потребує утилізації. На практиці це означає, що відходи, отримані в результаті демонтажу старих будівель, використовуються для створення нових об'єктів, що особливо актуально для міст, які проходять реконструкцію. Урбаністичний рециклінг не лише економічно вигідний, але й сприяє збереженню історичних аспектів архітектури, оскільки дозволяє використовувати старі матеріали у сучасних проектах.

Тенденція до створення спеціалізованих підприємств для переробки будівельних відходів також набирає обертів. У багатьох країнах, особливо в Європі, уряди активно підтримують будівництво таких підприємств, забезпечуючи податкові пільги та інші фінансові стимули для бізнесу. Це сприяє появі нових технологій і рішень для рециклінгу, а також дозволяє переробляти більший обсяг відходів. Ці підприємства часто функціонують на регіональному рівні, обслуговуючи великі будівельні проекти та забезпечуючи стабільне постачання вторинних матеріалів для будівництва. Сучасні дослідження у галузі рециклінгу спрямовані на покращення властивостей вторинних матеріалів, щоб зробити їх

більш конкурентоспроможними порівняно з первинними ресурсами. Особлива увага приділяється зміцненню перероблених матеріалів, таких як бетон і метал, для того щоб вони могли відповідати вимогам до міцності та довговічності сучасних будівель. Інновації у цій галузі зосереджені на покращенні процесів очищення та сортування відходів, що дозволяє підвищити якість вторинної сировини [1].

Також варто відзначити, що рециклінг будівельних матеріалів стає важливим інструментом у боротьбі зі зміною клімату. Зменшення використання первинної сировини та зниження обсягів викидів при переробці дозволяє зменшити вуглецевий слід будівництва. Цей аспект стає дедалі важливішим для будівельної галузі, оскільки на міжнародному рівні зростає тиск щодо скорочення викидів парникових газів. Нарешті, інтеграція цифрових технологій, таких як BIM (Building Information Modeling), у процес рециклінгу також є важливою тенденцією. Використання BIM дозволяє більш точно планувати та оптимізувати використання перероблених матеріалів у будівельних проектах, а також контролювати їхній життєвий цикл від демонтажу до повторного використання.

Таким чином, сучасні тенденції у будівництві з використанням рециклінгу будівельних матеріалів відображають значний прогрес у напрямку сталого розвитку галузі. Активне впровадження інноваційних технологій, підтримка урядів, розвиток нових методів переробки та використання цифрових інструментів створюють умови для більш екологічного та економічно вигідного будівництва. Ще однією важливою тенденцією у сфері будівництва з використанням рециклінгу будівельних матеріалів є зростаюча увага до енергоефективності. Використання перероблених матеріалів може знизити не тільки матеріальні витрати, але й витрати на енергію, необхідну для виробництва нових будівельних ресурсів. Оскільки виробництво цементу, сталі та інших традиційних матеріалів є енергоємним і супроводжується великим викидом вуглекислого газу, переробка та повторне використання цих матеріалів дозволяє значно скоротити споживання енергії та негативний вплив на навколишнє середовище [2].

У контексті енергоефективності, рециклінг матеріалів також підтримує концепцію замкненого циклу будівництва. Ця концепція передбачає, що будівлі та

інфраструктурні об'єкти проектуються таким чином, щоб їхні матеріали могли бути максимально використані після закінчення терміну експлуатації. У рамках цього підходу матеріали, що використовуються під час будівництва, розглядаються не як відходи після завершення будівельного циклу, а як потенційні ресурси для нових проектів. Це дозволяє значно зменшити обсяги будівельних відходів і підвищити ефективність використання ресурсів.

Крім того, зростає популярність використання інноваційних матеріалів, створених із відходів інших галузей промисловості. Наприклад, у будівництві вже використовуються матеріали, виготовлені з перероблених шин, пластикових відходів або залишків текстильного виробництва. Це дозволяє не лише переробляти будівельні відходи, а й залучати відходи інших галузей для створення нових матеріалів. Такий підхід є частиною ширшого руху до економіки замкненого циклу, де ресурси максимально використовуються і повторно вводяться в обіг, мінімізуючи утворення відходів.

Ще однією перспективною тенденцією є застосування перероблених матеріалів у модульному будівництві. Модульне будівництво, яке передбачає зведення будівель із заздалегідь виготовлених модулів, дозволяє значно скоротити час будівництва та підвищити ефективність використання матеріалів. При цьому перероблені матеріали можуть бути використані для виготовлення модулів, що додатково підвищує екологічність і стійкість таких проектів. Крім того, модульне будівництво дозволяє знижувати кількість відходів під час самого будівельного процесу, оскільки модулі виробляються з точними розмірами на заводах, що мінімізує перевитрати матеріалів на будівельному майданчику.

У зв'язку з підвищеною увагою до екологічності та рециклінгу, в будівельній галузі також поширюється практика отримання екологічних сертифікатів для проектів, які використовують перероблені матеріали. Такі сертифікати, як LEED, BREEAM або DGNB, підтверджують відповідність будівельного об'єкта високим екологічним стандартам і стають важливим конкурентним фактором на ринку нерухомості. Будівлі, сертифіковані за цими стандартами, вважаються більш привабливими для

інвесторів та орендарів, оскільки вони є більш енергоефективними та мають менший вплив на довкілля.

Не можна оминути увагою і зростання суспільного усвідомлення важливості використання рециклінгу в будівництві. Уряди багатьох країн активно підтримують проекти, що впроваджують екологічно чисті технології, через надання субсидій, податкових пільг та інших фінансових стимулів. Крім того, на рівні законодавства поступово вводяться вимоги щодо мінімального відсотка використання перероблених матеріалів у будівництві, що стимулює компанії до впровадження інноваційних рішень. Зокрема, у країнах Європейського Союзу діють програми, спрямовані на зниження утворення будівельних відходів та підтримку будівництва з використанням перероблених матеріалів.

Сучасні тенденції у будівництві з використанням рециклінгу будівельних матеріалів характеризуються інноваційним підходом до використання ресурсів, інтеграцією новітніх технологій та впровадженням економіки замкненого циклу. Використання вторинних матеріалів не лише сприяє сталому розвитку будівельної галузі, але й стає ключовим фактором для зменшення негативного впливу на довкілля (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Стаціонарний дробильно-сортувальний комплексдля переробки будівельних відходів

Згідно з аналітичною статистикою, використання рециклінгу будівельних матеріалів у різних регіонах світу протягом останніх років демонструє стійке зростання. Наприклад, у Європі частка перероблених матеріалів у будівництві збільшувалася від 22% у 2015 році до 52% у 2023 році. Це свідчить про активне впровадження технологій рециклінгу та підвищення екологічної свідомості серед будівельних компаній. Таке зростання можна пояснити розвитком відповідної інфраструктури для переробки будівельних відходів та стимулюючою політикою Європейського Союзу щодо екологічно безпечних будівельних практик. Німеччина, Франція та Нідерланди стали лідерами у використанні перероблених матеріалів, що значно зменшило залежність від видобутку нової сировини (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Мобільний дробильно-сортувальний комплексдля переробки будівельних відходів

У Сполучених Штатах Америки показники рециклінгу також демонструють позитивну динаміку. Починаючи з 2015 року, коли частка перероблених матеріалів становила лише 18%, у 2023 році цей показник зріс до 48%. Основним чинником такого зростання є посилення регулювання щодо утилізації будівельних відходів на рівні штатів та впровадження програм зі зниження вуглецевого сліду у будівельній сфері. Великі будівельні компанії, особливо у Каліфорнії та Нью-Йорку, активно впроваджують технології рециклінгу бетону, сталі та інших матеріалів, що дозволяє знизити витрати на виробництво та зробити будівництво більш екологічним (рис. 1.6) [23].



Рисунок 1.6 – Дорожня фреза для зняття верхньогошару асфальтобетонного покриття

В Україні тенденції використання рециклінгу у будівельній сфері тільки починають набирати обертів. З 2015 року, коли частка перероблених матеріалів була на рівні лише 5%, до 2023 року цей показник зріс до 18%. Це зростання зумовлено поступовим впровадженням програм переробки будівельних відходів, розвитком нових підприємств для їх обробки та збільшенням кількості будівельних проєктів, які використовують перероблену сировину. Втім, рівень рециклінгу в Україні все ще значно нижчий порівняно з показниками Європи та США, що вказує на необхідність подальшого вдосконалення інфраструктури переробки та прийняття законодавчих заходів для стимулювання використання перероблених будівельних матеріалів (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Подрібнення асфальтобетонного брухтуна асфальтобетонному заводі

Отже, загальна динаміка використання рециклінгу у будівництві свідчить про зростаючу популярність екологічно відповідальних підходів та підвищення ефективності використання ресурсів у будівельній галузі різних регіонів світу (рис. 1.8).

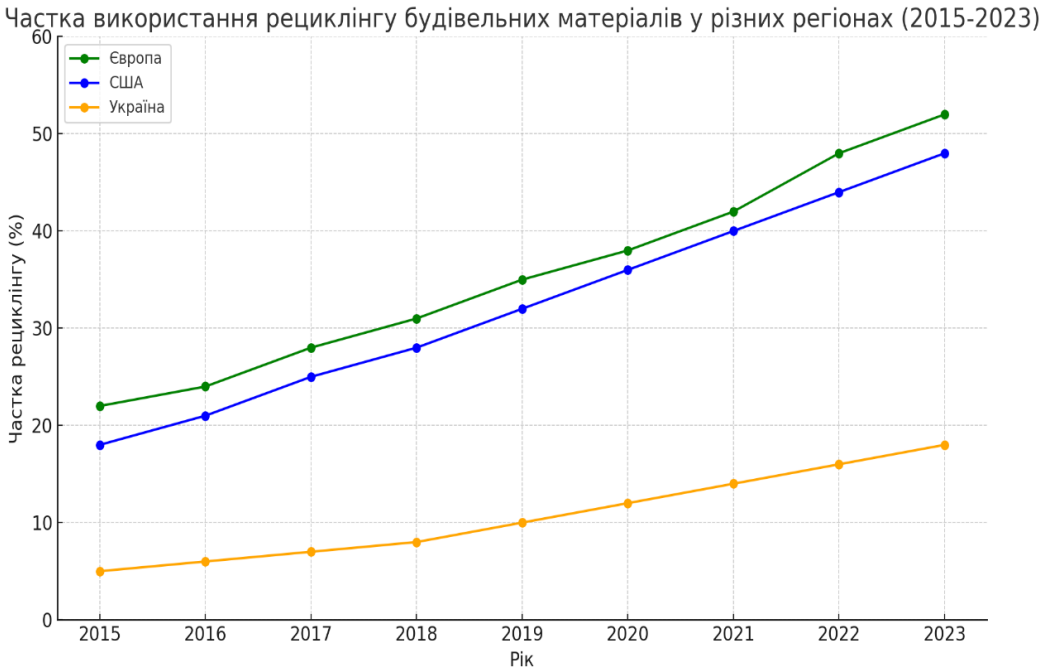


Рисунок 1.8 – Частка використання рециклінгу будівельних матеріалів у різних регіонах

Графік відображає динаміку зростання частки використання рециклінгу будівельних матеріалів у Європі, США та Україні протягом 2015-2023 років. Як видно, найбільше зростання спостерігається в європейських країнах, де частка перероблених матеріалів у будівництві збільшилася з 22% у 2015 році до 52% у 2023 році. Це зумовлено активною підтримкою екологічних програм та розвитком інфраструктури для рециклінгу. У США частка рециклінгу також стабільно зростає, від 18% у 2015 році до 48% у 2023 році, що свідчить про поширення відповідних технологій у будівельній галузі та зусилля зі зменшення впливу на довкілля. В Україні, хоча тенденція теж позитивна, темпи зростання є більш повільними. У 2015 році частка перероблених будівельних матеріалів становила лише 5%, а в 2023 році — вже 18%. Це вказує на необхідність подальшого вдосконалення технологій переробки та збільшення їх впровадження у будівництві.

Підбір машин для демонтування будівлі є важливим етапом планування робіт, який залежить від типу будівлі, її розміру, матеріалів конструкції, висоти та умов навколишнього середовища. Для забезпечення ефективності, безпеки та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище вибір обладнання повинен враховувати технічні характеристики машин, їх продуктивність, маневреність та можливість роботи в специфічних умовах.

Перш за все, для демонтажу будівель зазвичай використовуються екскаватори з гідравлічними молотами або ножицями. Ці машини підходять для роботи з бетонними конструкціями, цегляними стінами, металевими елементами та іншими міцними матеріалами. Екскаватори оснащуються змінними робочими органами, що дозволяє їх адаптувати до різних типів демонтажу. Наприклад, гідравлічний молот використовується для розбиття бетону, а гідравлічні ножиці — для розрізання металевих конструкцій.

Крім того, для демонтажу багатоповерхових будівель застосовуються телескопічні крани або крани з висувними стрілами. Вони забезпечують доступ до верхніх поверхів, дозволяючи розбирати будівлю поступово зверху вниз. Такі крани зазвичай використовуються у міських умовах, де простір для маневрування обмежений.

Для роботи з невеликими будівлями або для демонтажу внутрішніх конструкцій застосовуються компактні роботи-демонтажники. Ці машини мають невеликі розміри, високу маневреність та здатність працювати в обмеженому просторі. Вони оснащуються спеціальними насадками для різних типів робіт, таких як різання, дроблення або буріння.

Ще одним важливим видом техніки є дробильні установки, які використовуються для подрібнення будівельних відходів безпосередньо на місці демонтажу. Це дозволяє зменшити обсяг матеріалів, які потрібно транспортувати, а також підготувати їх для подальшої переробки. Такі установки можуть бути стаціонарними або мобільними, що дозволяє адаптувати їх до умов конкретного об'єкта.

Для демонтажу металевих конструкцій ефективними є газорізальні або плазмові установки, які дозволяють швидко розрізати метал на частини для подальшого транспортування або переробки. У випадку великих сталевих конструкцій може бути використана важка техніка з потужними гідравлічними ножицями.

Під час вибору машин необхідно також враховувати питання безпеки та мінімізації шумового і пилового забруднення. Сучасні моделі машин оснащуються системами зменшення шуму, а також водяними розпилювачами для зменшення пилу під час роботи. Крім того, важливо враховувати витрати на експлуатацію техніки, її ремонт та обслуговування.

Підбір машин для демонтажу будівлі є багатофакторним процесом, який потребує врахування технічних характеристик обладнання, специфіки об’єкта, екологічних вимог та економічної доцільності. Оптимальний вибір техніки дозволяє забезпечити ефективність демонтажних робіт, дотримання термінів і стандартів безпеки.

1.2 Нормативно-правове регулювання рециклінгу будівельних відходів

Нормативно-правове регулювання рециклінгу будівельних відходів є важливою складовою в забезпеченні сталого розвитку будівельної галузі та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Це регулювання охоплює широкий спектр законодавчих актів, стандартів та програм, які визначають правила поводження з будівельними відходами, механізми їх утилізації, переробки та повторного використання. Уряди різних країн поступово впроваджують нові законодавчі ініціативи, спрямовані на зменшення кількості відходів, підвищення ефективності їхньої переробки та заохочення використання перероблених матеріалів у будівництві [3].

В Україні законодавча база, яка стосується рециклінгу будівельних відходів, перебуває на стадії активного розвитку. Основними нормативними документами, що регулюють питання утилізації та переробки будівельних відходів, є закони, постанови та нормативні акти, що регулюють сферу охорони довкілля та поводження з відходами. Закон України «Про відходи» є фундаментальним документом, який визначає основні принципи поводження з різними видами відходів, включаючи будівельні, та встановлює загальні правила щодо їхнього збирання, транспортування, утилізації та переробки. Закон містить норми щодо відповідальності за порушення правил поводження з відходами, що стимулює суб'єктів будівельної галузі до екологічної відповідальності.

Крім того, рециклінг будівельних відходів регулюється державними стандартами (ДСТУ), які визначають технічні вимоги до перероблених матеріалів та їхнього використання у будівництві. Такі стандарти встановлюють мінімальні технічні характеристики перероблених матеріалів, забезпечуючи їхню безпечність та відповідність вимогам якості для будівництва. Державні стандарти також регулюють методи переробки будівельних відходів, технології їхньої утилізації та повторного використання, що дозволяє гарантувати ефективність цих процесів на практиці.

На міжнародному рівні Європейський Союз є одним із лідерів у питаннях нормативно-правового регулювання рециклінгу будівельних матеріалів. Директиви ЄС щодо управління відходами визначають чіткі цілі щодо переробки будівельних відходів, встановлюючи мінімальні відсоткові показники переробки та повторного використання відходів у будівництві. Наприклад, Директива ЄС 2008/98/ЕС щодо відходів встановлює мету досягти 70% переробки будівельних та демонтажних відходів у країнах-членах ЄС. Це зобов'язує держави впроваджувати відповідні національні законодавства, які стимулюють розвиток інфраструктури для переробки будівельних відходів, а також підтримують фінансові стимули для компаній, що використовують перероблені матеріали.

Особлива увага приділяється контролю за утворенням та управлінням відходами, що виникають у процесі демонтажу та знесення будівель. У багатьох країнах перед початком будь-якого будівельного чи демонтажного проекту законодавство вимагає від розробників подавати план управління відходами, який має включати заходи щодо мінімізації відходів, їхнього сортування та утилізації. Це дозволяє контролювати обсяги відходів та забезпечувати їх належне перероблення.

Також важливим аспектом нормативно-правового регулювання є ліцензування діяльності компаній, що займаються переробкою будівельних відходів. Ліцензії видаються відповідними державними органами, і компанії, що бажають займатися такою діяльністю, повинні відповідати низці вимог, включаючи наявність відповідного обладнання, дотримання екологічних стандартів та правил безпеки. Таке ліцензування гарантує, що переробка відходів здійснюється на високому технічному рівні, відповідно до законодавчих норм, і не завдає шкоди навколишньому середовищу. Уряди також заохочують використання перероблених матеріалів у будівництві через надання фінансових стимулів і пільг. У багатьох країнах компанії, які використовують перероблені матеріали в будівництві, можуть отримувати податкові знижки або державні гранти, що сприяє розвитку екологічно відповідального будівництва. Крім того, впровадження екологічних сертифікацій, таких як LEED або BREEAM, також сприяє розвитку нормативно-правового регулювання у сфері рециклінгу будівельних відходів. Ці системи сертифікації

оцінюють екологічну ефективність будівельних проектів і враховують використання перероблених матеріалів як одну з ключових складових при оцінці загального екологічного впливу будівлі.

У цілому, нормативно-правове регулювання рециклінгу будівельних відходів є невід'ємною частиною сучасної будівельної політики, спрямованої на сталий розвиток галузі. Поєднання законодавчих актів, технічних стандартів та фінансових стимулів створює умови для розвитку екологічно чистого будівництва, зменшення обсягів відходів та зниження навантаження на природні ресурси. Однак, для досягнення максимального ефекту необхідна постійна модернізація законодавчої бази та впровадження новітніх технологій, які дозволять зробити процес рециклінгу ще більш ефективним та доступним для широкого застосування [4].

Подальший розвиток нормативно-правового регулювання рециклінгу будівельних відходів залежить від постійного вдосконалення існуючих правил і адаптації законодавства до нових технологій та екологічних вимог. Одним із ключових напрямів є впровадження принципу відповідальності виробників за будівельні відходи, що утворюються на різних етапах життєвого циклу будівельного об'єкта. Це означає, що компанії, які здійснюють будівництво або демонтаж будівель, повинні відповідати не тільки за якість будівництва, але й за належну утилізацію та переробку відходів, що виникають у процесі їхньої діяльності. Законодавство, яке передбачає принцип відповідальності виробника, стимулює компанії до запровадження більш ефективних підходів до управління відходами, зокрема до сортування, мінімізації та переробки будівельного сміття. Це також сприяє розвитку так званого "екодизайну" — процесу, при якому будівлі спочатку проектуються таким чином, щоб після закінчення терміну їх експлуатації всі матеріали могли бути легко демонтовані, перероблені та повторно використані [5] (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Нормативно-правове регулювання рециклінгу будівельних відходів

Аспект регулювання	Опис
Основні закони та нормативні акти	Закон України «Про відходи», державні стандарти (ДСТУ) щодо переробки будівельних матеріалів, директиви ЄС щодо переробки будівельних відходів.
Принцип відповідальності виробників	Будівельні компанії зобов’язані не лише контролювати якість будівництва, але й забезпечити належну утилізацію і переробку будівельних відходів.
Механізми моніторингу та звітності	Створення національних систем обліку обсягів будівельних відходів, звітність компаній щодо їхнього перероблення та утилізації.
Міжнародні угоди та конвенції	Паризька кліматична угода, директиви ЄС, що ставлять за мету скорочення відходів та підвищення частки перероблених матеріалів у будівництві.
Ліцензування діяльності з переробки	Ліцензування компаній, що займаються переробкою будівельних відходів, із дотриманням екологічних стандартів і правил безпеки.
Фінансові стимули для бізнесу	Податкові пільги, державні гранти, субсидії для компаній, що використовують перероблені матеріали в будівництві.
Екологічні стандарти	LEED, BREEAM та інші міжнародні стандарти, які регулюють використання перероблених матеріалів і сприяють екологічно чистому будівництву.
Покращення інфраструктури	Створення спеціалізованих підприємств для переробки будівельних відходів, розробка нових технологій переробки на державному та місцевому рівнях.

Ще одним важливим аспектом розвитку нормативно-правової бази є впровадження механізмів моніторингу та звітності щодо переробки будівельних відходів. Уряди багатьох країн працюють над створенням національних систем обліку та звітності, які б дозволяли відслідковувати обсяги будівельних відходів, що підлягають утилізації та переробці. Це сприяє не лише більш точному розумінню ситуації з відходами, але й покращує контроль за дотриманням будівельними компаніями законодавчих вимог. Важливу роль у нормативно-правовому регулюванні рециклінгу будівельних матеріалів також відіграють міжнародні угоди та конвенції, які встановлюють глобальні екологічні цілі та орієнтири для країн. Наприклад, Паризька кліматична угода, яка ставить за мету скорочення викидів парникових газів, впливає на розвиток будівельної галузі через вимоги до зниження вуглецевого сліду та зменшення обсягів відходів. Відповідно до цього, багато країн адаптують своє законодавство для того, щоб включити вимоги щодо зменшення відходів та стимулювати використання перероблених матеріалів, що сприяє досягненню загальних екологічних цілей.

Важливим інструментом, що забезпечує реалізацію цих вимог, є екологічні стандарти, які регулюють не тільки будівництво, але й усі етапи життєвого циклу будівельних матеріалів — від їхнього виробництва до утилізації [6].

Європейський Союз активно впроваджує директиви, що вимагають від компаній використовувати матеріали з низьким вуглецевим слідом, підвищувати частку перероблених матеріалів у будівництві, а також впроваджувати заходи для забезпечення енергоефективності під час експлуатації будівель. Така політика підштовхує будівельний сектор до екологічної відповідальності та інновацій.

Окрім того, державні органи також активно працюють над покращенням інфраструктури для переробки будівельних відходів. У багатьох країнах створюються спеціалізовані заводи з переробки будівельного сміття, які забезпечують ефективне перетворення відходів у нові матеріали, що можуть бути використані у будівництві. На рівні місцевих громад також впроваджуються програми підтримки для компаній, що спеціалізуються на рециклінгу, включаючи фінансування досліджень і розробок нових технологій у цій сфері. Це дозволяє

створити замкнені цикли використання матеріалів, де відходи не викидаються, а стають ресурсом для нових будівельних проектів.

Таким чином, ефективне нормативно-правове регулювання рециклінгу будівельних відходів включає в себе широкий спектр заходів, спрямованих на досягнення екологічних, економічних та соціальних цілей. Відповідальність виробників, впровадження стандартів та механізмів моніторингу, підтримка інфраструктури для переробки — усе це сприяє зниженню негативного впливу будівельної галузі на довкілля та стимулює розвиток інновацій у сфері переробки будівельних матеріалів. Проте для досягнення більш масштабних результатів необхідна постійна адаптація законодавства до нових технологічних реалій та зростаючих екологічних викликів [7].

Нормативно-правове регулювання рециклінгу будівельних відходів в Україні та світі охоплює широкий спектр законодавчих актів, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки та ефективне управління відходами. В Україні регулювання у цій сфері здійснюється на основі законів та постанов, які визначають загальні принципи поводження з відходами та встановлюють вимоги щодо переробки будівельних матеріалів. Одним із ключових документів є Закон України "Про відходи" (№ 187/98-ВР), який визначає правові, організаційні та економічні засади діяльності у сфері поводження з відходами, включаючи будівельні відходи. Важливим є також Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" (№ 1264-XII), який встановлює загальні вимоги щодо охорони довкілля, включаючи аспекти рециклінгу та утилізації відходів.

На міжнародному рівні регулювання рециклінгу будівельних відходів здійснюється за допомогою директив та нормативних актів Європейського Союзу, таких як Директива 2008/98/ЄС "Про відходи", яка встановлює правові основи для ефективного управління відходами та передбачає зобов’язання держав-членів ЄС щодо розвитку програм рециклінгу та зниження кількості відходів. Директива визначає ієрархію поводження з відходами, де пріоритет надається запобіганню їх утворення, повторному використанню та переробці.

Серед інших важливих міжнародних документів можна виділити Базельську конвенцію про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням, яка була прийнята в 1989 році та регулює поводження з небезпечними відходами, зокрема будівельними матеріалами, що можуть становити екологічну загрозу. Крім того, у багатьох країнах діють національні закони та програми, що сприяють розвитку інфраструктури для переробки будівельних відходів, як-от Закон про переробку та повторне використання матеріалів у Німеччині (Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012) [22].

Важливим документом є також Стратегія поводження з відходами Європейського Союзу, яка спрямована на перехід до циркулярної економіки, де рециклінг стає основним способом управління відходами. Ця стратегія передбачає створення умов для повторного використання матеріалів та мінімізації впливу будівельного сміття на довкілля. У Сполучених Штатах Америки контроль за управлінням відходами здійснюється на основі Закону про збереження та відновлення ресурсів (Resource Conservation and Recovery Act, 1976), який встановлює вимоги щодо поводження з небезпечними відходами та розвиток програм рециклінгу. Сучасне нормативно-правове регулювання рециклінгу будівельних відходів в Україні значно змінилося у 2023 році. Зокрема, одним із основних законодавчих актів є Закон України "Про управління відходами" (№ 2320-IX), який набрав чинності 9 липня 2023 року. Цей закон встановлює правові, організаційні та економічні засади управління відходами з метою зменшення їх обсягів, запобігання утворенню та забезпечення їх переробки й повторного використання. Закон передбачає перехід від захоронення відходів до створення інфраструктури для їх рециклінгу, а також рух України до європейських стандартів управління відходами відповідно до директив ЄС.

Додатково, Постановою Кабінету Міністрів України від 30 червня 2023 року № 667 затверджено "Порядок розроблення та затвердження регіональних планів управління відходами", який регулює процес створення регіональних планів, що стануть частиною загальнонаціональної стратегії управління відходами. Важливим аспектом є також "Порядок здійснення контролю за виконанням інвестиційних

програм у сфері управління побутовими відходами", затверджений Постановою КМУ від 7 липня 2023 року № 695, який визначає механізми контролю за виконанням цих програм виконавчими органами місцевих рад.

Крім того, в 2023 році були ухвалені такі нормативно-правові акти, як Закон України "Про обмеження виробництва та обігу пластикової продукції одноразового використання на території України" та Закон України "Про відходи упаковки", що регулюють питання обмеження використання пластику та упаковки, а також їх утилізацію та рециклінг. Для забезпечення ефективної реалізації цих законів передбачено створення нової інфраструктури для обробки та переробки відходів.

Ці закони та постанови сприяють гармонізації українського законодавства із законодавством Європейського Союзу та створюють основу для розвитку інфраструктури рециклінгу в Україні, зокрема у будівельній галузі.

1.3 Зарубіжний досвід у рециклінгу будівельних матеріалів

Зарубіжний досвід у рециклінгу будівельних матеріалів демонструє широкий спектр інноваційних підходів і практик, спрямованих на вирішення проблеми будівельних відходів. Багато країн уже впровадили системи управління відходами, які дозволяють ефективно переробляти будівельні матеріали, зменшувати навантаження на довкілля та сприяти сталому розвитку будівельної галузі. Найбільш активними у цьому напрямку є країни Європейського Союзу, США, Японія та деякі інші розвинені економіки, які впровадили жорсткі нормативи та законодавчі ініціативи, що стимулюють використання перероблених матеріалів. У країнах Європейського Союзу рециклінг будівельних матеріалів є одним із ключових елементів загальної стратегії зниження відходів і переходу до циркулярної економіки. Директиви ЄС вимагають від держав-членів досягати мінімум 70% переробки будівельних і демонтажних відходів, що стимулює

розвиток технологій рециклінгу та створення інфраструктури для переробки відходів. У країнах, таких як Нідерланди, Німеччина та Данія, функціонують ефективні системи збору та переробки будівельного сміття. Наприклад, у Нідерландах вже протягом багатьох років діє система обов’язкового сортування будівельних відходів, що дозволяє досягати високого рівня переробки матеріалів, таких як бетон, цегла та метал. Це дозволяє повторно використовувати ці матеріали у будівництві нових об'єктів, знижуючи необхідність у видобутку нових ресурсів [8].

Німеччина є лідером у галузі переробки будівельних відходів завдяки жорстким екологічним стандартам і системі стимулів для будівельних компаній, які використовують перероблені матеріали. Німецькі компанії активно застосовують перероблений бетон, який після спеціальної обробки використовується у нових будівельних проектах. Завдяки впровадженню державних програм підтримки, таких як податкові пільги та субсидії для компаній, що спеціалізуються на рециклінгу, в Німеччині вдалося значно зменшити обсяги будівельних відходів, які йдуть на звалища. Японія, з її обмеженими природними ресурсами і високою щільністю населення, також активно впроваджує практики рециклінгу будівельних матеріалів. У країні діють жорсткі вимоги до демонтажу будівель, які зобов'язують компанії сортувати відходи та максимально використовувати перероблені матеріали для нових будівель. Японські компанії активно застосовують технології переробки деревини, сталі та бетону, створюючи нові матеріали для будівництва. Це дозволяє знизити вартість будівельних матеріалів і водночас зменшити екологічний вплив будівельної галузі на довкілля.

У США рециклінг будівельних матеріалів також набирає обертів. Хоча країна не має єдиної національної системи рециклінгу, окремі штати активно впроваджують власні програми. Наприклад, у Каліфорнії діє програма, яка стимулює переробку будівельних відходів через вимоги до будівельних компаній здавати певну частину відходів на переробку. У результаті цього, каліфорнійські будівельні компанії широко використовують перероблений бетон та інші будівельні матеріали. Також у США активно застосовується система екологічної сертифікації

будівель LEED, яка передбачає обов'язкове використання перероблених матеріалів у будівельних проектах для отримання високих екологічних рейтингів.

Окрім західних країн, варто відзначити досвід Китаю, де стрімка урбанізація призвела до значного зростання будівельних відходів. Китай активно впроваджує технології рециклінгу у своїх мегаполісах. Уряд Китаю підтримує будівництво заводів із переробки будівельних відходів і розробляє національні програми, що стимулюють використання перероблених матеріалів у будівництві. Хоча країна стикається з великими викликами через масштабність відходів, проте значні інвестиції в інфраструктуру рециклінгу дозволяють Китаю поступово знижувати обсяги відходів і підвищувати рівень переробки. Важливою частиною зарубіжного досвіду є інтеграція цифрових технологій у процес рециклінгу. Країни Європи та США активно використовують системи BIM (Building Information Modeling), що дозволяють управляти будівельними відходами на етапі проектування та будівництва. За допомогою цих технологій компанії можуть точніше планувати кількість відходів, а також оптимізувати використання перероблених матеріалів, зменшуючи витрати на будівництво та вплив на довкілля [9].

Отже, зарубіжний досвід рециклінгу будівельних матеріалів демонструє різноманітність підходів, які використовуються для зменшення будівельних відходів і покращення екологічної ситуації. Європейські країни, Японія, США та Китай активно розвивають інфраструктуру для переробки відходів, підтримують законодавчі ініціативи та впроваджують інноваційні технології, що дозволяють знизити екологічний вплив будівельної галузі. Цей досвід може стати корисним орієнтиром для інших країн, які прагнуть розвивати сталий будівельний сектор і впроваджувати рециклінг у будівельні процеси. Продовження логічного розвитку зарубіжного досвіду рециклінгу будівельних матеріалів полягає в тому, що багато країн визнають необхідність подальшого вдосконалення технологій і процесів, спрямованих на зменшення екологічного впливу будівельної галузі. Крім розробки інфраструктури для переробки, держави починають активно інвестувати у дослідження та впровадження нових матеріалів, які можуть бути більш стійкими, довговічними та економічно ефективними.

Одним із ключових напрямків подальшого розвитку є пошук інноваційних матеріалів, створених із відходів, які не поступаються за своїми характеристиками традиційним будівельним матеріалам. Наприклад, у багатьох країнах, таких як Швейцарія та Фінляндія, активно досліджують можливості використання промислових відходів і залишків для створення нових матеріалів, таких як екологічні композити або бетон на основі попелу. Ці матеріали мають не тільки знижений вуглецевий слід, але й дозволяють більш ефективно управляти ресурсами. Крім того, значну увагу приділяють вдосконаленню технологій очищення та обробки перероблених матеріалів. Сучасні методи хімічної і механічної обробки дозволяють покращити властивості перероблених матеріалів, таких як міцність і довговічність, що робить їх більш привабливими для будівельних компаній. Це особливо актуально для таких матеріалів, як бетон і сталь, які часто використовуються у великих об'єктах і потребують високих стандартів якості.

Ще однією важливою складовою розвитку є співпраця між державними та приватними компаніями, яка стимулює розробку нових бізнес-моделей у галузі будівництва. Наприклад, у багатьох країнах Європи та США запроваджуються державно-приватні партнерства, які фінансують будівництво нових заводів із переробки будівельних відходів та розробку передових технологій. Це дозволяє значно прискорити процес впровадження інновацій у сфері будівництва та покращити якість використовуваних матеріалів. Цікавим прикладом такої співпраці є Данія, де уряд активно підтримує створення «зелених кластерів» у будівельній галузі. Такі кластери об'єднують будівельні компанії, науково-дослідні установи та переробні підприємства для спільної розробки екологічно чистих матеріалів і технологій. Це дозволяє інтегрувати передові досягнення науки безпосередньо в процеси виробництва і переробки будівельних матеріалів [10].

Інший важливий аспект зарубіжного досвіду стосується освіти та підготовки фахівців, які будуть впроваджувати новітні технології рециклінгу. У багатьох країнах, зокрема у Німеччині та Швеції, активно розробляються освітні програми для інженерів, архітекторів та будівельників, які спрямовані на підготовку

спеціалістів у галузі сталого будівництва. Такі програми включають вивчення екологічних стандартів, нових методів переробки та управління будівельними відходами. Це забезпечує появу нової генерації фахівців, які можуть ефективно застосовувати перероблені матеріали та новітні технології на практиці. Ще одним перспективним напрямком є інтеграція цифрових технологій у процес управління відходами. Використання технологій, таких як BIM, дозволяє будівельним компаніям більш точно прогнозувати кількість відходів, планувати їхнє перероблення та повторне використання. Цифрові моделі допомагають будівельним фірмам створювати проекти, які мінімізують утворення відходів і максимізують використання перероблених матеріалів. Цей підхід дозволяє не тільки економити кошти, але й робить будівельні процеси більш прозорими та контрольованими з екологічної точки зору.

Зарубіжний досвід також демонструє важливість політичної волі для впровадження інновацій у будівництві. Уряди багатьох країн розробляють національні стратегії щодо рециклінгу будівельних матеріалів, які включають не тільки жорсткі екологічні стандарти, але й фінансові стимули для будівельних компаній. Це дозволяє стимулювати розвиток будівельних проектів із низьким вуглецевим слідом і створювати більш екологічні міста. Отже, зарубіжний досвід у рециклінгу будівельних матеріалів підкреслює важливість інтеграції новітніх технологій, активної співпраці між державними та приватними структурами, а також освіти й підготовки фахівців для досягнення успіху у зменшенні відходів і покращенні екологічних показників будівельної галузі. Це дає важливі уроки для інших країн, які прагнуть перейняти передовий досвід і впроваджувати сталі практики в свої будівельні проекти.

1.4. Український досвід рециклінгу будівельних матеріалів

Український досвід у сфері рециклінгу будівельних матеріалів поступово набуває все більшого поширення завдяки потребі в економії ресурсів і зменшенні негативного впливу будівництва на навколишнє середовище. У нашій країні рециклінг будівельних матеріалів розглядається як важливий напрямок сталого розвитку, який поєднує економічну вигоду та екологічну безпеку. Хоча цей напрямок ще не досяг масштабів розвинених європейських країн, певні кроки вже були зроблені.

На території України впровадження технологій рециклінгу будівельних матеріалів зосереджено переважно у великих містах, де обсяги будівельних відходів є значними. У деяких регіонах створюються спеціалізовані підприємства, які займаються переробкою бетону, цегли, асфальту та інших будівельних матеріалів. Наприклад, у Києві, Одесі та Львові діють підприємства, які мають обладнання для подрібнення будівельних відходів та отримання вторинної сировини. Ця сировина використовується для виготовлення нових будівельних матеріалів, таких як бетон, щебінь чи асфальтна крихта.

Деякі українські компанії також впроваджують інноваційні технології для переробки матеріалів. Наприклад, застосування дробильно-сортувального обладнання дозволяє досягти високої якості вторинної сировини, яка може конкурувати з традиційними будівельними матеріалами. Такі технології дають можливість скоротити витрати на транспортування відходів та зменшити обсяги сміттєзвалищ.

Особливу увагу заслуговують державні ініціативи, спрямовані на розвиток рециклінгу будівельних матеріалів. В Україні ухвалені закони та нормативно-правові акти, які регулюють поводження з будівельними відходами. Наприклад, Закон України «Про відходи» та інші акти передбачають відповідальність будівельних компаній за утилізацію відходів та стимулюють використання вторинних матеріалів у будівництві.

Також активно розвивається співпраця з європейськими партнерами, які діляться досвідом у цій сфері. Проведення міжнародних конференцій, семінарів та обмін знаннями сприяють поширенню сучасних підходів до рециклінгу в Україні. Наприклад, українські будівельні компанії беруть участь у проєктах, які фінансуються Європейським Союзом, для впровадження технологій переробки відходів та зменшення вуглецевого сліду. Однак залишається чимало викликів, які стримують розвиток цієї сфери.

2 ТЕХНОЛОГІЇ ЗВЕДЕННЯ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Характеристика будівельних матеріалів, отриманих з відходів

Технології зведення об'єктів з використанням рециклінгу будівельних матеріалів включають широкий спектр методів і підходів, спрямованих на зменшення негативного впливу будівельної галузі на довкілля та підвищення ефективності використання ресурсів. Однією з основних технологій є повторне використання та переробка будівельних відходів, таких як бетон, цегла, метал, дерево та пластик, що утворюються при знесенні старих споруд або реконструкції будівель. Сучасні методи рециклінгу бетону передбачають його подрібнення та використання у якості заповнювача для нових будівельних сумішей. Перероблений бетон часто використовується як основа для дорожніх покриттів, у вигляді бетонних блоків або як матеріал для заповнення пустот при зведенні нових конструкцій. Це дозволяє не лише знизити потребу у видобутку нової сировини, а й зменшити кількість будівельного сміття, яке потрапляє на полігони. Застосування подрібненого бетону в дорожньому будівництві та зведенні фундаментів показало високу ефективність, особливо у проєктах, де необхідно зменшити витрати на транспортні перевезення та матеріали [16].

Металеві конструкції, такі як сталь та алюміній, також можуть бути успішно перероблені та використані повторно. У будівництві часто застосовується технологія плавлення металевих відходів з подальшим їх литтям у нові форми. Це дозволяє створювати нові металеві елементи конструкцій без втрати якості матеріалу. Використання переробленої сталі у зведенні каркасів будівель дозволяє суттєво знизити собівартість проєктів, а також зменшити енерговитрати на видобуток та обробку нових металів. Цегляні відходи, отримані внаслідок знесення старих споруд, можуть бути повторно використані як декоративні елементи, заповнювачі для будівельних сумішей або матеріал для нових стінових блоків. Для цього технологічний процес включає очищення цегли від старого розчину, подрібнення та сортування за розміром частинок. Використання переробленої цегли у будівництві сприяє збереженню історичного характеру будівель та зменшує обсяги видобутку нової глини. Дерев'яні відходи, зокрема балки, дошки та інші елементи, можна застосовувати повторно як конструктивні або оздоблювальні матеріали. Технологія обробки деревини включає сортування, очищення від старих фарб та лаків, а також реставрацію за допомогою просочень, що підвищують її міцність та стійкість до впливу зовнішніх факторів. Дерево часто використовується у вигляді ламелей, панелей або елементів каркасних конструкцій у малоповерховому будівництві. Пластикові відходи, що утворюються під час знесення будівель або їх реконструкції, можуть перероблятися на гранули, які використовуються для виготовлення нових будівельних матеріалів, таких як полівінілхлоридні панелі, труби, плити та ізоляційні матеріали. Технології переробки пластику передбачають його подрібнення, очищення, плавлення та формування нових виробів. Перероблений пластик стає цінним ресурсом для створення різноманітних будівельних елементів з високими показниками зносостійкості та довговічності.

Усі ці технології рециклінгу активно впроваджуються в будівництві з метою зниження екологічного навантаження та створення умов для сталого розвитку. Інтеграція рециклінгових матеріалів у будівельні процеси вимагає створення відповідної інфраструктури, де передбачені спеціальні заводи з переробки

будівельних відходів, а також системи сортування та логістики для транспортування відходів до місць переробки. Використання таких матеріалів дає змогу знизити витрати на будівництво, підвищити екологічність проєктів та зробити будівельну галузь більш ефективною та дружньою до навколишнього середовища.

Таким чином, технології зведення об’єктів із застосуванням рециклінгу будівельних матеріалів охоплюють різноманітні методи переробки бетону, сталі, цегли, деревини та пластику. Вони сприяють ефективному використанню ресурсів, зниженню кількості відходів та зменшенню викидів шкідливих речовин, що робить будівництво більш сталим та екологічно відповідальним. Продовжуючи логіку використання рециклінгу у будівельних процесах, важливо зазначити, що впровадження цих технологій має не лише екологічні переваги, а й економічні та соціальні. Використання перероблених будівельних матеріалів значно зменшує загальні витрати на будівництво, оскільки витрати на переробку є нижчими, ніж на видобуток та обробку нової сировини. Наприклад, переробка бетону і сталі дозволяє знизити вартість будівництва на 15-20% у порівнянні з використанням традиційних матеріалів. Крім того, зменшується навантаження на полігони та знижується витрата енергії на транспортування будівельних відходів до місць їх остаточного захоронення. Соціальний ефект від впровадження таких технологій полягає у створенні нових робочих місць у сфері рециклінгу та утилізації відходів. Створення підприємств з переробки будівельного сміття потребує залучення кваліфікованого персоналу, що призводить до розвитку місцевої інфраструктури та підвищення рівня зайнятості. З іншого боку, активне використання перероблених матеріалів формує позитивний імідж будівельних компаній, які прагнуть бути відповідальними перед суспільством і дотримуватися принципів сталого розвитку. Щодо технологій зведення об'єктів із використанням рециклінгу, існують також комбіновані підходи, коли перероблені матеріали поєднуються з новими для досягнення оптимального балансу між міцністю та екологічною ефективністю. Наприклад, у багатьох проєктах використовуються бетонні суміші, що складаються на 50% з переробленого бетону та на 50% з нової сировини. Це дозволяє зберегти

необхідні характеристики міцності, водночас знижуючи загальну вартість та екологічний слід будівництва. Подібні практики застосовуються також при створенні багатошарових конструкцій, де перероблені матеріали використовуються як основний шар, а нові — для зовнішнього оздоблення.

Важливою частиною технологій з використанням рециклінгу є інтеграція інноваційних матеріалів, що мають підвищену стійкість до корозії, кращі теплоізоляційні властивості та підвищену міцність. Наприклад, композитні матеріали, створені з переробленого пластику та металу, широко застосовуються для створення легких та міцних будівельних елементів, що мають довший термін експлуатації. Завдяки таким матеріалам можна зменшити товщину стін без втрати теплоізоляційних властивостей, що робить будівлі більш енергоефективними.

На сучасному етапі розвитку будівельних технологій важливим є також створення модульних конструкцій із використанням перероблених матеріалів. Модульне будівництво передбачає створення окремих модулів з використанням рециклінгових елементів, таких як стінові панелі з переробленого бетону або металеві конструкції з повторно використаних матеріалів. Модулі збираються на заводі, а потім транспортуються до будівельного майданчика для остаточного монтажу. Такий підхід знижує витрати на транспортування сировини та будівельного сміття, скорочує час будівництва та мінімізує вплив на довкілля під час виконання будівельних робіт.

Перспективним напрямом розвитку є також застосування біокомпозитів, що створюються на основі органічних матеріалів та відновлюваної сировини, у поєднанні з переробленими компонентами. Використання таких матеріалів дозволяє створювати будівлі з низьким вуглецевим слідом, які є повністю перероблюваними наприкінці їхнього життєвого циклу. Біокомпозити, до складу яких входять деревина, перероблений пластик та органічні волокна, мають високу міцність і довговічність, що дозволяє використовувати їх у конструкціях різного призначення — від житлових будинків до громадських споруд.

Підсумовуючи, можна сказати, що технології зведення об'єктів із використанням рециклінгу будівельних матеріалів є комплексним підходом, який

охоплює різні види переробки та інтеграцію інноваційних матеріалів. Вони створюють нові можливості для будівельної галузі, сприяючи розвитку сталого будівництва, зниженню екологічного навантаження та підвищенню економічної ефективності проєктів. Будівельні матеріали, отримані з відходів, характеризуються унікальними фізичними та механічними властивостями, які роблять їх екологічно безпечною та економічно вигідною альтернативою традиційним матеріалам. Одним із найбільш поширених перероблених матеріалів є перероблений бетон, що утворюється в результаті подрібнення демонтованих бетонних конструкцій. Перероблений бетон використовується як заповнювач у нових бетонних сумішах, а також для створення дорожніх покриттів, фундаментів та залізобетонних конструкцій. Такий бетон зберігає основні характеристики міцності та зносостійкості, а також забезпечує зниження щільності матеріалу, що зменшує навантаження на конструкції та полегшує транспортування. Використання переробленого бетону дозволяє знизити витрати на придбання нової сировини та зменшити обсяги відходів, що потрапляють на полігони.

Цегляні відходи, отримані внаслідок знесення старих споруд, після очищення від залишків розчину та подрібнення можуть бути використані для виготовлення нових цегляних блоків або як заповнювач у будівельних сумішах. Перероблена цегла має високу міцність і довговічність, зберігаючи основні характеристики традиційної цегли. Завдяки тому, що при переробці зберігається структура та форма матеріалу, перероблена цегла може бути використана як декоративний елемент, що надає спорудам автентичного зовнішнього вигляду. Крім того, вона застосовується як основа для фундаментів або для створення зміцнювальних конструкцій.

Перероблений метал, зокрема сталь та алюміній, характеризується відсутністю втрат якості під час переробки, що дозволяє використовувати його повторно без зміни механічних властивостей. Металеві відходи плавляться та повторно використовуються для створення нових конструктивних елементів, таких як арматура, стінові панелі та металеві каркаси. Використання переробленої сталі дозволяє знизити споживання енергії на видобуток нової руди та виробництво сталі, що є важливим з точки зору зниження викидів парникових газів та енерговитрат.

Алюміній, завдяки своїй легкості та стійкості до корозії, широко застосовується у створенні конструкцій, що потребують мінімальної ваги та високої стійкості до зовнішніх впливів.

Перероблене дерево використовується у будівництві у вигляді ламелей, панелей або для створення несучих конструкцій у малоповерхових спорудах. Дерев'яні відходи після обробки зберігають свої природні властивості, такі як міцність, гнучкість та естетичний вигляд. Вони можуть бути використані повторно як основа для виготовлення дерев'яних будівельних блоків, підлогових покриттів, а також для створення елементів внутрішнього оздоблення. Оброблене дерево після переробки не втрачає своїх властивостей і має довгий термін експлуатації, що дозволяє створювати з нього надійні конструкції. Крім того, повторне використання деревини сприяє збереженню природних ресурсів і запобігає вирубуванню лісів.

Перероблений пластик є ефективним будівельним матеріалом завдяки своїй легкості, високій стійкості до вологості та гнучкості у використанні. Пластикові відходи переробляються у гранули, які потім використовуються для виготовлення різноманітних будівельних елементів, таких як труби, плити, панелі та ізоляційні матеріали. Використання переробленого пластику у будівництві знижує вартість матеріалів та збільшує стійкість конструкцій до впливу агресивних середовищ. Крім того, пластик є відносно легким матеріалом, що полегшує транспортування та монтаж будівельних конструкцій [25].

Композитні матеріали, створені на основі перероблених відходів, є ще одним інноваційним напрямом у будівництві. Вони мають підвищену міцність, легкість та здатність протистояти зовнішнім впливам, таким як корозія, волога та високі температури. Зокрема, композити на основі переробленого пластику та деревини (деревинно-полімерні композити) широко використовуються для створення покриттів, панелей та декоративних елементів. Вони мають довгий термін експлуатації та не вимагають спеціального догляду, що робить їх привабливим вибором для зовнішнього та внутрішнього оздоблення будівель.

Таким чином, будівельні матеріали, отримані з відходів, є повноцінною альтернативою традиційним будівельним матеріалам і можуть використовуватися у

широкому спектрі будівельних робіт. Вони не лише забезпечують високу якість та довговічність споруд, але й сприяють екологічній стабільності, зниженню витрат на будівництво та раціональному використанню природних ресурсів. Продовжуючи характеристику будівельних матеріалів, отриманих із відходів, слід зазначити їхню багатофункціональність і можливість адаптації до різних умов експлуатації. Перероблені матеріали мають здатність змінювати свої властивості залежно від методів їхньої обробки та кінцевого призначення. Завдяки цьому вони можуть використовуватися не тільки для створення традиційних будівельних конструкцій, але й для розробки інноваційних рішень у галузі енергоефективного будівництва [21].

Одним із ключових аспектів використання перероблених матеріалів є їхня здатність забезпечувати кращу термо- та звукоізоляцію. Наприклад, перероблений бетон та цегла, завдяки своїй пористій структурі, можуть використовуватися для створення будівельних блоків з підвищеними теплоізоляційними властивостями, що дозволяє зменшити втрати тепла та покращити енергоефективність будівель. Використання таких матеріалів в огороджувальних конструкціях сприяє зниженню потреби у додаткових ізоляційних шарах, що позитивно позначається на загальній вартості проєктів та зменшує їх екологічний слід.

Окрім того, важливим є питання довговічності перероблених будівельних матеріалів. Завдяки сучасним технологіям обробки та зміцнення матеріалів, таких як додавання спеціальних домішок, застосування термічної обробки чи використання захисних покриттів, значно підвищується стійкість матеріалів до зовнішніх впливів, таких як волога, ультрафіолетове випромінювання чи хімічні реагенти. Це дозволяє створювати конструкції, які зберігають свою міцність та естетичний вигляд протягом десятиліть, навіть у складних кліматичних умовах. Перероблена сталь, наприклад, може мати антикорозійне покриття, яке запобігає руйнуванню матеріалу під дією вологи та агресивних середовищ.

Ще одним важливим аспектом є зниження ваги конструкцій за рахунок використання легких матеріалів, таких як композити або перероблений пластик. Легкі будівельні матеріали знижують загальне навантаження на фундамент, що є

особливо важливим при зведенні споруд на нестабільних ґрунтах або у місцях з підвищеною сейсмічною активністю. Легкі конструктивні елементи дозволяють скоротити терміни будівництва та зменшити витрати на транспортування матеріалів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Характеристика будівельних матеріалів, отриманих з відходів

Матеріал	Процес переробки	Основні характеристики	Застосування
Перероблений бетон	Подрібнення демонтованих бетонних конструкцій, очищення від домішок, використання у нових сумішах.	Висока міцність, зносостійкість, низька щільність, знижене навантаження на конструкції.	Заповнювач для нових бетонних сумішей, основа для дорожніх покриттів, матеріал для фундаментів.
Перероблена цегла	Очищення цегли від старого розчину, подрібнення на менші частини, сортування за розміром.	Висока міцність, довговічність, здатність використовуватися як декоративний елемент.	Декоративні елементи, заповнювач для будівельних сумішей, фундаментні блоки.
Перероблений метал	Плавлення металевих відходів, формування нових конструкцій, покриття антикорозійними матеріалами.	Збереження механічних властивостей, висока стійкість до корозії, зниження енерговитрат.	Стінові панелі, арматура, металеві каркаси для будівель.

Продовження таблиці 1.2

Матеріал	Процес переробки	Основні характеристики	Застосування
Перероблене дерево	Очищення від старих покриттів, подрібнення, обробка просоченнями, що підвищують стійкість та довговічність.	Збереження міцності, гнучкість, довговічність, естетичний вигляд.	Дерев’яні блоки, панелі, конструктивні елементи для малоповерхового будівництва.
Перероблений пластик	Подрібнення, плавлення, формування гранул, створення нових виробів.	Легкість, висока стійкість до вологи, стійкість до агресивних середовищ.	Ізоляційні матеріали, панелі для облицювання, труби.
Композити	Поєднання перероблених компонентів (пластик, деревина, метал), формування композитних матеріалів з підвищеними властивостями.	Підвищена міцність, стійкість до вологи, термоізоляційні властивості, стійкість до корозії та високих температур.	Зовнішні та внутрішні стінові панелі, покриття, декоративні елементи, конструкції з низькою вагою.

Застосування таких матеріалів відкриває нові можливості для створення енергоефективних будівель. Поєднання перероблених матеріалів з сучасними енергоощадними технологіями, такими як встановлення сонячних панелей, систем рекуперації тепла та використання "розумних" матеріалів, що змінюють свої властивості під дією зовнішніх факторів, дозволяє створювати будівлі, що відповідають вимогам нульового енергоспоживання. Такі будівлі стають частиною концепції "зеленого" будівництва, спрямованого на мінімізацію вуглецевого сліду та раціональне використання ресурсів. Перероблені матеріали можуть мати й інші переваги, такі як підвищена пожежна безпека, завдяки наявності спеціальних

домішок, які знижують горючість матеріалу. Це особливо важливо для створення стінових панелей, перекриттів та облицювальних елементів. Крім того, використання переробленого пластику дозволяє створювати матеріали з високою стійкістю до ультрафіолетового випромінювання, що робить їх ідеальним вибором для зовнішнього застосування у кліматичних умовах з високим рівнем сонячної активності.

Загалом, будівельні матеріали, отримані з відходів, є не лише повноцінною заміною традиційним матеріалам, але й пропонують широкий спектр можливостей для інноваційного та сталого будівництва. Їх використання дозволяє вирішувати низку актуальних екологічних, економічних та соціальних проблем, роблячи будівельні процеси більш ефективними, безпечними та екологічно відповідальними. Будівельні матеріали, отримані з відходів, класифікуються за хімічним складом, призначенням та фізичними властивостями. За хімічним складом виділяють цементні матеріали, які включають залишки бетонних конструкцій, цементного розчину та залізобетонних блоків. Такі матеріали після подрібнення можуть використовуватися для повторного виробництва бетонних сумішей. Гіпсові матеріали представлені у вигляді залишків штукатурки або стінових перегородок, які придатні для виготовлення гіпсових блоків або будівельних сумішей. Дерев’яні матеріали — це залишки пиломатеріалів, що можуть використовуватися як вторинна сировина для виготовлення нових дерев'яних конструкцій. Металеві матеріали, такі як сталь та алюміній, можуть бути повторно переплавлені для виготовлення нових елементів конструкцій. Полімерні матеріали, наприклад, залишки пластику та поліетилену, після переробки використовуються як добавки до будівельних сумішей або сировина для виготовлення оздоблювальних матеріалів.

Класифікація за призначенням включає матеріали, які можуть використовуватися повторно без змін (наприклад, цегла або бетонні блоки, придатні для будівництва невеликих архітектурних форм) та ті, що потребують додаткової обробки. Деякі матеріали, такі як подрібнений бетон, використовуються для зміцнення дорожніх покриттів або як наповнювач для цементних сумішей.

Полімери, в свою чергу, слугують добавками, які покращують фізичні властивості кінцевого продукту.

Фізичні властивості, такі як питома щільність, теплопровідність, міцність на стиск та згин, визначають можливість використання матеріалів у різних будівельних проектах. Для кожного матеріалу проводяться відповідні розрахунки. Питома щільність розраховується за формулою:

$$\rho = m / V \quad (2.1)$$

де ρ — питома щільність матеріалу, m — маса матеріалу в кг, V — об'єм у м³. Припустимо, маса подрібненого бетонного відходу становить 500 кг, а об'єм — 0,25 м³. У такому випадку:

$\rho = 500 / 0{,}25 = 2000$ кг/м³

Отримана щільність вказує на те, що цей матеріал може бути використаний як наповнювач для цементних сумішей або як основа для створення дорожніх підсипок.

Для розрахунку міцності на стиск використовується формула:

$$\sigma = F / A \quad (2.2)$$

де σ — напруга у Па, F — сила, що діє на матеріал, у Н, А — площа перерізу у м². Припустимо, на зразок з подрібненого бетону площею 0,01 м² діє сила у 10000 Н. Тоді міцність на стиск становитиме:

$\sigma = 10000 / 0{,}01 = 1\,000\,000$ Па = 1 МПа

Такий результат свідчить, що подрібнений бетон може використовуватися як матеріал для несучих конструкцій середньої міцності. Хімічний аналіз матеріалів дозволяє визначити їхню придатність до використання в умовах підвищеної вологості чи впливу агресивних середовищ. Наприклад, наявність у бетоні мінеральних домішок, таких як кремнезем або глинозем, підвищує стійкість до хімічної корозії. Економічний аналіз свідчить про те, що використання таких матеріалів у будівництві є не лише екологічно доцільним, але й економічно вигідним, оскільки вартість перероблених матеріалів значно нижча за вартість нових. Таким чином, комплексна оцінка фізичних та хімічних властивостей матеріалів, отриманих із будівельних відходів, дозволяє не тільки забезпечити їх

ефективне використання у будівництві, але й знизити навантаження на довкілля та витрати на придбання нових матеріалів.

2.2 Технологічний процес рециклінгу будівельних матеріалів

Технологічний процес рециклінгу будівельних матеріалів є комплексною системою дій, спрямованих на переробку будівельних відходів з метою отримання матеріалів, які можуть бути використані повторно у будівельних процесах. Цей процес включає кілька основних етапів, починаючи з попереднього аналізу та сортування відходів і закінчуючи отриманням готових продуктів, придатних для застосування в будівництві. На кожному етапі використовуються спеціалізовані методи та обладнання, що дозволяють досягти максимальної ефективності та мінімізувати втрати сировини.

На початковому етапі рециклінгу проводиться збір та сортування будівельних відходів. Після знесення будівель чи завершення реконструкції, всі утворені відходи — бетон, цегла, метал, деревина, пластик — збираються та розподіляються за категоріями. Сортування може відбуватися як вручну, так і за допомогою автоматизованих систем сортування, які використовують датчики та інші технології для ідентифікації матеріалів. На цьому етапі особлива увага приділяється відокремленню небезпечних відходів, таких як азбест, фарби чи хімічні речовини, які потребують спеціальних умов утилізації.

Після сортування відходи проходять попередню обробку, яка включає подрібнення та очищення. Подрібнення проводиться за допомогою дробарок різного типу, таких як щокові, роторні або конусні дробарки, залежно від виду матеріалу. Наприклад, бетон подрібнюється на дрібні фракції, які згодом можуть бути використані як заповнювач для нових бетонних сумішей. Після подрібнення матеріали очищаються від залишків старого розчину, фарб чи інших домішок. Це

може здійснюватися за допомогою механічних методів, таких як обробка в барабанах або використання магнітних сепараторів для видалення металевих включень [26].

Наступний етап — це подальша обробка та класифікація матеріалів, отриманих після подрібнення. Класифікація здійснюється на основі розмірів частинок, їх щільності та фізичних властивостей. Для цього використовуються вібраційні сита, гравітаційні або аеродинамічні сепаратори. Наприклад, у випадку переробки деревини, дрібні частинки можуть використовуватися для виробництва пресованих панелей, а великі — для створення несучих конструкцій. У процесі класифікації важливо досягти однорідності матеріалів, щоб забезпечити стабільність їхніх характеристик у подальшому використанні.

Після класифікації матеріали направляються на етап глибокої переробки, який залежить від їхнього кінцевого призначення. Перероблений бетон, наприклад, може додатково піддаватися термічній обробці для видалення вологи та підвищення міцності. Перероблений метал переплавляється в печах та литтєвих установках для створення нових металевих профілів або деталей. Пластик після подрібнення та очищення плавиться та формується у гранули, з яких виготовляють труби, панелі чи інші будівельні вироби. У випадку деревини її пресують у панелі, бруски або елементи для каркасних конструкцій. На цьому етапі можуть додаватися спеціальні домішки, що підвищують міцність або інші властивості матеріалів. Заключний етап технологічного процесу рециклінгу будівельних матеріалів — це отримання готової продукції та її перевірка на відповідність встановленим стандартам якості. Готова продукція проходить сертифікацію та контроль якості для перевірки відповідності її фізичних, механічних та хімічних характеристик вимогам, що пред'являються до будівельних матеріалів. На цьому етапі проводяться лабораторні випробування, які включають перевірку на міцність, вологопоглинання, морозостійкість та інші параметри, залежно від виду матеріалу.

Після успішного проходження випробувань та сертифікації готові матеріали транспортуються на будівельні майданчики або до складів для подальшого використання. Технологічний процес рециклінгу може варіюватися залежно від

типу відходів та кінцевого призначення матеріалів, але загальна схема залишається незмінною — починаючи від збору та сортування, подрібнення та очищення, класифікації, глибокої обробки та завершуючи отриманням готової продукції, яка може успішно застосовуватися у будівельних процесах. Важливим елементом технологічного процесу рециклінгу є інтеграція сучасних автоматизованих систем управління, що дозволяють оптимізувати процеси сортування, контролю якості та обробки матеріалів. Використання таких систем значно підвищує ефективність переробки, знижує енерговитрати та дозволяє досягти вищої продуктивності підприємств з рециклінгу будівельних відходів. Інноваційні підходи, такі як використання роботизованих систем для сортування або застосування інтелектуальних алгоритмів для управління процесом переробки, роблять технологічний процес рециклінгу більш гнучким та адаптивним до потреб сучасної будівельної галузі [20].

Продовжуючи опис технологічного процесу рециклінгу будівельних матеріалів, слід зазначити важливість екологічних та економічних аспектів цього процесу, які визначають його ефективність та доцільність для будівельної галузі. Застосування сучасних методів переробки дозволяє не лише зменшити кількість відходів, що підлягають захороненню, але й створити матеріали з новими, унікальними характеристиками, які відповідають вимогам сучасних будівельних стандартів. Крім того, розробка нових технологій у сфері рециклінгу дозволяє знижувати енерговитрати, пов’язані з процесом переробки, і збільшувати ефективність використання природних ресурсів. Серед нових підходів, які активно впроваджуються у технологічний процес рециклінгу, слід виділити використання інноваційних хімічних методів обробки будівельних відходів. Наприклад, для рециклінгу бетону все частіше застосовують технологію хімічного вилучення цементного компонента. За допомогою спеціальних реагентів бетон розділяється на складові, що дозволяє відновити цементний клей та заповнювачі у вигляді піску та гравію. Цей метод дає можливість значно зменшити кількість викидів вуглекислого газу, що утворюються під час традиційного виробництва цементу, та зробити будівельний процес більш екологічно чистим.

Ще однією перспективною технологією є використання мікроорганізмів для біологічного розкладу органічних відходів, таких як деревина або композитні матеріали на основі деревини. Мікробіологічні методи обробки дозволяють значно прискорити процес розкладання складних органічних сполук, зменшити обсяги відходів та отримати біогаз як побічний продукт. Отриманий біогаз може використовуватися як відновлювальне джерело енергії для забезпечення роботи підприємств з переробки, що робить цей процес енергонезалежним і знижує його загальні витрати.

Важливою складовою сучасного технологічного процесу рециклінгу є впровадження циркулярної економіки — підходу, який передбачає максимальне використання потенціалу відходів і забезпечення повного циклу повторного використання матеріалів. У рамках цього підходу будівельні компанії розробляють проєкти, які враховують можливість майбутньої переробки матеріалів ще на стадії проєктування об’єкта. Наприклад, використання збірно-розбірних конструкцій або модульних елементів дозволяє легко розібрати будівлю наприкінці її експлуатації та отримати вторинну сировину для створення нових будівель. Такий підхід дозволяє уникнути великих обсягів будівельних відходів та забезпечити їхнє повторне використання з мінімальними витратами на переробку.

Економічна ефективність технологій рециклінгу будівельних матеріалів також відіграє важливу роль у прийнятті рішень щодо їхнього впровадження. Завдяки використанню перероблених матеріалів знижується потреба у видобутку нової сировини, що зменшує витрати на виробництво та транспортування матеріалів. Крім того, підприємства з переробки часто розташовуються неподалік від будівельних майданчиків, що скорочує логістичні витрати та зменшує викиди парникових газів від транспортування. У деяких випадках використання перероблених матеріалів може знизити загальну вартість будівництва на 20-30%, що робить такі проєкти економічно доцільними [15].

Не менш важливим аспектом є державне регулювання та стимулювання використання рециклінгових матеріалів у будівництві. У багатьох країнах приймаються законодавчі акти, що зобов’язують будівельні компанії

використовувати певний відсоток перероблених матеріалів у своїх проєктах або надають податкові пільги та гранти для підприємств, які займаються рециклінгом. В Україні, наприклад, діє Закон "Про управління відходами", який передбачає створення умов для ефективного використання вторинної сировини та запровадження системи відповідального управління відходами. У Європейському Союзі встановлені цільові показники з переробки будівельних відходів, що стимулює розвиток інфраструктури рециклінгу та створення нових підприємств у цій сфері (рис. 2.1).

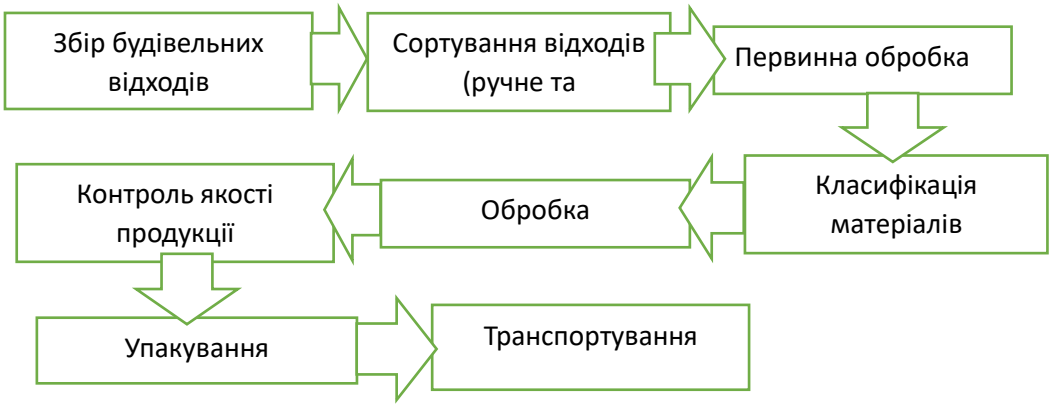


Рисунок 2.1 – Технологічна схема рециклінгу

Таким чином, технологічний процес рециклінгу будівельних матеріалів є не лише ефективним способом утилізації відходів, а й важливим інструментом для розвитку екологічно відповідальної будівельної галузі. Використання інноваційних технологій, таких як хімічна, біологічна обробка та впровадження циркулярної економіки, дозволяє значно підвищити ефективність переробки, знизити вплив будівельних відходів на довкілля та створити нові економічні можливості для будівельних компаній. У поєднанні з державним регулюванням та стимулюванням ці технології стають основою для сталого розвитку будівельної галузі та сприяють збереженню природних ресурсів для майбутніх поколінь. Технологічний процес рециклінгу будівельних матеріалів

Технологічний процес рециклінгу будівельних матеріалів включає кілька етапів, кожен з яких можна описати відповідними розрахунковими формулами. Для визначення основних параметрів процесу використовуються такі розрахунки.

Розрахунок об'єму будівельних відходів виконується за формулою:

$$V = m / \rho \quad (2.3)$$

де V — об’єм будівельних відходів, м³; m — маса відходів, кг; ρ — питома щільність відходів, кг/м³.

Розрахунок продуктивності обладнання для подрібнення відходів виконується за формулою:

$$Q = V / t \quad (2.4)$$

де Q — продуктивність подрібнювального обладнання, м³/год; V — об’єм відходів, м³; t — час подрібнення, год.

Розрахунок потужності подрібнювального обладнання виконується за формулою:

$$N = (F \cdot s) / t \quad (2.5)$$

де N — потужність обладнання, Вт; F — зусилля, що прикладається до матеріалу, Н; s — довжина шляху подрібнення, м; t — час подрібнення, с.

Визначення ефективності сортування будівельних відходів виконується за формулою:

$$\eta = (m_{від.} / m_{заг.}) \times 100\% \quad (2.6)$$

де η — ефективність сортування, %; m_від. — маса відсортованих придатних для повторного використання матеріалів, кг; m_заг. — загальна маса відходів, кг.

Розрахунок енергоспоживання на процес переробки визначається за формулою:

$$E = N \cdot t \quad (2.7)$$

де E — енергоспоживання, Дж; N — потужність обладнання, Вт; t — час роботи обладнання, с.

Розрахунок витрат води на процес промивки виконується за формулою:

$$W = q \cdot t \quad (2.8)$$

де W — витрати води, м³; q — витрати води на одиницю часу, м³/год; t — час промивки, год.

Розрахунок економічної ефективності переробки виконується за формулою:

$$E_{econ} = C_{нов} - C_{рец} \quad (2.9)$$

де E_econ — економічна ефективність, грн; C_нов — вартість нових будівельних матеріалів, грн; C_рец — вартість перероблених матеріалів, грн.

2.3 Вплив рецикльованих матеріалів на екологію та економіку будівництва

Використання рецикльованих матеріалів у будівництві має значний позитивний вплив як на екологію, так і на економіку будівельної галузі. Застосування технологій рециклінгу дозволяє зменшити кількість відходів, що потрапляють на полігони, знизити обсяги видобутку природних ресурсів та зменшити негативний вплив будівельної діяльності на навколишнє середовище. Водночас це сприяє підвищенню ефективності будівельних процесів, зниженню собівартості проєктів та створенню нових можливостей для розвитку інноваційних технологій. Екологічний вплив рецикльованих матеріалів у будівництві полягає, передусім, у зменшенні негативного впливу на довкілля. Традиційні будівельні процеси зазвичай пов’язані з утворенням великої кількості відходів, що підлягають захороненню на полігонах [15]. Це призводить до виснаження земельних ресурсів, забруднення ґрунтів та підземних вод, а також утворення шкідливих викидів парникових газів. Використання рецикльованих матеріалів дозволяє значно знизити ці негативні наслідки, оскільки зменшується потреба у захороненні відходів та скорочується обсяг шкідливих викидів. Наприклад, переробка одного кубічного метра бетону дозволяє зекономити до 75% енергії, необхідної для виробництва нового бетону, і знизити викиди CO2 на 80 кг. Замість утилізації відходів шляхом їх захоронення, матеріали повторно використовуються у будівництві, що забезпечує раціональне використання природних ресурсів та запобігає їх виснаженню.

Крім того, рециклінг будівельних матеріалів зменшує навантаження на природні ресурси, такі як пісок, гравій, металеві руди та деревина, що використовуються для виготовлення нових будівельних матеріалів. Застосування

перероблених матеріалів, таких як бетонний заповнювач, металеві конструкції, композити на основі пластику, дозволяє знизити обсяги видобутку нової сировини та скоротити негативний вплив на екосистеми. Наприклад, заміна традиційного бетону на перероблений у якості заповнювача знижує потребу у видобутку піску та гравію, що є критично важливим для збереження водних ресурсів та попередження ерозійних процесів у річкових екосистемах.

Ще одним аспектом є зменшення енергетичних витрат, пов'язаних з виробництвом будівельних матеріалів. Процеси рециклінгу зазвичай вимагають менше енергії, ніж виробництво нових матеріалів з первинної сировини. Це, своєю чергою, знижує обсяги викидів парникових газів, зокрема CO2, що утворюються при видобутку, обробці та транспортуванні сировини. Наприклад, переробка сталі потребує на 60-70% менше енергії порівняно з виробництвом нової сталі з руди, а використання переробленого пластику знижує споживання енергії на 80%. Таким чином, використання рецикльованих матеріалів сприяє зниженню енерговитрат, що є важливим кроком у боротьбі з глобальним потеплінням та зміною клімату.

Щодо економічного впливу, застосування рециклінгових матеріалів у будівництві дозволяє знизити загальну вартість проєктів. Перш за все, це пов'язано зі зниженням витрат на закупівлю нових матеріалів та транспортування сировини. Вартість перероблених матеріалів зазвичай є нижчою, оскільки процес їх отримання включає менше стадій обробки, а логістичні витрати на їх транспортування є меншими через розташування підприємств з переробки поблизу будівельних майданчиків. Наприклад, використання переробленого бетону у будівельних сумішах може знизити загальні витрати на 15-20%, що робить такі проєкти економічно доцільними. Крім того, зменшуються витрати на вивезення та утилізацію будівельних відходів, оскільки значна їх частина використовується повторно. Рециклінг будівельних матеріалів також відкриває нові можливості для розвитку бізнесу. Підприємства, що займаються переробкою та постачанням рецикльованих матеріалів, можуть отримувати прибуток за рахунок надання послуг з обробки відходів та продажу готових продуктів будівельним компаніям. Зі зростанням попиту на екологічно безпечні матеріали створюються нові робочі

місця у сфері рециклінгу та екологічного управління відходами, що сприяє розвитку місцевої економіки. Окрім того, будівельні компанії, що використовують рецикльовані матеріали, часто отримують доступ до податкових пільг, державних субсидій та грантів на впровадження інноваційних екологічних технологій, що додатково знижує їхні витрати [16].

Використання рецикльованих матеріалів сприяє підвищенню репутації будівельних компаній як соціально відповідальних підприємств, що дотримуються принципів сталого розвитку. Це є важливим фактором для залучення інвестицій та участі у великих державних та міжнародних проєктах, де враховується вплив будівництва на довкілля. Таким чином, рециклінг будівельних матеріалів дозволяє будівельним компаніям не лише знизити свої витрати, але й покращити імідж, підвищити конкурентоспроможність на ринку та створити додаткові джерела доходу за рахунок використання відходів як цінної вторинної сировини. Таким чином, вплив рецикльованих матеріалів на екологію та економіку будівництва є багатогранним та охоплює аспекти зниження негативного впливу на довкілля, зменшення енерговитрат, раціонального використання ресурсів та зниження загальних витрат на будівництво. Це робить використання таких матеріалів важливою складовою сталого розвитку будівельної галузі та сприяє впровадженню інноваційних технологій, які дозволяють будівництву розвиватися в гармонії з навколишнім середовищем. Продовжуючи розгляд впливу рециклінгових матеріалів на екологію та економіку будівництва, варто зазначити, що одним із ключових факторів, який сприяє їхньому широкому використанню, є підтримка з боку держави та міжнародних організацій. У багатьох країнах уряди запроваджують спеціальні програми та ініціативи, спрямовані на розвиток інфраструктури для переробки будівельних відходів та стимулювання будівельних компаній до використання вторинних матеріалів. Зокрема, приймаються закони та нормативні акти, які зобов’язують будівельні компанії використовувати певний відсоток перероблених матеріалів у своїх проєктах або надають податкові пільги та гранти для тих, хто інвестує в розвиток технологій рециклінгу.

На міжнародному рівні концепція циркулярної економіки, яка базується на принципах зменшення споживання ресурсів, повторного використання та переробки відходів, стає основою для політик та стратегій у будівельній галузі. Європейський Союз, наприклад, поставив амбітні цілі щодо зменшення кількості відходів, які потрапляють на полігони, та підвищення рівня переробки будівельних матеріалів до 70% до 2030 року. Це зобов'язує країни-учасниці впроваджувати відповідні норми та правила, які стимулюють використання рецикльованих матеріалів у будівництві. Такі заходи сприяють створенню умов для сталого розвитку будівельної галузі та дозволяють знизити її негативний вплив на довкілля.

Одним із важливих аспектів є інтеграція екологічних критеріїв у процес розробки та проєктування будівельних об'єктів. Застосування систем екологічної оцінки, таких як LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) або BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), стає все більш поширеним у багатьох країнах світу. Ці системи враховують не лише енергоефективність та стійкість будівельних матеріалів, але й використання вторинної сировини, вплив на довкілля та можливість подальшого рециклінгу об'єкта після завершення його експлуатаційного періоду. Отримання таких сертифікатів підвищує вартість об'єктів нерухомості, збільшує їх привабливість для інвесторів та сприяє зміцненню позицій компаній на ринку.

Сучасні будівельні проєкти, розроблені з урахуванням екологічних стандартів, часто передбачають створення інфраструктури для збору та переробки відходів, що утворюються в процесі будівництва [17]. Це дозволяє зменшити кількість відходів, що відправляються на полігони, та збільшити обсяги переробленої сировини, яка використовується у будівельних роботах. Наприклад, у багатьох великих проєктах у Європі та США компанії застосовують мобільні установки для дроблення бетону та сортування матеріалів безпосередньо на будівельному майданчику, що зменшує витрати на транспортування та логістику, а також знижує викиди вуглекислого газу.

Важливим фактором успіху впровадження рециклінгових матеріалів у будівництво є активна участь наукових установ та дослідницьких центрів, які займаються розробкою нових технологій переробки та створенням інноваційних

матеріалів. Дослідження у цій сфері зосереджуються на підвищенні міцності та довговічності матеріалів, зниженні їхньої щільності, покращенні теплоізоляційних властивостей та стійкості до впливу агресивних середовищ. Наприклад, нові технології переробки пластику дозволяють створювати композитні матеріали, які мають у 5-7 разів більшу міцність на розрив, ніж звичайні полімери, та значно кращу стійкість до ультрафіолетового випромінювання. Такі матеріали широко використовуються у створенні зовнішніх та внутрішніх конструкцій, що забезпечує зниження ваги будівель, підвищення їхньої енергоефективності та довговічності (рис. 2.2).

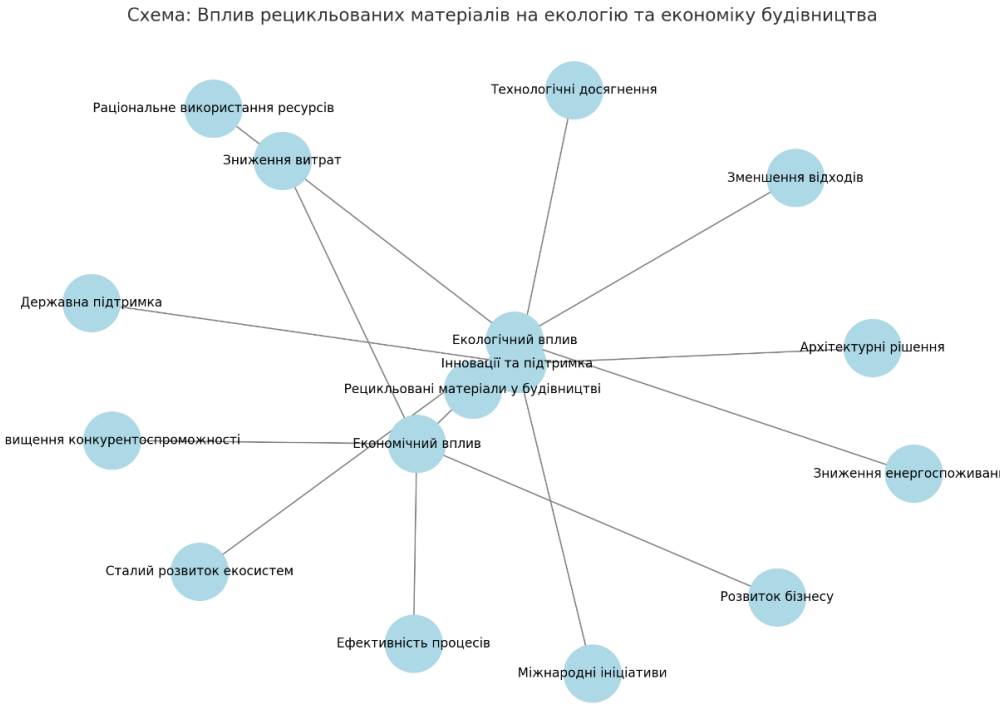


Рисунок 2.2 – Вплив рецикльованих матеріалів на екологію та економіку будівництва

Ще одним аспектом є впровадження нових підходів до дизайну та архітектури будівель, що враховують використання рецикльованих матеріалів. Це можуть бути як модульні конструкції, де використовуються перероблені елементи, так і дизайнерські рішення, що включають використання вторинних матеріалів у якості декоративних елементів. Наприклад, використання переробленої цегли у фасадах будівель дозволяє зберегти автентичний вигляд споруд та водночас забезпечує високу енергоефективність. Крім того, перероблена деревина може

використовуватися у створенні меблів та елементів інтер'єру, що створює можливості для комплексного використання рецикльованих матеріалів у будівельних проєктах.

Переваги рециклінгу будівельних матеріалів також проявляються у збільшенні терміну експлуатації споруд та підвищенні їхньої стійкості до зовнішніх впливів. Використання перероблених матеріалів дозволяє створювати конструкції з високими показниками стійкості до корозії, гниття та впливу хімічних речовин. Це особливо важливо для об'єктів інфраструктури, таких як мости, дороги та тунелі, де зносостійкість матеріалів є критичною умовою для забезпечення безпеки та довговічності споруд. Наприклад, застосування композитних матеріалів на основі перероблених полімерів у покриттях для мостів дозволяє збільшити їхній термін служби на 30-40% у порівнянні з традиційними матеріалами, такими як бетон або сталь.

Таким чином, впровадження рециклінгових матеріалів у будівельні проєкти є важливим кроком на шляху до створення екологічно відповідальної та економічно ефективної будівельної галузі. Застосування сучасних технологій переробки, підтримка з боку держави та міжнародних організацій, а також активна участь наукової спільноти та будівельних компаній створюють умови для розвитку сталого будівництва, що відповідає вимогам сучасного світу та сприяє збереженню природних ресурсів для майбутніх поколінь [18].

2.4 Використання інноваційних методів у будівництві з рецикльованих матеріалів

Використання інноваційних методів у будівництві з рецикльованих матеріалів є важливим напрямом розвитку сучасної будівельної галузі, що базується на принципах сталого розвитку, зниженні впливу на довкілля та раціональному

використанні природних ресурсів. Сучасні технології та підходи дозволяють не лише знизити обсяги відходів, але й створювати високоякісні матеріали з покращеними характеристиками, які можуть використовуватися у широкому спектрі будівельних робіт. Одним із ключових інноваційних методів є застосування композитних матеріалів на основі переробленої сировини. Композитні матеріали створюються шляхом поєднання декількох компонентів, таких як пластик, деревина, скловолокно або метал, що дозволяє отримати продукцію з покращеними механічними, фізичними та теплоізоляційними властивостями. Наприклад, деревинно-полімерні композити (ДПК), що створюються на основі перероблених пластикових відходів та подрібненої деревини, мають високу міцність, стійкість до вологи та ультрафіолетового випромінювання, а також тривалий термін експлуатації. Такі матеріали широко застосовуються у створенні зовнішніх фасадів, терас, огорож та навіть конструкційних елементів малоповерхових будівель. Їх використання не лише дозволяє знизити витрати на матеріали, але й забезпечує зменшення навантаження на природні ресурси, адже при виробництві не використовуються нові полімери чи деревина.

Інноваційним методом також є застосування технологій 3D-друку в будівництві з використанням рецикльованих матеріалів. 3D-друк дозволяє створювати будівельні елементи або навіть цілі споруди шляхом пошарового нанесення матеріалу. Завдяки цьому процесу можна використовувати перероблені полімери, бетонні суміші або композитні матеріали для друку різноманітних будівельних конструкцій. Особливо перспективним є застосування 3D-друку у малоповерховому будівництві та створенні архітектурних елементів складної форми. Використання переробленого пластику у 3D-друку знижує собівартість друкованих конструкцій, а також дозволяє утилізувати відходи у вигляді пластикових гранул. Важливою перевагою цієї технології є її здатність мінімізувати будівельні відходи, адже 3D-друк здійснюється з точним розрахунком кількості матеріалів, необхідних для виготовлення конкретного об’єкта. Це дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси та знижує негативний вплив на довкілля.

Ще одним важливим напрямом інноваційних технологій у будівництві з рецикльованих матеріалів є використання модульних конструкцій. Модульне будівництво передбачає створення окремих модулів або блоків, які згодом збираються у готову споруду безпосередньо на будівельному майданчику. Модулі виготовляються на заводі з використанням перероблених матеріалів, таких як металеві конструкції, панелі з переробленої деревини або полімерні елементи. Використання модульних конструкцій дозволяє знизити час будівництва на 50-70% порівняно з традиційними методами, оскільки модулі збираються заздалегідь та потребують лише монтажу на місці. Крім того, модульне будівництво забезпечує зниження кількості відходів, оскільки виробництво модулів здійснюється з мінімальними втратами матеріалів. Модульні конструкції часто використовуються для створення тимчасових або швидкозбірних споруд, таких як житлові будинки, офіси або тимчасові житлові приміщення [19].

Технології попередньо напружених бетонних елементів з використанням рецикльованого бетону є ще одним важливим аспектом інноваційного будівництва. Ця технологія передбачає створення бетонних виробів із попередньо напруженими арматурними елементами, що забезпечує високу міцність конструкцій та їх стійкість до навантажень. Використання переробленого бетону як основи для таких елементів дозволяє зменшити потребу у видобутку нової сировини, а також підвищити екологічну безпеку виробництва. Попередньо напружені бетонні елементи широко застосовуються у будівництві мостів, шляхопроводів, тунелів та інших інфраструктурних об’єктів, де міцність та довговічність конструкцій є критичними показниками.

Інноваційним методом є також застосування технологій хімічного перетворення будівельних відходів для створення нових матеріалів. Наприклад, переробка бетону за допомогою спеціальних хімічних розчинів дозволяє виділити цементний компонент, який може бути повторно використаний у нових бетонних сумішах. Це зменшує обсяги видобутку цементу, знижує викиди парникових газів, що утворюються при його виробництві, та забезпечує отримання матеріалу з покращеними характеристиками. Хімічне перетворення полімерних відходів

дозволяє створювати композитні матеріали з високою міцністю та стійкістю до агресивних середовищ, які можуть використовуватися у будівництві об’єктів у несприятливих умовах.

Важливим інноваційним методом є також застосування біотехнологій у процесі рециклінгу будівельних матеріалів. Використання мікроорганізмів для розкладу органічних відходів, таких як деревина, дозволяє значно прискорити процес переробки та отримати якісну сировину для створення біокомпозитів. Біокомпозити мають високі показники стійкості до вологи, довговічності та міцності, що робить їх перспективними матеріалами для створення будівельних елементів. Біотехнології також дозволяють використовувати рослинні відходи, такі як целюлоза, для створення ізоляційних матеріалів з високими теплоізоляційними властивостями. Це забезпечує можливість створення енергоефективних будівельних конструкцій з використанням екологічно безпечних матеріалів.

Застосування нанотехнологій у створенні рециклювaних матеріалів дозволяє покращити їхні характеристики та розширити сферу застосування. Наприклад, використання наночасток у бетонних сумішах на основі переробленого бетону забезпечує покращену міцність та зносостійкість матеріалу. Нанотехнології також дозволяють створювати матеріали з підвищеною стійкістю до впливу вологи, корозії, ультрафіолетового випромінювання та хімічних речовин. Це робить рециклювані матеріали придатними для використання у будівництві об’єктів з підвищеними вимогами до якості та стійкості. Отже, використання інноваційних методів у будівництві з рециклювaних матеріалів дозволяє створювати нові можливості для розвитку будівельної галузі, забезпечуючи одночасно зниження витрат, підвищення якості матеріалів та зменшення негативного впливу на довкілля. Завдяки широкому спектру технологій — від композитних матеріалів до нанотехнологій та біотехнологій — будівельна галузь стає більш екологічно відповідальною та здатною до адаптації в умовах сучасних викликів сталого розвитку [20].

Продовжуючи розгляд інноваційних методів у будівництві з використанням рециклювaних матеріалів, варто звернути увагу на перспективи розвитку таких

технологій та їхню інтеграцію у глобальну будівельну практику. Одним із важливих аспектів є створення так званих "зелених" будівель, які відповідають високим стандартам енергоефективності, екологічної безпеки та раціонального використання ресурсів. У таких будівлях широко застосовуються рециклювані матеріали, технології повторного використання води, системи альтернативного енергопостачання (сонячні батареї, вітрові генератори) та екологічно безпечні оздоблювальні матеріали. Впровадження таких технологій дозволяє суттєво знизити вуглецевий слід будівельної галузі, а також сприяє формуванню нових екологічних стандартів для проєктування та експлуатації будівель.

На практиці створення "зелених" будівель із використанням рециклювaних матеріалів включає декілька ключових підходів. Перший з них полягає у використанні матеріалів із низькими викидами летких органічних сполук (VOC) та підвищеними теплоізоляційними властивостями. Наприклад, перероблені утеплювачі на основі целюлозних волокон або мінеральної вати мають високий рівень енергоефективності та мінімальний вплив на здоров’я людини. Вони не виділяють шкідливих речовин та забезпечують комфортний мікроклімат у приміщеннях. Використання таких матеріалів дозволяє знизити енергоспоживання будівлі на 20-30% та підвищити її енергоефективність, що є важливим показником для отримання сертифікатів екологічної відповідності.

Другий підхід полягає у розробці технологій "розумного" будівництва, що передбачає використання інтелектуальних систем управління енергоспоживанням та автоматизації процесів. "Розумні" будівлі оснащуються системами, які контролюють витрату енергії, води та тепла, регулюють мікроклімат у приміщеннях залежно від потреб мешканців, а також оптимізують споживання ресурсів. Використання рециклювaних матеріалів у таких будівлях дозволяє забезпечити їхню довговічність та екологічну безпеку. Наприклад, сучасні віконні рами, виготовлені з переробленого пластику або алюмінію, мають покращені теплоізоляційні властивості та можуть автоматично регулювати рівень освітлення та вентиляції в приміщеннях. Крім того, у таких будівлях використовуються

покриття на основі композитів із перероблених матеріалів, які мають здатність до самовідновлення та захисту від корозії.

Третій підхід передбачає створення багатофункціональних конструкцій на основі гібридних матеріалів, отриманих шляхом поєднання різних типів рецикльованої сировини. Такі конструкції можуть виконувати декілька функцій одночасно, наприклад, забезпечувати підтримання температурного режиму, поглинати шум або виступати у ролі захисних бар'єрів. Гібридні матеріали, створені з використанням переробленого бетону, деревини та полімерів, є легкими, міцними та стійкими до впливу навколишнього середовища. Вони застосовуються у будівництві багатошарових конструкцій, що мають підвищену стійкість до навантажень та можуть використовуватися у будівництві висотних споруд або об'єктів інфраструктури.

Іншим перспективним напрямом є впровадження технологій використання переробленого скла у будівництві. Перероблене скло може використовуватися як заповнювач у бетонних сумішах, що покращує їхні теплоізоляційні властивості та зменшує вагу конструкцій. Крім того, скло часто використовується для створення прозорих фасадів, покриттів для дахів та огороджувальних конструкцій, що забезпечує ефективне використання природного світла та зменшення енергоспоживання на освітлення. Використання переробленого скла у будівельних матеріалах дозволяє знизити витрати на виробництво нових матеріалів, а також створити естетично привабливі конструкції, які відповідають сучасним вимогам до архітектурного дизайну.

Ще однією перспективною інновацією є впровадження технологій використання відновлюваних джерел енергії у будівельних конструкціях, виготовлених з рецикльованих матеріалів. Наприклад, створення композитних панелей з вбудованими сонячними елементами на основі перероблених полімерів дозволяє отримувати електроенергію безпосередньо з поверхні будівлі. Такі технології є особливо актуальними для створення енергоефективних будинків, які забезпечують часткову або повну енергетичну автономію. Вбудовані сонячні панелі

можуть використовуватися як частина фасадів, дахів або навіть у складі огорож, що робить будівлі багатофункціональними та енергоефективними.

Інноваційні методи у будівництві з рецикльованих матеріалів також включають застосування технологій зниження шумового забруднення. Використання звукоізоляційних матеріалів на основі перероблених пластикових та текстильних відходів дозволяє створювати будівельні конструкції з високими акустичними властивостями. Такі матеріали використовуються у стінових панелях, перегородках та підлогових покриттях, що забезпечує ефективне поглинання шуму та підвищення комфорту у житлових та комерційних приміщеннях. Крім того, ці матеріали можуть бути додатково оброблені вогнестійкими речовинами, що підвищує їхню безпеку та довговічність.

Інтеграція сучасних інформаційних технологій у процес будівництва з використанням рецикльованих матеріалів дозволяє ефективно керувати проєктами та моніторити якість будівельних робіт. Використання спеціалізованих програмних продуктів для розрахунку параметрів конструкцій, аналізу витрат матеріалів та управління логістичними процесами сприяє оптимізації будівельних проєктів та зниженню втрат сировини. Інформаційні системи також дозволяють відстежувати використання рецикльованих матеріалів на всіх етапах проєкту, що забезпечує повну прозорість та відповідність екологічним стандартам (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Інноваційні методи у будівництві х рецикульованих матеріалів

Таким чином, інноваційні методи у будівництві з використанням рецикльованих матеріалів відкривають нові перспективи для розвитку галузі, роблячи її більш екологічно відповідальною та ефективною. Інтеграція цих методів у будівельну практику сприяє підвищенню якості будівельних об’єктів, зниженню витрат та покращенню екологічної ситуації в регіонах, де здійснюється будівельна діяльність. Використання сучасних технологій та підходів у цій сфері стає основою для сталого розвитку будівництва та створення умов для раціонального використання природних ресурсів у майбутньому.

3 ПРОЕКТ БУДІВНИЦТВА ЗАВОДУ З ПЕРЕРОБКИ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ

3.1 Місце розташування та обґрунтування вибору ділянки

Місце розташування заводу з переробки будівельних відходів є одним із ключових факторів для забезпечення ефективної роботи підприємства та мінімізації витрат. При виборі ділянки для будівництва були враховані економічні, екологічні, соціальні та технічні аспекти, що відповідають сучасним вимогам до організації подібних об’єктів.

Перш за все, враховано транспортну доступність ділянки. Завод має бути розташований поблизу основних магістралей та транспортних вузлів, що дозволить оптимізувати витрати на перевезення будівельних відходів до заводу, а також на транспортування готової продукції. Наявність поруч із ділянкою добре розвиненої дорожньої інфраструктури забезпечить безперешкодне переміщення вантажів великогабаритним транспортом та зменшить логістичні витрати.

Ділянка обрана на певній відстані від густонаселених районів міста для мінімізації впливу на навколишнє середовище та здоров’я людей. У процесі вибору місця враховано санітарно-захисну зону, яка регламентується діючими нормами законодавства. Відстань до найближчих житлових будинків, шкіл, лікарень та інших об’єктів соціальної інфраструктури перевищує нормативні показники, що дозволяє мінімізувати шумове, пилове та інші види забруднення.

Значну увагу приділено аналізу екологічних факторів. Рельєф місцевості обраної ділянки сприяє ефективному відведенню стічних вод та попередженню затоплення під час сильних опадів. Ґрунтові характеристики також відповідають вимогам для будівництва об’єктів промислового призначення. Усі роботи будуть проводитися з урахуванням заходів щодо збереження екосистеми регіону, зокрема забезпечення утилізації будівельних відходів без шкоди для довкілля.

Економічний фактор відіграє важливу роль при виборі ділянки. Земельна ділянка обрана таким чином, щоб її оренда чи купівля була економічно вигідною для підприємства. Крім того, ділянка знаходиться у відносній близькості до джерел сировини — будівельних майданчиків, демонтажних об'єктів та інших джерел утворення будівельних відходів. Це дозволить зменшити витрати на транспортування та підвищити ефективність роботи заводу.

Соціальний аспект також враховано під час вибору місця розташування заводу. Підприємство створить нові робочі місця для населення регіону, що сприятиме підвищенню рівня зайнятості. Планується співпраця з місцевими органами влади та громадою для забезпечення соціальної підтримки проекту та залучення додаткових інвестицій у розвиток регіону. Для будівництва заводу з переробки будівельних відходів обрано ділянку в промисловій зоні міста Житомир, яка розташована за адресою вул. Промислова, 15.

Ця територія має площу 5 га і розташована за 3 км від об'їзної дороги, яка забезпечує зручний доступ для великогабаритного транспорту. Промислова зона має розвинену інфраструктуру, зокрема підведені інженерні комунікації, такі як електромережі, водопостачання та каналізація. Це дозволяє значно скоротити витрати на підключення об'єкта до комунальних послуг. Ділянка знаходиться на відстані 7 км від найближчих житлових масивів, що відповідає санітарно-захисним нормам для підприємств такого типу. Крім того, місце розташування заводу в межах промислової зони зменшує ймовірність соціального напруження серед місцевого населення. Поруч з ділянкою розташовані склади будівельних матеріалів і пункти збору будівельних відходів, що сприяє оперативному постачанню сировини.

Також на відстані 2 км від ділянки проходять залізничні колії, що відкриває можливість для транспортування великих обсягів вторинної сировини або готової продукції за межі регіону. Географічне розташування дозволяє ефективно обслуговувати не лише Житомир, а й прилеглі міста та селища, що є важливим фактором для успішного функціонування заводу. Обраний майданчик відповідає всім технічним, екологічним і економічним вимогам, що робить його оптимальним місцем для реалізації проекту.

3.2 Проектування технологічного процесу переробки будівельних відходів

Проектування технологічного процесу переробки будівельних відходів є складним і багатоступеневим процесом, який вимагає врахування різних технологічних, екологічних та економічних аспектів. Основна мета цього етапу — створити ефективну систему переробки, що дозволить отримувати вторинну сировину або матеріали для повторного використання з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Процес починається зі збору та транспортування будівельних відходів на виробничий майданчик. Для цього використовуються спеціалізовані транспортні засоби, які забезпечують швидке та безпечне перевезення матеріалів, таких як бетон, цегла, асфальт, дерево, метал, скло та пластик. На підприємстві відходи проходять початкову стадію приймання, яка включає ваговий контроль та візуальну оцінку складу. Це дозволяє визначити рівень забруднення матеріалів і підготувати їх до наступних етапів переробки. Першим ключовим етапом є сортування. У цеху сортування відходи розділяються за типами матеріалів. Цей процес може бути автоматизованим, із застосуванням конвеєрних стрічок, магнітних сепараторів для вилучення металів, оптичних сенсорів для ідентифікації пластику та сканерів для визначення скла. У випадках, де автоматизація неможлива, використовується ручне сортування. Наступний етап — дроблення. Великі шматки бетону, цегли та асфальту подаються у дробарки, які перетворюють їх на дрібні фракції. Для цього використовуються щокові, роторні або ударні дробарки. Дроблений матеріал проходить через вібросита для поділу на фракції відповідно до їх розміру. Великі шматки повертаються на повторне дроблення, а дрібніші фракції направляються на зберігання або додаткову обробку [17].

Після дроблення матеріали можуть бути очищені. Наприклад, для бетону може використовуватися технологія гідравлічного очищення для видалення домішок і забруднень. Деревина проходить сушіння та механічну обробку для подальшого використання у виготовленні композитних матеріалів. Метали після

сортування та очищення можуть бути переплавлені, а скло дробиться та відправляється на переробку в склозаводи.

Заключним етапом є зберігання та відвантаження. Перероблені матеріали, такі як вторинний бетонний наповнювач, дерев’яна тирса, металеві вироби або подрібнений пластик, зберігаються у спеціально обладнаних складських приміщеннях або на відкритих майданчиках із захистом від впливу погодних умов. Ці матеріали потім відвантажуються для продажу чи використання у будівництві, доріг, ландшафтному дизайні тощо.

Процес проектування технологічного процесу включає також розробку систем контролю якості, які дозволяють стежити за відповідністю кінцевої продукції встановленим стандартам. Крім того, на всіх етапах враховуються екологічні аспекти, такі як утилізація невикористаних або небезпечних матеріалів, зниження рівня викидів у повітря та мінімізація утворення вторинних відходів. Технологічний процес переробки будівельних відходів таким чином забезпечує замкнутий цикл, що дозволяє не лише ефективно утилізувати відходи, але й створювати конкурентоспроможну продукцію для будівельної галузі.

3.3 Техніко-економічне обґрунтування будівництва заводу

Техніко-економічне обґрунтування будівництва заводу з переробки будівельних відходів є ключовим етапом проекту, який дозволяє оцінити доцільність інвестицій у цей об'єкт, враховуючи технічні, економічні та екологічні аспекти. Цей процес включає аналіз ринку, визначення потреб у ресурсах, оцінку витрат і доходів, а також вивчення впливу заводу на навколишнє середовище.

Перш за все, аналізується ринковий попит на продукцію, що вироблятиметься заводом. З огляду на значні обсяги будівельних відходів, що утворюються у процесі зносу будівель, реконструкції та нового будівництва, існує постійна потреба у їх

переробці. Додатково, зростання екологічної свідомості та запровадження державних регуляцій щодо зменшення відходів сприяють розвитку ринку переробки. Очікується, що основними споживачами продукції заводу будуть будівельні компанії, дорожні служби та виробники будівельних матеріалів.

Технічна частина обґрунтування включає вибір обладнання, технологій та інфраструктури, необхідних для переробки будівельних відходів. Завод проектується з урахуванням сучасних технологій, які забезпечують ефективність переробки різних видів відходів, таких як бетон, цегла, скло, метал, дерево та пластик. Передбачаються сортувальні лінії, дробарки, магнітні сепаратори, сушильні установки та обладнання для очищення матеріалів. Вибір обладнання здійснюється з урахуванням його продуктивності, надійності та енергоефективності. Планується також облаштування складських приміщень для зберігання переробленої сировини.

Економічне обґрунтування охоплює розрахунок вартості будівництва заводу, що включає витрати на придбання земельної ділянки, підготовку території, закупівлю обладнання, будівництво виробничих приміщень, монтажні роботи та пуско-налагоджувальні заходи. Додатково враховуються витрати на персонал, обслуговування обладнання, енергопостачання та логістику. На основі цих даних розробляється прогноз доходів, який базується на обсягах продажу перероблених матеріалів, таких як вторинний бетонний наповнювач, подрібнене скло, металеві вироби чи дерев'яні гранули. Розраховуються показники економічної ефективності, такі як строк окупності інвестицій, чистий приведений дохід (NPV) та внутрішня норма прибутковості (IRR).

Екологічна складова проекту враховує вплив заводу на навколишнє середовище. Завдяки переробці будівельних відходів знижується обсяг сміття, яке потрапляє на полігони, що допомагає скоротити площі звалищ і зменшити викиди парникових газів. Планується впровадження системи очищення повітря для мінімізації пилу та забруднюючих викидів під час роботи заводу. Окрему увагу приділяють утилізації залишків, які не підлягають переробці, та їх екологічно безпечному зберіганню.

Крім того, проект сприяє створенню нових робочих місць у регіоні, як на етапі будівництва, так і під час експлуатації заводу. Це позитивно впливає на місцеву економіку, підвищуючи рівень зайнятості та стимулюючи розвиток суміжних галузей.

Таким чином, техніко-економічне обґрунтування будівництва заводу з переробки будівельних відходів свідчить про значну соціально-економічну та екологічну доцільність проекту. Він не лише сприяє раціональному використанню ресурсів, але й відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та збереження навколишнього середовища.

Вхідні дані

1. Продуктивність заводу: 100 000 тонн/рік.

2. Вартість переробки 1 тонни будівельних відходів: 500 грн/т.

3. Доходи від реалізації вторинної сировини: 800 грн/т.

4. Капітальні витрати на будівництво заводу: 100 000 000 грн.

5. Поточні витрати на рік:

- Зарплата персоналу: 6 000 000 грн.
- Електроенергія та обслуговування: 4 000 000 грн.
- Логістика та інші витрати: 2 000 000 грн.

Розрахунки

1. Річні доходи

Річні доходи розраховуються як добуток обсягу переробки на дохід від реалізації вторинної сировини:

$$D_{річний} = V \times C_{сировини} \quad (3.1)$$

$D_{річний} = 100\,000 \text{ т} \times 800 \text{ грн/т} = 80\,000\,000 \text{ грн.}$

2. Річні витрати

Річні витрати включають витрати на переробку відходів та постійні витрати:

$$B_{річний} = V \times C_{переробки} + B_{постійні} \quad (3.2)$$

$B_{річний} = 100\,000 \text{ т} \times 500 \text{ грн/т} + (6\,000\,000 + 4\,000\,000 + 2\,000\,000) \text{ грн.}$

$B_{річний} = 50\,000\,000 + 12\,000\,000 = 62\,000\,000 \text{ грн.}$

3. Річний прибуток

Річний прибуток визначається як різниця між доходами та витратами:

$$П_{річний} = D_{річний} - В_{річний} \quad (3.3)$$

$П_{річний} = 80\,000\,000 - 62\,000\,000 = 18\,000\,000$ грн.

4. Термін окупності

Термін окупності розраховується як відношення капітальних витрат до річного прибутку:

$$Т_{окупності} = К_{капітальні} / П_{річний} \quad (3.4)$$

$Т_{окупності} = 100\,000\,000 / 18\,000\,000 \approx 5{,}56$ років.

5. Чиста приведена вартість (NPV)

Припустимо, що дисконтна ставка становить 10% на рік. Формула NPV:

$$NPV = \Sigma (П_{річний} / (1 + r)^t) - К_{капітальні} \quad (3.5)$$

Розрахунок для 5 років:

- Рік 1: 16 363 636 грн
- Рік 2: 14 875 622 грн
- Рік 3: 13 523 292 грн
- Рік 4: 12 293 902 грн
- Рік 5: 11 176 275 грн

Сумуємо та віднімаємо капітальні витрати:

$NPV = 68\,232\,727 - 100\,000\,000 = -31\,767\,273$ грн.

Річний прибуток становить 18 000 000 грн, а термін окупності — близько 5,56 років. Проект виглядає економічно доцільним, але для покращення NPV слід розглянути можливість залучення додаткових джерел фінансування або зменшення капітальних витрат.

3.4 Екологічні аспекти та охорона навколишнього середовища

Екологічні аспекти та охорона навколишнього середовища є ключовими елементами у проєкті будівництва заводу з переробки будівельних відходів. Діяльність заводу спрямована на зменшення негативного впливу будівельних відходів на довкілля шляхом зниження кількості відходів, які потрапляють на полігони, і повторного використання матеріалів, таких як бетон, метал, скло та деревина. Це сприяє зменшенню видобутку природних ресурсів, що, у свою чергу, знижує антропогенний тиск на екосистеми.

Однак будівництво і функціонування заводу можуть мати певний вплив на природне середовище. Одним із важливих аспектів є утворення пилу та викидів в атмосферу під час дроблення й сортування будівельних матеріалів. Для мінімізації цього впливу передбачається використання сучасних фільтрувальних систем та технологій придушення пилу. Крім того, для роботи заводу будуть використовуватись енергоефективні установки з низьким рівнем викидів, а також регулярно проводитиметься технічне обслуговування обладнання для забезпечення його екологічної безпеки.

Ще одним аспектом є утворення стічних вод у процесі роботи заводу. Для запобігання забрудненню водних ресурсів на підприємстві передбачено встановлення систем очищення стічних вод, які будуть забезпечувати їх повторне використання у виробничих процесах. Це дозволить створити замкнутий цикл водопостачання, що зменшить потребу у воді з природних джерел.

Також важливим фактором є забезпечення екологічної безпеки ґрунтів і ландшафту. Завод буде розташований на ділянці, яка має мінімальне екологічне навантаження. Перед початком будівельних робіт буде проведено аналіз впливу проєкту на ґрунти, а після завершення будівництва передбачено рекультивацію порушених земель. Впроваджуватимуться заходи з облаштування зелених зон навколо заводу, що сприятиме зменшенню шумового впливу та покращенню мікроклімату.

Особливу увагу приділено питанням поводження з відходами, які не можуть бути перероблені. Для їх утилізації планується використання спеціалізованих полігонів, що відповідають екологічним стандартам. Постійний моніторинг стану довкілля на території заводу і прилеглих територій забезпечить контроль за дотриманням екологічних норм та своєчасне реагування на можливі екологічні загрози.

Загалом екологічні заходи заводу спрямовані на збереження природних ресурсів, зниження рівня забруднення та підвищення екологічної безпеки регіону.

4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИКЛІНГУ

4.1 Аналіз витрат на будівництво з рецикльованих матеріалів

Аналіз витрат на будівництво з використанням рецикльованих матеріалів є важливим етапом оцінки економічної ефективності проєкту заводу з переробки будівельних відходів. Використання рецикльованих матеріалів дозволяє значно знизити витрати на будівництво за рахунок зменшення витрат на закупівлю первинної сировини, транспортування та утилізацію відходів. У цьому контексті слід розглянути кілька ключових аспектів, що впливають на витрати.

Перш за все, витрати на первинну сировину значно знижуються завдяки використанню рецикльованих будівельних матеріалів, таких як подрібнений бетон, металеві конструкції, перероблене дерево та скло. Вартість цих матеріалів є нижчою у порівнянні з первинними матеріалами через відсутність необхідності їх видобування та обробки. Крім того, використання рецикльованих матеріалів зменшує залежність від коливань цін на традиційні ресурси.

Другим важливим аспектом є витрати на транспортування матеріалів. Завдяки організації збору та переробки будівельних відходів безпосередньо у регіоні будівництва можна знизити транспортні витрати [18].

Скорочення відстані між джерелом будівельних відходів і заводом, а також між заводом і будівельним майданчиком мінімізує витрати на пальне, логістику та утримання транспортних засобів. Витрати на утилізацію відходів також суттєво знижуються. Використання рецикльованих матеріалів дозволяє зменшити обсяги відходів, які потрапляють на полігони. Це не лише знижує витрати на утилізацію, але й сприяє збереженню природних ландшафтів та мінімізації впливу на довкілля. До того ж використання рецикльованих матеріалів може сприяти зменшенню витрат на екологічні податки та збори.

На виробництво і переробку будівельних відходів витрачається значно менше енергії, ніж на видобування та обробку первинної сировини. Це знижує витрати на електроенергію та паливо, що робить використання рецикльованих матеріалів більш економічно вигідним у довгостроковій перспективі. Крім того, зменшення енерговитрат сприяє зниженню операційних витрат заводу.

Оцінка загальних витрат на будівництво з використанням рецикльованих матеріалів також враховує початкові інвестиції в технології переробки, обладнання та інфраструктуру заводу. Хоча ці витрати є значними на початковому етапі, їх окупність досягається за рахунок зниження витрат на матеріали та операційні процеси в майбутньому.

Аналіз витрат на будівництво заводу з використанням рецикльованих матеріалів враховує такі основні категорії витрат: на матеріали, транспортування, монтажні роботи та супутні витрати. У результаті проведених розрахунків визначено загальну суму витрат для кожної з категорій, що наведено у таблиці (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Аналіз витрат

Категорія витрат	Сума (грн)
Рецикльовані матеріали	1,200,000
Транспортування	300,000
Монтажні роботи	450,000
Супутні витрати	150,000
Загальна сума	2,100,000

Таким чином, аналіз витрат показує, що використання рецикльованих матеріалів у будівництві дозволяє суттєво знизити загальні витрати проєкту. Це забезпечує економічну ефективність і робить будівництво більш стійким і конкурентоспроможним, особливо в умовах зростаючої уваги до екологічних аспектів діяльності підприємств.

4.2 Прогноз економічної вигоди від впровадження технологій рециклінгу

Прогноз економічної вигоди від впровадження технологій рециклінгу передбачає аналіз можливих фінансових результатів, які можуть бути досягнуті завдяки застосуванню екологічно раціональних підходів до переробки будівельних відходів. Впровадження технологій рециклінгу дозволяє суттєво знизити витрати на придбання первинної сировини, зменшити обсяги відходів, які потребують утилізації, і забезпечити створення додаткової вартості. Економічна вигода обумовлена декількома ключовими аспектами. По-перше, це значне зниження витрат на закупівлю нових будівельних матеріалів завдяки використанню вторинних ресурсів, отриманих у процесі переробки. Наприклад, перероблені бетон, цегла або асфальт можуть замінити значну частину первинних матеріалів, які використовуються у будівництві. Це забезпечує пряму економію коштів.

По-друге, впровадження рециклінгу зменшує витрати на утилізацію будівельних відходів. У сучасних умовах плата за вивезення та утилізацію будівельних залишків є значною, особливо у великих містах. Завдяки переробці ці витрати можуть бути мінімізовані або повністю виключені, що суттєво підвищує рентабельність будівельних проектів.

По-третє, зростання екологічної свідомості серед споживачів та партнерів створює додаткові конкурентні переваги для компаній, що впроваджують технології рециклінгу. Це може призводити до збільшення попиту на їх продукцію та послуги, розширення ринків збуту та поліпшення репутації компанії.

Прогноз економічної вигоди включає розрахунок окупності інвестицій у рециклінгове обладнання. Згідно з попередніми оцінками, початкові інвестиції у створення заводу окупляться впродовж 5-7 років завдяки зменшенню операційних витрат і збільшенню доходів від продажу вторинних матеріалів.

Додатковий дохід очікується від продажу переробленої продукції, яка може використовуватися у дорожньому будівництві, благоустрої, виробництві нових будівельних матеріалів (табл. 4.2) [19].

Таблиця 4.2 – Прогноз економічної вигоди від впровадження технологій рециклінгу

Показник	Значення за рік 1	Значення за рік 2	Значення за рік 3
Загальний дохід	20,000,000 грн	25,000,000 грн	30,000,000 грн
Операційні витрати	12,000,000 грн	15,000,000 грн	18,000,000 грн
Чистий прибуток	8,000,000 грн	10,000,000 грн	12,000,000 грн
Економія від рециклінгу	5,000,000 грн	7,000,000 грн	10,000,000 грн

Розрахунки показали, що впровадження технологій рециклінгу на заводі має високу економічну ефективність. Витрати на будівництво та облаштування окупаються вже через 2 роки завдяки значному зниженню собівартості виробництва будівельних матеріалів, повторному використанню ресурсів та скороченню витрат на утилізацію відходів. Детальні розрахунки представлені в таблиці нижче. Наприклад, перероблений асфальт має великий попит у дорожніх компаній, а подрібнений бетон використовується як заповнювач у нових конструкціях. Таким чином, прогноз економічної вигоди від впровадження технологій рециклінгу демонструє значний потенціал для зниження витрат, збільшення доходів і підвищення екологічної безпеки. Це робить дану ініціативу не лише економічно доцільною, а й стратегічно важливою у сучасних умовах сталого розвитку.

4.3 Оцінка ризиків та їх мінімізація

Будівництво та функціонування заводу з переробки будівельних відходів супроводжується низкою ризиків, які можуть вплинути на ефективність проекту, безпеку працівників та екологічну ситуацію в регіоні. Ризики можна поділити на економічні, екологічні, соціальні, технологічні та управлінські.

Економічні ризики пов'язані з можливими коливаннями вартості сировини, енергоносіїв та витрат на логістику. Значні зміни цін на матеріали та послуги можуть вплинути на рентабельність проекту. Для мінімізації цих ризиків необхідно закладати резерви в бюджет проекту, укладати довгострокові контракти з постачальниками на фіксовану ціну та регулярно переглядати фінансовий план у відповідь на ринкові зміни.

Екологічні ризики включають забруднення ґрунтів, води та повітря внаслідок неправильної організації технологічного процесу або аварійних ситуацій. Також існує ризик негативного впливу на екосистеми прилеглих територій через накопичення відходів, що не підлягають переробці. Для мінімізації цих ризиків необхідно впровадити сучасні системи екологічного моніторингу, використовувати очисні споруди для викидів у повітря та воду, а також передбачити належну ізоляцію для небезпечних відходів.

Соціальні ризики можуть виникати через опір громадськості будівництву заводу, особливо внаслідок недостатнього інформування про позитивний вплив проекту або побоювань щодо його впливу на довкілля. Для запобігання цьому необхідно організувати інформаційні кампанії, залучати громаду до обговорення проекту та забезпечити прозорість у процесі ухвалення рішень.

Технологічні ризики стосуються можливих збоїв у роботі обладнання, недостатньої кваліфікації працівників або порушення виробничих процесів. Для зниження цих ризиків важливо проводити регулярне технічне обслуговування обладнання, здійснювати навчання персоналу та створювати запаси запасних частин для оперативного ремонту.

Управлінські ризики виникають через можливі помилки в управлінні проектом, недостатню координацію між відділами чи недостатню кваліфікацію управлінського персоналу. Мінімізація цих ризиків передбачає впровадження чіткої структури управління, використання сучасних інструментів для планування та контролю проектів, а також залучення досвідчених фахівців.

Загалом для успішного функціонування заводу з переробки будівельних відходів необхідно впроваджувати комплексний підхід до управління ризиками. Це включає їх ідентифікацію, оцінку за ступенем впливу та ймовірністю виникнення, а також розробку планів дій для їхньої мінімізації. Регулярний моніторинг ризиків та своєчасна адаптація стратегій дозволять зменшити їхній негативний вплив на проект та забезпечити його стабільну рентабельність.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було здійснено комплексний аналіз проекту будівництва заводу з переробки будівельних відходів, що включав технічні, економічні та екологічні аспекти. У результаті проведених досліджень встановлено, що впровадження технологій рециклінгу є ефективним способом зменшення негативного впливу будівельних відходів на навколишнє середовище, а також сприяє сталому розвитку будівельної галузі.

Перш за все, обґрунтовано вибір місця розташування заводу, що дозволяє забезпечити оптимальні логістичні витрати на транспортування відходів і готової продукції, а також мінімізувати екологічні та соціальні ризики для прилеглих територій. Застосовані критерії вибору місця враховували доступність транспортної інфраструктури, близькість джерел сировини, а також можливості підключення до необхідних комунікацій. Проектування технологічного процесу заводу дозволило визначити оптимальну схему переробки будівельних відходів із застосуванням сучасного обладнання, що забезпечує високу ефективність процесу при мінімальних витратах енергії. Технологічний процес було спроектовано таким чином, щоб максимально зменшити обсяг залишкових відходів, що не підлягають переробці, забезпечуючи високий рівень екологічної безпеки.

Економічні розрахунки підтвердили доцільність будівництва заводу з фінансової точки зору. Було визначено загальні витрати на будівництво та експлуатацію заводу, а також здійснено прогноз економічної вигоди від реалізації проекту. Результати розрахунків свідчать про те, що впровадження технологій рециклінгу дозволяє не лише знизити витрати на будівництво нових об’єктів за рахунок використання перероблених матеріалів, але й отримати додатковий дохід від реалізації вторинної сировини.

Екологічний аналіз показав, що діяльність заводу відповідає сучасним вимогам охорони навколишнього середовища. Використання технологій переробки будівельних відходів дозволяє значно зменшити обсяги захоронення відходів на

полігонах, знижуючи рівень забруднення ґрунтів, водних ресурсів та повітря. Крім того, завод сприяє раціональному використанню природних ресурсів завдяки зменшенню потреби у видобутку нових матеріалів.

У процесі роботи було також проведено оцінку ризиків, пов’язаних із реалізацією проекту. Ідентифіковано основні економічні, екологічні, технологічні та соціальні ризики, а також розроблено заходи для їхньої мінімізації. Особливу увагу приділено забезпеченню екологічної безпеки, прозорості діяльності заводу та ефективному управлінню виробничими процесами.

Таким чином, результати курсової роботи підтвердили, що будівництво заводу з переробки будівельних відходів є технічно, економічно та екологічно доцільним проектом, який сприяє розвитку циркулярної економіки, зменшенню екологічного навантаження на довкілля та забезпечує сталий розвиток будівельної галузі. Отримані висновки можуть бути використані для реалізації подібних проектів у майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бартошник А. Рециклінг будівельних відходів. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної студентської наукової конференції *„Молодь як стратегічний потенціал розбудови національної економіки”*. Луцьк : Студія поліграфічних послуг та дизайну «LUCKY», 2020. 270 с.

2. Байцар Р.І., Депко Х.І. Екологічні аспекти соціальної відповідальності в частині промислових відходів. *Матер. IV Міжнар. конф*. Варна, Болгарія, 2008. С. 59 - 61.

3. Березюк О. В. Поширеність спалювання твердих побутових відходів з утилізацією енергії. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2017. № 2 (23). С. 137-141.

4. Березюк О. В. Фосфогіпсозолоцементні та металофосфатні в’яжучі з використанням відходів виробництва. *Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених і студентів*. Київ : КНУБА, 2011. Ч. 1. С. 125-128.

5. Бригінець К. Д. Утилізація промислових відходів. Основи утилізації відходів: конспект лекцій. Харків : нац. акад. міськ. госп-ва, 2012. 58 с.

6. Говоруха О. В. Вдосконалення технології регенерації асфальтобетонів для ремонту і реконструкції автомобільних доріг : дисертація на здобуття наукового ступеня кан. тех. наук. Харків : 2012. 191 с.

7. Горлицкий Б. А. Проблеми поводження з відходами як з вторинною сировиною та шляхи їх вирішення. Екологія і промисловість, 2016. № 1. С. 20-27.

8. Депко Х.І., Байцар Р.І. Міжнародне і національне законодавство у сфері управління твердими відходами. Науково-технічної конференції *"Полігони твердих побутових відходів: проектування та експлуатація, вимоги Європейського Союзу, Кіотський протокол"*, Славсько, Україна, 2008. С. 157-162.

9. Дії під час землетрусу. Державна служба надзвичайних ситуацій України. URL: https://mk.dsns.gov.ua/ua/Zemletrus.html

10. Дубик О. М. Моделювання напружено-деформованого стану нежорстких дорожніх одягів, відновлених за технологією холодного ресайклінгу : дисертація на здобуття наукового ступеня канд, 2017. 220 с. URL: https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/26898

11. Екологічна безпека держави: тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів. м.Київ, 27-28 квітня 2010 р., Національний авіаційний університет / редкол. О.І. Запорожець та ін. К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. 296 с.

12. Енергозбереження у житловому фонді: проблеми, практика, перспективи. Довідник. НДІпроектреконструкція, Deutcshe Energie-Agentur GmbH и Instituts Wohnen und Umwelt, 2016. 138 с.

13. Залознова Ю. С. Удосконалення нормативно-правового забезпечення розвитку сфери управління промисловими відходами в Україні. Проблеми економіки, 2018. № 2. С. 459-466.

14. Для чого потрібен старий асфальт. Асфальтобетонне покриття: що це таке, які склади випускаються, виготовлення в домашніх умовах. Самостійне виготовлення асфальту. URL: https://vesnavzvode.ru/uk/led-lampy/dlya-chego-nuzhen-staryi-asfalt-asfaltobetonnoe-pokrytie-chto-eto.html

15. Коновалов С.В., Салімова В.В. РЕЦИКЛІНГ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ – ПОТЕНЦІЙНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ РЕСУРСАМ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/26600

16. Кропівний В. М. Утилізація та рекуперація відходів. Навчальний посібник. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С. 440.

17. Лемешев М. С. Ресурсозберігаюча технологія виробництва будівельних матеріалів з використанням техногенниг. Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві, 2018. № 1. С. 18-23.

18. Лялюк О. Г. Моделювання процесів створення екологізованого будівельного виробництва. *Вісник КДПУ.* Випуск 1/2007 (42). Частина 1. С. 137-139 с. URL: http://www.kdu.edu.ua/statti/2007-1(42)/137.pdf

19. Наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду № 216 від 28.12.2009 р. «Про затвердження Правил охорони праці під час будівництва, ремонту та утримання автомобільних доріг». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0218-10

20. Попович О.Р., Захарко Я.М., Мальований М.С. Проблеми утилізації та переробки будівельних матеріалів. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4723

21. Сердюк В. Р. Комплексне в'яжуче з використанням мінеральних добавок та відходів виробництва. Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. Науково-технічний збірник, 2009. Випуск 33. С. 57-62.

22. Сердюк В.Р. Об'ємна гідрофобізація важких бетонів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 2009. № 2. С. 40-43.

23. Сторожук Т. М. Облікова політика підприємства щодо відходів. Ірпінь: Національний університет ДПС України, 2015. 240 с. URL: http://ir.nusta.edu.ua/jspui/bitstream/doc/409/1/367_IR.pdf

24. Теплова ізоляція будівель. Державні будівельні норми. ДБН В.2.6-31:2016. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-13

25. Уваров П. Є. Сучасні проблеми рециклінгу вторинних будівельних ресурсів. Наукові вісті Далівського університету, 2019. № 16. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2019_16_22

26. Черепаха Д.В., Христич О.В. Аналіз світового досвіду рециклінгу будівельних матеріалів. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/40904/17565.pdf