

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ГІРНИЧОЇ СПРАВИ, ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА
БУДІВНИЦТВА
КАФЕДРА НАУК ПРО ЗЕМЛЮ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри наук про Землю

_____ Олена ГЕРАСИМЧУК
« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»

зі спеціальності 103 «Науки про Землю»

на тему: **«Аналіз ефективності сучасних методів та підходів до утилізації
пульпи для зменшення негативного впливу на водні та земельні ресурси»**

Виконав: студент IV курсу, групи НЗ-2

РЕКУН Ігор Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник: кандидат технічних наук, доцент

СКИБА Галина Віталіївна

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент: доктор геологічних наук, доцент

ПІДВИСОЦЬКИЙ Віктор Тодосійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що кваліфікаційна робота
містить результати власних
досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне
джерело

Студент _____
(підпис)

Житомир – 2025 рік

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
 ФАКУЛЬТЕТ ГІРНИЧОЇ СПРАВИ, ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ТА
 БУДІВНИЦТВА
 КАФЕДРА НАУК ПРО ЗЕМЛЮ

ЗАТВЕРДЖУЮ

зав. кафедри наук про Землю

_____ Олена ГЕРАСИМЧУК

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
 на кваліфікаційну роботу

Студента Рекуна Ігоря Анатолійовича

Тема роботи: «Аналіз ефективності сучасних методів та підходів до утилізації
 пульпи для зменшення негативного впливу на водні та земельні ресурси»

Затверджена Наказом університету від «18» лютого 2025 р. № 67/с

Термін здачі студентом закінченої роботи 30.05.2025

Вихідні дані роботи

Об'єкт: процес утворення та утилізації пульпи на каменеобробному
 підприємстві

Предмет: методи утилізації пульпи та їх вплив на водні та земельні ресурси

Консультанти з кваліфікаційної роботи із зазначенням розділів, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	СКИБА Галина	25.02.2025	25.02.2025
II	СКИБА Галина	05.03.2025	05.03.2025
III	СКИБА Галина	12.04.2025	12.04.2025
IV	СКИБА Галина	25.04.2025	25.04.2025

Керівник _____
 (підпис)

Календарний план

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Охарактеризувати умови утворення пульпи та її хімічний склад	29.02.2025	Виконано
2	Дослідити ефективність методів утилізації пульпи	15.03.2025	Виконано
3	Здійснити оцінку механічних та фізико-хімічних методів утилізації пульпи	29.03.2025	Виконано
4	Запропонувати перспективні напрямки вдосконалення технологій утилізації пульпи	30.04.2025	Виконано

Студент _____
(підпис)

Керівник _____
(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ГЕОЕКОЛОГІЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УТИЛІЗАЦІЇ ПУЛЬПИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ	8
1.1 Характеристика пульпи як геоекологічного фактора та джерела її утворення.....	8
1.2 Екологічні та геоекологічні проблеми, пов'язані з накопиченням та утилізацією пульпи.....	9
1.3 Сучасні геоекологічні та методологічні підходи до управління пульповими відходами.....	11
1.4 Нормативно-правова база регулювання поводження з пульпою у контексті охорони водних та земельних ресурсів.....	13
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ПУЛЬПИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	16
2.1 Методи дослідження ефективності утилізації пульпи та оцінки її впливу на водні та земельні ресурси.....	16
2.2 Геолого-гідрографічна характеристика району дослідження.....	22
2.3 Методика оцінки впливу пульпи на якість водних та земельних ресурсів.....	27
2.4 Критерії оцінювання ефективності методів утилізації пульпи з точки зору водних та земельних ресурсів.....	31
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ГЕОЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ПУЛЬПИ.....	36
3.1 Механічні, фізико-хімічні та біологічні методи утилізації пульпи у контексті їх впливу на геокомпоненти.....	36
3.2 Оцінка ефективності методів щодо зниження негативного впливу на водні та земельні ресурси на досліджуваному об'єкті.....	38

3.3 Економічна ефективність впровадження сучасних методів утилізації пульпи з урахуванням екологічних наслідків.....	41
---	----

РОЗДІЛ 4. ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ПУЛЬПИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВОДНИХ ТА ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ.....	44
---	----

4.1 Інноваційні геоекологічно орієнтовані методи переробки та використання пульпи як вторинної сировини.....	44
---	----

4.2 Міжнародний досвід впровадження безвідходних та маловідходних технологій у галузях, що утворюють пульпу, з акцентом на охорону водних та земельних ресурсів.....	46
--	----

4.3 Розробка комплексної геоекологічної програми управління пульповими відходами для досліджуваного об'єкта.....	47
---	----

4.4 Рекомендації щодо вибору оптимальних методів утилізації пульпи для різних типів підприємств з урахуванням геоекологічних вимог.....	49
--	----

ВИСНОВКИ.....	53
---------------	----

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	55
------------------------	----

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний стан розвитку промисловості України характеризується значними обсягами утворення відходів, серед яких особливе місце займає пульпа – суспензія твердих частинок у рідині, що утворюється в результаті технологічних процесів різних галузей промисловості. Проблема утилізації пульпи набуває особливої актуальності в контексті загострення екологічної кризи та необхідності переходу до більш раціонального використання природних ресурсів.

В Україні щорічно утворюється близько 1,5 млрд тонн промислових відходів, частина яких представлена пульпою, що утворюється переважно в гірничодобувній, металургійній, каменеобробній та целюлозно-паперовій галузях. Накопичення цих відходів призводить до забруднення повітря, ґрунтів та підземних вод, займає сотні тисяч гектарів земель, негативно впливаючи на стан довкілля та здоров'я населення.

Особливо гострою є проблема утилізації пульпи в регіонах з розвиненою каменеобробною промисловістю, зокрема в Житомирській області, де функціонує значна кількість підприємств з обробки природного каменю. Традиційні методи поводження з пульпою здебільшого обмежуються її захороненням на полігонах, що не відповідає сучасним принципам циркулярної економіки та сталого розвитку.

Дослідження зумовлені необхідністю пошуку та впровадження ефективних, екологічно безпечних методів утилізації пульпи, які дозволять не лише зменшити негативний вплив на довкілля, але й перетворити відходи на цінну вторинну сировину, що може бути використана в різних галузях господарства.

Об'єкт дослідження. Процес утворення та утилізації пульпи на каменеобробному підприємстві міста Коростишів Житомирської області.

Предмет дослідження. Методи утилізації пульпи та їх вплив на водні та земельні ресурси.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є оцінка ефективності сучасних методів та підходів до утилізації пульпи щодо мінімізації її негативного впливу на водні та земельні ресурси. Виходячи з мети роботи були поставлені та вирішені наступні **завдання**:

- провести аналіз складу та властивостей пульпи, що утворюється в результаті промислової діяльності;
- вивчити сучасні технології та підходи до утилізації пульпи;
- оцінити екологічні ризики та вплив пульпи на стан водних та земельних ресурсів;
- проаналізувати вітчизняні та зарубіжні приклади утилізації пульпи й оцінити їх ефективність;
- розробити рекомендації щодо оптимізації процесів утилізації пульпи з урахуванням екологічної безпеки та сталого використання природних ресурсів.

Практичне значення. Отриманні результати дають можливість їх застосування для оптимізації процесів поводження з пульповими відходами на каменеобробних підприємствах, що сприятиме зменшенню негативного впливу на довкілля та раціональному використанню ресурсів відповідно до принципів циркулярної економіки.

Апробація результатів дослідження: 1. Участь у Всеукраїнській науковій конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування» 14 листопада 2024 року.

Рекурн І. А. Дрібнодисперсні відходи каменеобробки на Житомирщині: екологічні виклики та шляхи вирішення. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування» 14 листопада 2024 року. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 262.

2. Участь у щорічній науковій конференції студентів та аспірантів «Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи» присвячена пам'яті Г. П. Дубинського 10 квітня 2025 року.

Рекурн І. А. Стратегічне управління відходами гірничодобувної та каменеобробної промисловості: екологічна стійкість та міжнародний досвід. Тези Щорічної наукової конференції студентів та аспірантів «Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи» присвячена пам'яті Г. П. Дубинського 10 квітня 2025 року. Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2025. С. 49

Структура роботи. Робота складається зі вступу, основної частини із 4 розділів, висновків, рекомендацій та використаної літератури. Вся робота має 60 сторінок. В тексті налічується 16 рисунків. Список використаної літератури складає 30 найменувань.

РОЗДІЛ 1

ГЕОЕКОЛОГІЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УТИЛІЗАЦІЇ ПУЛЬПИ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ

1.1 Характеристика пульпи як геоекологічного фактора та джерела її утворення

Сучасний стан екологічної кризи вимагає радикальної зміни підходів до використання природних ресурсів, переходу від економічно-центричної моделі до концепції екологізації виробництва, що забезпечить зменшення негативного впливу на довкілля та сприятиме раціональному природокористуванню [1].

В Україні масштаби цієї проблеми досягли критичного рівня – щорічне та накопичення близько 25 млрд тонн відходів, серед яких розкривні породи, хвости збагачення руд, металургійні шлаки та інші, займають сотні тисяч гектарів родючих земель, забруднюють повітря, ґрунти та підземні води. Парадоксально, але ці відходи часто містять цінні компоненти – чорні, кольорові, рідкі та дорогоцінні метали, нерудну сировину, що дозволяє розглядати їх як техногенні родовища, потенційно придатні для повторної переробки [2]. Пульпа є специфічним типом промислових відходів, який утворюється в результаті технологічних процесів збагачення корисних копалин та в інших галузях промисловості (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Джерела утворення пульпи та пов'язані екологічні проблеми

Галузь	Тип пульпи	Основні екологічні проблеми
Целюлозно-паперова	Целюлозні волокна, шлам	Забруднення води (хімікати, органічні речовини), забруднення повітря, тверді відходи
Харчова	Фруктово-овочева макуха, шлам	Забруднення води (органічні речовини, поживні речовини), запах
Каменеобробна	Кам'яна суспензія (дрібні частинки)	Зайняття земель, пилове забруднення, води (частинками)

За своєю суттю, пульпа представляє собою суспензію твердих частинок у рідині, переважно воді, яка характеризується різним співвідношенням твердої та рідкої фаз залежно від галузі та технологічного процесу її утворення.

Основним джерелом утворення пульпи в Україні та світі є гірничодобувна промисловість, зокрема, процеси збагачення корисних копалин. Крім того, значні об'єми пульпи утворюються в металургійній, хімічній, енергетичній та деяких інших галузях промисловості. Для кожної з цих галузей характерні свої особливості формування пульпи, її склад та фізико-хімічні властивості, що визначають потенційні екологічні ризики та методи утилізації.

1.2 Екологічні та геоекологічні проблеми, пов'язані з накопиченням та утилізацією пульпи

Утилізація пульпи з різних галузей промисловості створює низку серйозних екологічних проблем, що потребують комплексного вирішення. Основні екологічні проблеми пов'язані із забрудненням води, ґрунту та повітря, що в сукупності негативно впливає на екосистеми та здоров'я людини.

Забруднення води є однією з найгостріших проблем, що виникає внаслідок неналежної утилізації пульпи. Механізми такого забруднення різноманітні, від прямого скидання неочищеної пульпи у водойми, до витоків зі сховищ та стоку з місць утилізації. Залежно від промислового джерела, стічні води пульпи містять різні забруднюючі речовини, серед яких зважені тверді частинки, розчинена органічна речовина, важкі метали, промислові хімікати та надмірна кількість поживних речовин. Потрапляння цих забруднювачів у водне середовище призводить до зниження рівня розчиненого кисню, збільшення мутності води, порушення життєдіяльності водних організмів. Особливу загрозу становить забруднення джерел питної води, що підвищує ризики для здоров'я людини через поширення захворювань, що передаються через воду [3].

Не менш значущою є проблема забруднення ґрунту, що виникає через безпосереднє відкладення пульпи на земельних ділянках, вилюговування

забруднюючих речовин у ґрунтовий профіль та осідання пилу з висушеної пульпи [4]. Серед основних забруднювачів ґрунту – важкі метали, надмірна кількість органічної речовини та різноманітні промислові хімікати. Такий вплив призводить до зниження родючості ґрунту через порушення мікробної активності та кругообігу поживних речовин, накопичення токсичних речовин у рослинах і подальшому харчовому ланцюзі. У важких випадках, особливо при накопиченні відходів каменеобробної промисловості, спостерігається повна деградація середовища існування організмів та критична втрата біорізноманіття.

Забруднення повітря, хоча й менш очевидне, також є вагомою екологічною проблемою, пов'язаною з утилізацією пульпи. Джерелами такого забруднення служать пил, що підіймається з висушених місць утилізації пульпи, особливо з каменеобробної промисловості, викиди від спалювання пульпи, що можуть містити тверді частинки та шкідливі гази, а також метан та інші леткі сполуки, що утворюються під час анаеробного розкладання органічної речовини на полігонах. Наслідками забруднення повітря є респіраторні проблеми у людей і тварин, формування смогу та кислотних дощів, внесок у глобальну зміну клімату та вторинне забруднення ґрунту та води через осідання повітряних забруднювачів.

Комплексний негативний вплив неналежних методів утилізації пульпи на екосистеми проявляється у втраті та фрагментації природних середовищ існування, зміні видового складу водних та наземних угруповань, порушенні природних циклів поживних речовин та енергії. Особливо вразливими є чутливі або зникаючі види, популяції яких можуть критично зменшуватись під впливом забруднення [5]. Довготривала деградація природних територій, їх перетворення на безплідні ландшафти внаслідок накопичення промислової пульпи, порушення структури екологічних взаємодій та харчових ланцюгів – усе це призводить до значного зниження біорізноманіття та стійкості природних екосистем.

Ризики для здоров'я людини від забруднення, спричиненого неналежною утилізацією пульпи, включають як прямі, так і непрямі загрози. До прямих загроз належать споживання забрудненої питної води, вдихання забрудненого повітря

та безпосередній контакт з токсичними речовинами. Непрямі загрози пов'язані з накопиченням забруднювачів у продуктах харчування та поширенням інфекційних захворювань через порушення санітарних умов.

Наявність такого широкого спектру екологічних проблем, пов'язаних з утилізацією пульпи, підкреслює необхідність розробки та впровадження ефективних, екологічно обґрунтованих стратегій поводження з цим видом промислових відходів. Це потребує інтегрованого підходу, що включає вдосконалення технологій переробки, пошук можливостей повторного використання пульпи та впровадження суворіших нормативних вимог щодо її утилізації.

1.3 Сучасні методологічні та геоекологічні підходи до управління пульповими відходами

Сучасні підходи до управління промисловими відходами характеризуються пошуком більш екологічно безпечних та ресурсоефективних альтернатив традиційним методам утилізації. Захоронення на полігонах, хоча і залишається поширеним методом, пов'язане з низкою екологічних ризиків, включаючи утворення фільтрату, який потенційно може забруднювати підземні води та ґрунт, анаеробне розкладання з утворенням метану, значне використання земельних ресурсів та можливе пилове забруднення [6]. Спалювання пульпи, як альтернативний метод, також супроводжується екологічними проблемами, пов'язаними з викидами в атмосферу різних забруднюючих речовин, включаючи тверді частинки, гази згоряння та потенційно високотоксичні сполуки, особливо при спалюванні пульпи, що містить хлоровані сполуки (табл. 1.2) [7].

Серед альтернативних підходів до управління пульпою особливу увагу заслуговує використання її в сільському господарстві як меліоранту ґрунту або підстилки для тварин. Однак, придатність пульпи для сільськогосподарського використання значною мірою залежить від її складу, оскільки наявність важких

металів або високих концентрацій солей може призвести до забруднення ґрунту та потенційного поглинання забруднюючих речовин культурами.

Таблиця 1.2

Порівняння методів утилізації пульпи

Метод утилізації	Основні екологічні наслідки	Переваги	Недоліки
Захоронення на полігонах	Забруднення фільтратом, викиди метану, використання земель	Відносно недорого (спочатку)	Довгострокові ризики, викиди парникових газів, дефіцит земель
Спалювання	Забруднення повітря (гази, тверді частинки), утворення золи	Зменшення обсягу, потенційне відновлення енергії	Вплив на якість повітря, управління золою, енергоємність
Сільськогосподарське використання	Потенційне забруднення ґрунту (важкі метали, солі, патогени)	Забезпечення поживними речовинами (якщо органічне), покращення ґрунту	Ризик забруднення, вимагає ретельної характеристики пульпи

Компостування органічної пульпи представляє собою біологічний процес, що дозволяє розкласти органічні матеріали на багату поживними речовинами ґрунтову добавку [8]. Цей підхід відводить відходи з полігонів, зменшуючи утворення метану та фільтрату, а отриманий компост можна використовувати для покращення здоров'я ґрунту та зменшення потреби в синтетичних добривах [9]. Однак, якість компосту залежить від складу вихідної пульпи, а наявність забруднюючих речовин може обмежувати його застосування.

Анаеробне зброджування є перспективною технологією для сталого управління органічними відходами пульпи, особливо з харчової промисловості. Цей процес дозволяє виробляти біогаз, який можна використовувати як відновлюване джерело енергії, одночасно зменшуючи обсяг відходів та

виробляючи багатий на поживні речовини дигестат, придатний для використання як добриво.

Відповідно до принципів циркулярної економіки, зростаючий інтерес викликає використання пульпи як вторинної сировини в різних галузях промисловості [10]. Паперова пульпа вже широко використовується у виробництві нових паперових виробів та пакувальних матеріалів. Пульпа каменеобробки може бути використана як наповнювач у будівельній промисловості, наприклад, у бетонних та цементних сумішах, потенційно покращуючи певні властивості бетону. Успішне впровадження таких практик може створити економічні можливості, одночасно зменшуючи екологічне навантаження від утилізації відходів.

1.4 Нормативно-правова база регулювання поводження з пульпою у контексті охорони водних та земельних ресурсів

Законодавче та регуляторне поле, що регулює поводження з пульповими відходами в Україні, зазнало значних змін із набуттям чинності Закону України "Про управління відходами" у липні 2023 року. Цей закон спрямований на узгодження українського законодавства зі стандартами Європейського Союзу та запроваджує ключові принципи, включаючи ієрархію пріоритетів управління відходами, яка наголошує на запобіганні утворенню відходів, підготовці до повторного використання та переробці над іншими формами відновлення та видалення. Закон також запроваджує концепцію розширеної відповідальності виробника, децентралізацію відповідальності за управління відходами та нову систему дозволів для діяльності у сфері управління відходами (табл. 1.3) [11].

Поряд з основним законом, регулювання поводження з пульпою здійснюється в рамках Закону України "Про охорону навколишнього природного середовища", який встановлює загальні засади охорони навколишнього середовища, та Закону України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення", що регулює аспекти громадського здоров'я, пов'язані з

управлінням відходами. Важливими є також спеціальні нормативні акти щодо класифікації та управління промисловими відходами, такі як Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища про класифікацію відходів [12]. Однак, залишаються проблеми, зокрема, відсутність чітких норм щодо утилізації пульпи з каменеобробної промисловості, що є особливо актуальним для регіонів з розвиненою каменеобробною галуззю, таких як Житомирська область.

Таблиця 1.3

Законодавча та регуляторна база у сфері утилізації пульпи

Законодавство/нормативний акт	Орган/регіон	Основні положення, що стосуються пульпи/промислових відходів
Закон України "Про управління відходами"	Україна	Ієрархія управління відходами, розширена відповідальність виробника, система дозволів, децентралізація
Директива ЄС про відходи	Європейський Союз	Ієрархія управління відходами (запобігання, повторне використання, переробка), розширена відповідальність виробника
Базельська конвенція	Організація Об'єднаних Націй	Контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів
Директива ЄС про промислові викиди	Європейський Союз	Контроль та зменшення забруднення від промислової діяльності

На міжнародному рівні існує ряд норм та найкращих практик, що регулюють управління промисловими відходами, включаючи пульпу. Директива Європейського Союзу про відходи встановлює ієрархію управління відходами, пріоритезуючи запобігання, повторне використання, переробку, відновлення та, нарешті, видалення, а також наголошує на принципі розширеної відповідальності виробника [13]. Базельська конвенція регулює міжнародне перевезення небезпечних відходів [14], Роттердамська конвенція сприяє безпечному поводженню та торгівлі небезпечними хімічними речовинами [15], а

Директива ЄС про промислові викиди спрямована на контроль та зменшення забруднення від промислової діяльності.

Економічно розвинені країни Європи, серед яких Німеччина, Швеція та Нідерланди, успішно імплементували передові системи управління відходами, що включають жорсткі обмеження на захоронення окремих категорій відходів. У дослідженні підкреслюється, що основоположним принципом сучасної міжнародної екологічної політики є концепція "забруднювач платить", згідно з якою економічні суб'єкти, які генерують забруднення, повинні самостійно фінансувати заходи з його контролю та утилізації. Як зазначається у статті, поточні законодавчі зміни в Україні, спрямовані на гармонізацію з європейськими екологічними стандартами, відображають загальносвітову тенденцію до запровадження більш сталих практик поводження з відходами різних типів, у тому числі пульповими [16].

Ефективне впровадження та виконання нового закону про управління відходами матиме вирішальне значення для сприяння більш стійким методам утилізації пульпи в Україні, особливо в регіонах зі значним утворенням промислових пульпових відходів, таких як Житомирська область з її розвиненою каменеобробною промисловістю.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ПУЛЬПИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методи дослідження ефективності утилізації пульпи та оцінки її впливу на водні та земельні ресурси

Н. Каредду та Г. А. Діно у своїй роботі 2016 року описали один із методів ефективної утилізації пульпи [17]. Запропонований ними підхід показує, що важливо розрізняти методи дослідження для різних категорій пульпи. Існує дві основні категорії кам'яної пульпи: карбонатна та силікатна, які мають різні характеристики та потребують різних підходів до утилізації. Силікатну пульпу можна додатково класифікувати на три підкатегорії залежно від способу утворення: 1) пульпу від рамних пил з використанням абразивного сталевого дробу; 2) пульпу від багатодискових блокорізних верстатів з алмазними пилами та змішану пульпу (рис. 2.1). Дослідження, проведені у різні періоди, виявили різний потенціал використання цих матеріалів.



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд пульпи

У дослідженні ефективності утилізації пульпи використовується кілька методів, зокрема хімічний аналіз твердої фракції шламу для визначення концентрації важких металів та порівняння їх із нормативними обмеженнями залежно від запланованого використання (для громадських чи промислових зон)

(табл. 2.1). Також проводиться гранулометричний аналіз для вивчення розподілу частинок за розміром, що є критично важливим, оскільки типовий розмір частинок шламу становить менше 25 мкм, що робить його подібним до мулистоглинистих ґрунтів з низькою водопроникністю (табл. 2.2).

Таблиця 2.1

Основні хімічні характеристики залишкової пульпи

Зразки	As (мг/кг)	Co (мг/кг)	Cr заг. (мг/кг)	Cr VI (мг/кг)	Hg (мг/кг)	Ni (мг/кг)	Cu (мг/кг)	Zn (мг/кг)	TPH (мг/кг)
АСД 1	12	10,7	65,3	26,3	< 0,5	35,6	114,9	64,8	43,5
АСД 2	14,2	10	69,6	28,1	< 0,5	37,1	131,6	65	73,8
ББВ 1	5,7	80,3	5,5	1,2	0,7	15	46,7	59,8	49,6
ББВ 2	4,1	91	< 5,0	1,4	0,8	2,7	33,3	51,1	40,3
ЗП 1	10,1	12,2	59,1	50,6	0,6	40,4	86,6	61,6	77,9
ЗП 2	9,3	10,1	50,6	36,9	< 0,5	47,3	91,3	57,9	41,4
КП 1	< 5	< 1	< 20	NA	NA	< 20	< 10	< 30	NA
КП 2	< 5	< 1	< 20	NA	NA	< 20	< 10	< 30	NA*

*Примітка: TPH: загальні нафтові вуглеводні, NA: інформація недоступна (Not Available)

Таблиця 2.2

Узагальнення гранулометричного складу залишкового шламу залежно від характеристик шламу (породи та інструменти)

Залишковий шлам	Походження	d ₅₀ *, мкм	U*
Залишкова пульпа з карбонатних порід (КП)	Від обробки з використанням алмазних інструментів (середнє значення)	3,8	4,8
	Від хонінгування та полірування (середнє значення)	5,2	6,3
Залишкова пульпа з силікатних порід (СП)	Від рамних пил з використанням абразивного сталевого дробу (АСД) (середнє)	7,7	10,8
	Від багатодискових блокорізних верстатів (ББВ) (середнє значення)	8,3	10
	Змішана пульпа (ЗП) (середнє значення)	8,2	10,3

*Примітка: d₅₀ [мкм]: медіанний розмір частинок (50% частинок менші за це значення).

U: Коефіцієнт однорідності гранулометричного складу.

Для карбонатної пульпи методи дослідження зосереджені на визначенні хімічних сполук, які могли б виключити наявність забруднюючих речовин. Лабораторні тести показують практично нульовий рівень забруднення у карбонатному мікро дисперсному матеріалі. Основним методом оцінки ефективності утилізації карбонатної є дослідження її застосування як замітника дорожчих інгредієнтів у будівельному секторі, зокрема для виробництва бетону, керамічних виробів та інших будівельних матеріалів.

Для силікатної пульпи, особливо тієї, що утворюється від ріжучих інструментів з вмістом металів, методи дослідження включають біоремедіацію шляхом змішування з компостом, подрібненими гілками та верхнім шаром ґрунту для отримання «штучного ґрунту». Також досліджується можливість змішування з крупнозернистими матеріалами для виробництва наповнювачів для екологічного застосування або з піском, компостом та торфом для створення штучного ґрунту.

Оцінка ефективності утилізації пульпи також включає економічний аналіз, оскільки витрати на управління пульпою можуть становити понад 3% операційних витрат підприємств, що значно впливає на економічний баланс компаній. Крім того, методи дослідження спрямовані на забезпечення відповідності принципам ЄС щодо переробки відходів та збереження ресурсів, що потребує пошуку нових рішень, окрім захоронення на полігонах [18].

Утилізація кам'яної пульпи в Україні реалізується різними методами, серед яких поширеними є використання цих відходів для пересипання шарів на полігонах твердих побутових відходів та підсипка дорожнього покриття при будівництві автошляхів, а також використання при виготовленні бетонних блоків. Хімічний склад гірських порід, з яких утворюється пульпа, відіграє ключову роль у процесі її утилізації, визначаючи екологічну безпеку та можливі напрямки повторного використання.

Житомирська область, особливо Коростишівська громада, є головним регіоном каменеобробної галузі України. Саме тут знаходяться значні потужності з видобутку та обробки природного каменю, що супроводжується утворенням

великих обсягів кам'яної пульпи. Це призводить до засмічення земельного та водного ресурсів, особливо коли пульпа забруднена хром (III) оксидом (рис.2.2), який використовували в обробці виробів.



Рис. 2.2. Хімічний реактив хром (III) оксид

Хром (III) оксид має суттєвий негативний вплив на екосистеми. У водному середовищі ця речовина призводить до загибелі водних організмів через порушення їхніх метаболічних процесів, а також спричиняє біоаккумуляцію токсичних сполук у харчових ланцюгах. При потраплянні у ґрунт хром (III) оксид знижує його родючість, пригнічує активність ґрунтових мікроорганізмів та перешкоджає нормальному росту рослин.

У північно-східній частині міста Коростишева розташований суглинковий кар'єр, який тривалий час використовувався для видобутку сировини (рис. 2.3). До 2015 року територія кар'єру зберігала свій природний ландшафт.

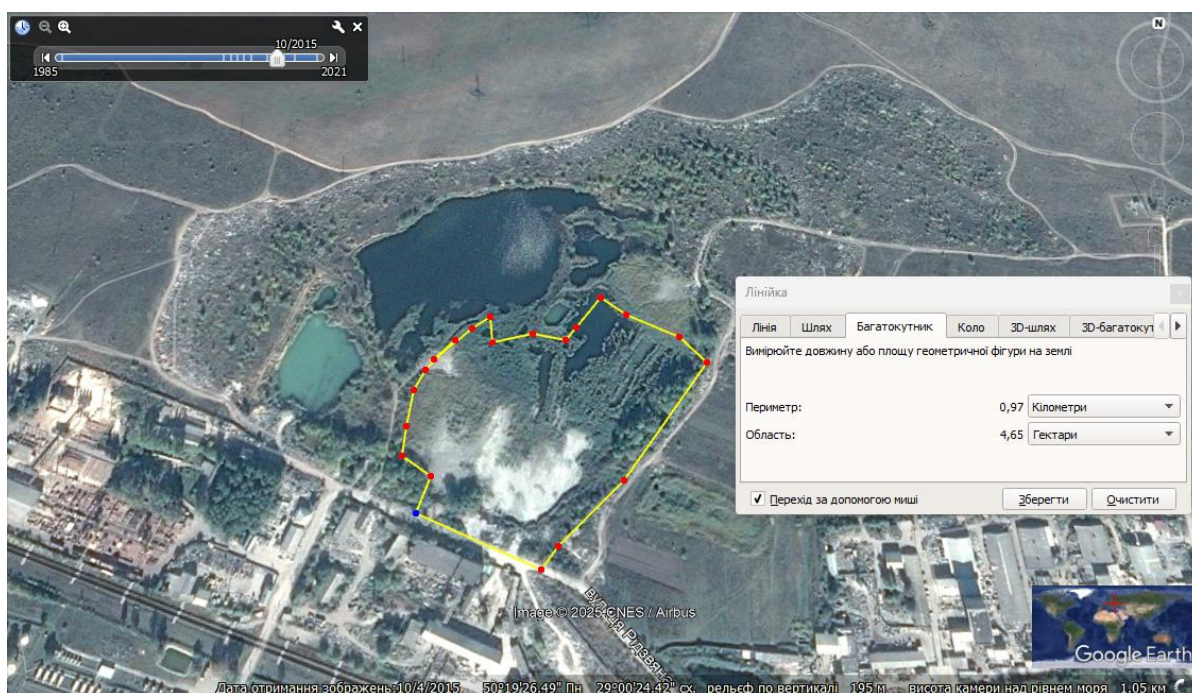


Рис. 2.3. Територія суглинкового кар'єру до забруднення, 2015 рік

З часом цей кар'єр став місцем несанкціонованого скидання пульпових відходів каменеобробної промисловості. Протягом багатьох років підприємства здійснювали вивози пульпи в рідкому стані, що призвело до масштабного забруднення території (рис. 2.4) та спричинило серйозні екологічні наслідки для всього регіону.

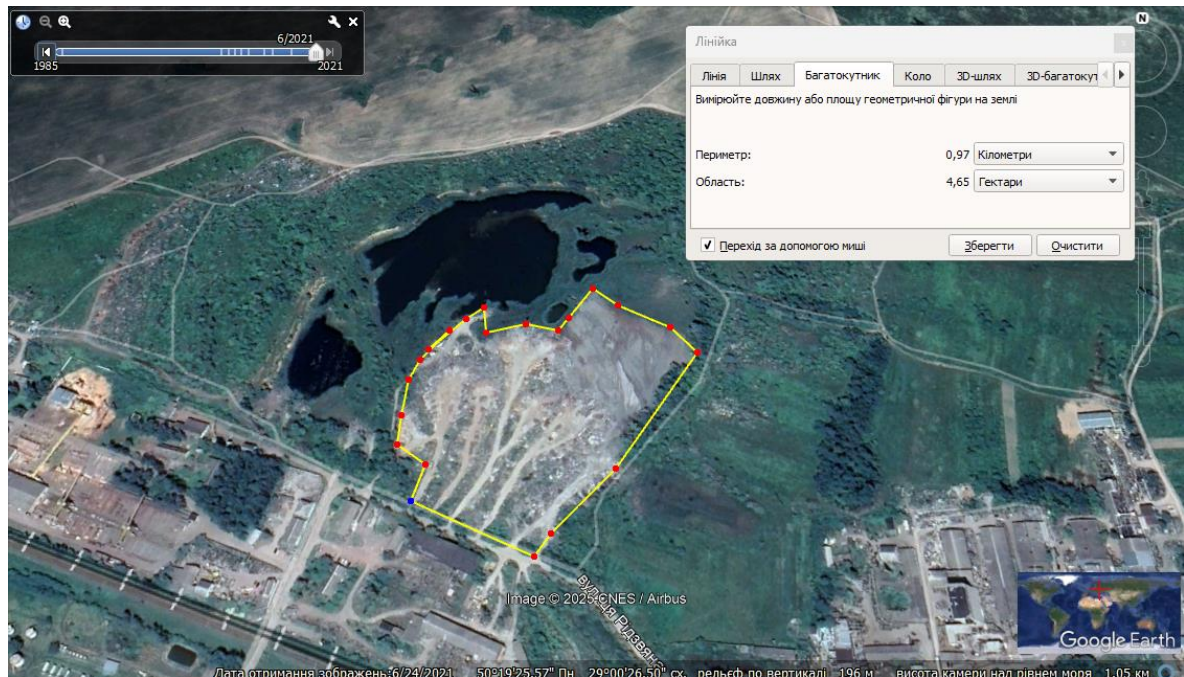


Рис. 2.4. Забруднений суглинковий кар'єр, 2021 рік

Пульпові відходи спричиняють комплексне забруднення навколишнього середовища. Крім хімічного забруднення, вони створюють і фізичні проблеми. Пульпа утворює щільне покриття на поверхні землі, яке не пропускає сонячну радіацію, внаслідок чого ґрунт не прогрівається належним чином. Також вона значно знижує водопроникність ґрунту, порушуючи його водний режим. Ці фактори в комплексі призводять до деградації ґрунтового покриву та унеможливають природне відновлення рослинності на забруднених ділянках.

Ситуація почала змінюватися лише після впровадження італійської технології утилізації пульпових відходів та застосування обробної технології BUFF. До цього часу майже всі підприємства галузі продовжували неправильно утилізувати відходи, завдаючи непоправної шкоди довкіллю через вивезення пульпи у рідкому стані.

Позитивним прикладом екологічно відповідального підходу до виробництва та утилізації відходів є діяльність підприємства «Гроніс»

Коростишівської територіальної громади. З 2012 року це підприємство провело суттєву екологічну модернізацію виробничих процесів, відмовившись від використання хлориду міді, який є шкідливим для довкілля, у процесі полірування каменю. Така ініціатива демонструє, що екологізація виробництва не лише знижує негативний вплив на навколишнє середовище, але й відкриває нові можливості для безпечної утилізації промислових відходів.

Натомість було впроваджено китайську технологію полірувальні диски buff (рис. 2.5), що дозволило отримувати відходи полірування, а саме кам'яний пил (пульпу), з підтвердженням IV класом небезпеки, як інертні та нетоксичні відходи.



Рис. 2.5. Полірувальний диск buff

Отримання сертифіката IV класу відходів відкрило для підприємства можливість використовувати утворену в процесі каменеобробки пульпу для практичних цілей, зокрема для пересипання шарів на сміттєзвалищах твердих побутових відходів. Важливою умовою для такого використання є вологість пульпи, оскільки для ефективної утилізації вона повинна бути в сухому стані. З цією метою підприємство використовує італійську технологію відкачування та підготовки пульпи, яка включає кілька етапів. Спочатку пульпа відкачується у спеціальні мулові відстійники, де відбувається первинне осадження твердих частинок. Наступним етапом є викопування накопиченої пульпи з відстійників та її подальше просушування на відкритих майданчиках або за допомогою спеціального обладнання для досягнення необхідного рівня вологості. Лише

після цього підготовлена суха пульпа завантажується на самоскиди та транспортується на полігони твердих побутових відходів для використання як пересипний матеріал.

Таким чином, впровадження нової технології полірування та застосування комплексної системи підготовки пульпи дозволило підприємству не лише зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, відмовившись від небезпечних речовин, але й знайти практичне застосування для утворених виробничих відходів, сприяючи раціональному використанню ресурсів та зменшенню обсягів захоронення на полігонах. Цей приклад демонструє один із можливих шляхів утилізації пульпи в Україні, що відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку.

2.2 Геолого-гідрографічна характеристика району дослідження

Об'єктом дослідження виступає каменеобробне підприємство з виробництва ритуальних виробів, розташоване у північній промисловій зоні міста Коростишева. Виробничий майданчик знаходиться на нормативній відстані 127 м від найближчої житлової забудови, що відповідає санітарно-захисній зоні для підприємств даного класу згідно з ДСП 173-96 (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Карта розташування каменеобробного підприємства

Район розташування досліджуваного об'єкта, місто Коростишів, знаходиться на північному краю Українського кристалічного щита, що визначає його унікальні геологічні особливості.

У цій місцевості зосереджені найдавніші магматичні породи, такі як граніти, граніто-гнейси та лабрадорити. Вони переважно виходять на поверхню вздовж берегів річок та у природних заглибленнях, утворених водними потоками. Житомирська область також відома значною кількістю кар'єрів для видобутку будівельного каменю.

Верхній шар порід представлений осадовими утвореннями, які охоплюють всю територію області та Поліської низовини. Це піски, глини, супіски та суглинки. Ландшафти області дуже різноманітні, рельєф піддається інтенсивному вивітрюванню, а в корі вивітрювання домінує глинистий мінерал каолін, який зазвичай має білий колір.

Місцевість Житомирського Полісся дещо піднята, що сприяє меншій заболоченості. Рельєф тут сформований виходами давніх порід, з вкрапленнями каолінів, крейдяних і звичайних пісків, глин та пісковиків різного геологічного віку.

В районі розташування підприємства різні типи ґрунтів (рис. 2.7). Дерново-підзолисті ґрунти – найбільш поширені у Житомирському Поліссі, формуються під лісовою рослинністю на пісках та супісках. Характеризуються кислою реакцією (рН 4,5-5,5), низьким вмістом гумусу (1-3%) та поживних речовин. Мають добру водопроникність, але схильні до вимивання поживних елементів.

Торфово-болотні ґрунти – формуються в знижених заболочених місцях при високому рівні ґрунтових вод. Характеризуються високим вмістом органічної речовини (до 30-50%), кислою реакцією та надмірним зволоженням.

Алювіальні ґрунти – розвинуті у заплавах річок, зокрема річки Тетерів. Формуються за рахунок річкових наносів, мають шарувату будову та варіюють від супіщаних до глинистих за механічним складом.

Техногенні ґрунти – утворені внаслідок діяльності каменедобувних та каменеобробних підприємств, представлені змішанням природних ґрунтів з

відходами виробництва, характеризуються порушеною структурою та зміненим хімічним складом.



Рис. 2.7. Геологічні та гідрографічні особливості регіону

Гідрологічна мережа району характеризується наявністю численних річкових долин, які часто мають каньйоноподібну форму з крутими берегами висотою до 30 метрів. Річки вирізняються великою кількістю порогів, перекатів та швидкою течією [19].

Гідрологія міста Коростишева представлена:

- річкою Тетерів – головною водною артерією району, яка належить до басейну Дніпра (рис. 2.8);
- двома озерами природного походження;
- закинутими кар'єрами, частково заповненими водою;
- мережею струмків та джерел;
- штучними водосховищами (ставками), які використовуються для технічних потреб підприємств.

Річка Тетерів має типовий для Полісся характер живлення – переважно снігове та дощове, з весняною повінню та літньо-осінньою меженню. Якість води у водних об'єктах району формується під впливом як природних чинників, так і антропогенного навантаження від промислових підприємств.



Рис. 2.8. Гідрологічна мережа району дослідження

Підприємство «Гроніс» функціонує на ринку обробки натурального каменю з 1999 року, що свідчить про стабільність його діяльності та значний досвід у галузі. Компанія спеціалізується на обробці та реалізації виробів з натурального каменю, здійснюючи повний виробничий цикл від закупівлі сировини до збуту готової продукції.

Виробнича база підприємства представлена двома спеціалізованими виробничими комплексами: перший – орієнтований на виготовлення меморіальної продукції, другий – на виробництво будівельних матеріалів з натурального каменю. Загальна чисельність персоналу становить понад 40 осіб, що дозволяє класифікувати «Гроніс» як мале підприємство згідно з законодавством України.

Територія підприємства займає земельну ділянку загальною площею 0,46 га, на якій розташовані чотири виробничі об'єкти: майстерня для проектування та підготовчих робіт, спеціалізований цех з виробництва декоративних ваз, основне виробниче приміщення для виготовлення ритуальної

продукції та виробнича ділянка, обладнана станком для виготовлення тротуарної бруківки (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Види та об'єми готової продукції на підприємстві

п/п	Назва	Об'єм, т/рік	фото
1	Меморіальна готова продукція	6 000	
2	Тротуарна бруківка	300	

Технологічний процес обробки каменю на підприємстві здійснюється з використанням високотехнологічного обладнання, що забезпечує відповідність продукції міжнародним стандартам якості. При виробництві враховуються специфічні властивості різних видів натурального каменю, що гарантує високий рівень якості кінцевої продукції. Детальні показники обсягів виробництва та утворення відходів підприємства «Гроніс» за рік (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Показники виробництва та відходів підприємства «Гроніс» за рік

Найменування	Кількість
Сировина, м ³	
Отримано кам'яних блоків	293,41
Використано сировини	120,59
Готова продукція, м ²	
Деталі	1212
Вази	60
Відходи	
Утворено буту, м ³	114,08
Пульпа, м ³	12,1

Водопостачання технологічного процесу реалізовано через замкнуту систему водокористування. Вода забирається з локального водосховища (ставка), розташованого за межами підприємства, та циркулює у виробничому процесі через систему резервуарів з послідовним очищенням та повторним використанням. Впровадження циркуляційної системи водопостачання дозволило суттєво знизити антропогенне навантаження на водні об'єкти регіону та оптимізувати використання водних ресурсів.

За результатами проведених інструментальних вимірювань, рівень шумового навантаження від виробничої діяльності підприємства на межі житлової забудови не перевищує допустимих нормативів та відповідає вимогам ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Це забезпечується як достатньою відстанню до житлових об'єктів, так і використанням сучасного обладнання з поліпшеними шумовими характеристиками.

Важливим аспектом діяльності компанії «Гроніс» є впровадження системи контролю якості на всіх етапах виробничого процесу – від постачання сировини з кар'єру до реалізації готової продукції. Це дозволяє мінімізувати виробничий брак та забезпечити стабільно високу якість продукції.

Асортимент продукції підприємства включає широкий спектр виробів з натурального каменю для різних сегментів ринку, що дозволяє задовольняти різноманітні потреби споживачів та підтримувати стійкість бізнесу в умовах ринкових коливань [20].

2.3 Методика оцінки впливу пульпи на водні та земельні ресурси

Індустрія видобутку та обробки декоративного каменю активно розвивається, генеруючи близько 50% відходів від загального обсягу виробництва. На Житомирщині функціонує понад 70 офіційних каменеобробних підприємств, а з урахуванням нелегальних майстерень їх кількість сягає близько 1000.

У процесі обробки природного каменю використовується вода для охолодження інструменту та змивання відходів у відстійники. Хоча теоретично вода має циркулювати в замкненому циклі, часто підприємства скидають забруднену воду у природні водойми, що негативно впливає на довкілля.

Для оцінки впливу пульпи на водні та земельні ресурси застосовується методика, що включає:

- відбір проб води здійснюється згідно з ДСТУ ISO 5667 з поверхневих та підземних джерел вище і нижче за течією від підприємства та з шлам відстійників;
- відбір проб ґрунту проводиться на різних відстанях від джерела забруднення та з різних глибин (0-20 см, 20-40 см, 40-60 см);
- аналіз включає визначення рН, вмісту завислих речовин, важких металів, загальної мінералізації, БСК₅ та ХСК.

Для визначення міграції забруднюючих речовин використовуються лізіметричні дослідження та колонкові експерименти, що дозволяють моделювати процеси фільтрації через ґрунти та визначати коефіцієнти фільтрації.

Екологічний вплив оцінюється за допомогою методів біоіндикації з використанням ростових тестів на рослинах та біотестування з дафніями. Для формування комплексної оцінки застосовується методика інтегральної оцінки екологічної небезпеки, що включає порівняння отриманих значень з нормативами ГДК та вимогами міжнародних стандартів.

Запропонована методика дозволяє всебічно оцінити вплив пульпи на навколишнє середовище та розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо мінімізації негативного впливу каменеобробних підприємств.

Леонілець І.В. у своїй дисертації застосовує комплексний підхід до дослідження впливу кам'яної пульпи на водне середовище, що включає аналіз хімічного складу води та дослідження швидкості осадження шламу залежно від концентрації флокулянту [21].

Загальна методика дослідження. Дослідження складалося з двох основних етапів:

1. Аналіз хімічного складу проб води.
2. Дослідження швидкості осідання шлам залежно від концентрації флокулянту.

Підготовка проб для дослідження. Взято проби води на вході та виході зі шлам відстійника. Для аналізу проби підкислені нітратною кислотою (HNO_3) - 150 мкл на 10 мл проби. Додатково взято 180 проб брудної води об'ємом 60 мл для експериментів з флокулянтами.

Для аналізу хімічного складу води використовувався прилад MP-AES (модель 4200, Agilent Inc.) з аксіальним оглядом плазми для визначення хімічного складу води. Було досліджено три типи зразків: проба води до флокуляції, проба води після флокуляції та проба води після відстоювання (табл. 2.5, табл. 2.6).

Таблиця 2.5

Результати хімічного аналізу води

Тип зразків	Al	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K
	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л
Проба води до флокуляції	0,10	40,44	< 0,013	< 0,03	< 0,001	0,03	< 0,039	35,31
Проба води після флокуляції	0,11	36,89	< 0,013	< 0,03	< 0,001	0,04	< 0,039	33,12
Проба води після відстоювання	0,07	40,09	< 0,013	< 0,03	< 0,001	0,03	< 0,039	33,48
Тип зразків	Mn	Na	Ni	Pb	Zn	Mg		
	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л		
Проба води до флокуляції	0,02	44,07	< 0,035	< 0,05	< 0,018	11,40		
Проба води після флокуляції	0,04	43,05	< 0,035	< 0,05	< 0,018	10,26		
Проба води після відстоювання	0,05	43,96	< 0,035	< 0,05	< 0,018	10,37		

Таблиця 2.6

Фізичні властивості водних проб до та після процесів її очищення

Тип проб	pH	Електропровідність, μS/cm	Окисно-відновний потенціал φ, мВ	Температура t, °C
Проба води до флокуляції (закаламучена вода)	9,27	508	208	20
Проба води після флокуляції	8,42	624	320	-
Проба води після відстоювання	8,38	621	306	-

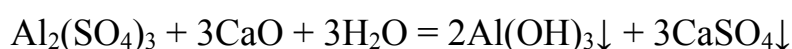
В експерименті використовувався флокулянт на основі алюміній сульфату ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Вимірювання проводилося в мірному циліндрі об'ємом 100 мл з тестуванням різних концентрацій флокулянту – 0,25 г/л, 0,5 г/л, 1 г/л, 2 г/л, 3 г/л. Фіксувався час проходження межі розділу фаз на рівнях 70 мл, 60 мл та 50 мл.

Фракційний склад шламу включав найбільшу частку (близько 70%) частинок розміром 32-60 мкм з повільним осіданням та близько 30% частинок розміром понад 0,2 мм зі швидким осіданням.

При збільшенні концентрації флокулянту в 12 разів час осідання скорочувався в 1,57 рази. Раціональною визначено концентрацію флокулянта 1 г/л. У початковий період (перші 4 хвилини) швидкість осідання майже не залежала від концентрації флокулянтів, але зі збільшенням часу осідання вплив концентрації флокулянту ставав більш помітним.

Дана методика включає комплексний підхід з аналізом як хімічного складу, так і кінетики процесу осідання. Вміст хімічних елементів у воді відповідає нормам стандартів України та ЄС до і після очищення.

Основний механізм дії флокулянту – утворення осаду (гідроксид алюмінію та сульфат кальцію):



Це пояснює зниження вмісту кальцію у воді після флокуляції. Ефективність флокулянту зростає з часом через більш повну взаємодію з частинками шламу.

Оптимальна концентрація флокулянту (1 г/л) обрана на основі співвідношення ефективності та економічних витрат.

Результати цієї методики можуть бути використані для оптимізації процесу очищення води на підприємстві, забезпечуючи як екологічну безпеку, так і економічну ефективність [22].

2.4 Критерії оцінювання ефективності методів утилізації пульпи з точки зору охорони водних та земельних ресурсів

Кам'яна пульпа – це специфічний тип відходів, що утворюється в процесі обробки природного каменю. Згідно з даними підприємства "Гроніс", річний обсяг утворення пульпи становить 12,1 м³, що відповідає приблизно 6-10% від загального обсягу використаної сировини (120,59 м³). Згідно з (табл. 2.4), разом з пульпою підприємство також утворює значний об'єм буту (114,08 м³), що підтверджує високу частку відходів у каменеобробній галузі – близько 50% від загального обсягу виробництва.

На основі представлених у розділі 2.1 досліджень, пульпу можна класифікувати за двома основними категоріями:

1. Карбонатна пульпа – утворюється при обробці мармуру, вапняку та інших карбонатних порід
2. Силікатна пульпа – утворюється при обробці граніту, габро та інших силікатних порід

Специфіка підприємства «Гроніс», що спеціалізується на виробництві ритуальних виробів, передбачає переважне використання силікатних порід, таких як граніт і габро. Відповідно, пульпа, що утворюється на підприємстві, належить переважно до силікатного типу і додатково може бути класифікована залежно від способу утворення:

- пульпа від багатодискових блокорізних верстатів з алмазними пилами;
- змішана пульпа.

Аналіз гранулометричного складу (табл. 2.2) показує, що медіанний розмір частинок (d_{50}) у силікатній пульпі становить 7,7-8,3 мкм, а коефіцієнт однорідності (U) – 10-10,8. Ці характеристики роблять пульпу подібною до мулистого-глинистого ґрунту з низькою водопроникністю, що важливо враховувати при виборі методів утилізації.

Хімічний склад пульпи, що утворюється на підприємстві «Гроніс», характеризується вмістом певних металів, що потрапляють у відходи в процесі обробки каменю. Як зазначено в розділі 2.1, завдяки екологічній модернізації виробничих процесів і відмові від використання хлориду міді, підприємство змогло досягти IV класу небезпеки відходів, що значно розширило можливості для їх утилізації.

Основними екологічними критеріями оцінювання методів утилізації пульпи є вплив на якість поверхневих і підземних вод:

- концентрація важких металів у порівнянні з ГДК;
- зміна рН водного середовища;
- вміст завислих речовин;
- показники БСК₅ та ХСК.

За даними (табл. 2.4), хімічний аналіз води до і після процесів очищення показує, що вміст потенційно небезпечних елементів (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) не перевищує нормативних значень. Це свідчить про відносну екологічну безпечність пульпи, що утворюється на підприємстві «Гроніс».

Технологічна підготовка пульпи включає відкачування у мулові відстійники, викопування накопиченої пульпи та просушування на відкритих майданчиках або за допомогою спеціального обладнання.

Для оцінки економічної ефективності різних методів утилізації пульпи використовувалися наступні методики та формули розрахунків:

1. Визначення частки пульпи у загальному обсязі промислових відходів

Частка пульпи розраховувалась за формулою:

$$\text{Частка пульпи (\%)} = (\text{Обсяг пульпи} / \text{Обсяг сировини}) \cdot 100\%$$

Цей показник дозволяє оцінити масштаб проблеми утворення пульпи відносно загального обсягу використаної сировини.

2. Оцінка загальної частки відходів у каменеобробному виробництві

Для визначення загального навантаження на довкілля використовувалась формула:

Загальний обсяг відходів = Обсяг пульпи + Обсяг бута

Частка відходів (%) = (Загальний обсяг відходів / Загальний обсяг виробництва) · 100%

де Загальний обсяг виробництва = Загальний обсяг відходів + Корисна продукція.

Аналіз показав відсоткову частку відходів у каменеобробній промисловості від загального обсягу виробництва, що свідчить про значний потенціал для впровадження технологій переробки та утилізації.

3. Інтегральна оцінка методів утилізації пульпи

Для порівняльного аналізу різних методів утилізації пульпи застосовувався метод інтегральної оцінки, який враховував три ключові критерії ефективності:

- екологічна ефективність (Екол. Еф.);
- економічна ефективність (Екон. Еф.);
- технологічна ефективність (Техн. Еф.).

Інтегральна оцінка (ІО) розраховувалась за формулою:

$$ІО = (w_1 \cdot \text{Екол. Еф.} + w_2 \cdot \text{Екон. Еф.} + w_3 \cdot \text{Техн. Еф.}) / (w_1 + w_2 + w_3)$$

де – w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти для кожного критерію.

Для переведення якісних оцінок у кількісні значення використовувалась така шкала:

- висока ефективність = 5 балів;
- середня ефективність = 3 бали;
- низька ефективність = 1 бал.

4. Економічна оцінка впровадження технологій утилізації

Для оцінки економічної доцільності впровадження технологій утилізації пульпи використовувались наступні формули:

Загальні капітальні витрати = Обладнання для відкачування пульпи + Облаштування мулових відстійників + Обладнання для просушування пульпи.

Загальні експлуатаційні витрати = Електроенергія + Технічне обслуговування + Оплата праці персоналу + Транспортування пульпи на полігон.

Загальні економічні вигоди = Економія на платежах за розміщення відходів + Уникнення штрафів за забруднення + Потенційний дохід від реалізації пульпи.

Термін окупності = Загальні капітальні витрати / (Загальні економічні вигоди - Загальні експлуатаційні витрати).

Аналіз показав, що в залежності від обраного сценарію (оптимістичного чи песимістичного) термін окупності впровадження технологій утилізації пульпи складає від 1 до 13 років.

Використання комплексного підходу до оцінювання ефективності методів утилізації пульпи дозволяє зробити обґрунтований вибір оптимальної технології з урахуванням як екологічних критеріїв охорони водних та земельних ресурсів, так і економіко-технологічних параметрів впровадження.

Характеристики пульпи, зокрема її гранулометричний та хімічний склад, суттєво впливають на ефективність різних методів утилізації. Для використання у виробництві будівельних матеріалів оптимальним є дрібнодисперсний склад пульпи (медіанний розмір частинок менше 10 мкм). Для біоремедіації важливим є коефіцієнт однорідності, який для силікатної пульпи становить 10-10,8. При використанні пульпи для підсипки доріг та пересипання шарів ключовим фактором є досягнення оптимальної вологості.

Хімічний склад пульпи також визначає сфери її потенційного застосування. Вміст важких металів може обмежувати використання пульпи в сільському господарстві. Для виробництва будівельних матеріалів важливим є вміст оксиду кальцію (CaO) та діоксиду кремнію (SiO₂), а для біоремедіації важливе значення має рН пульпи, який для силікатних порід становить 8,4-9,3.

Варто зазначити, що завдяки впровадженню екологічно безпечніших технологій, зокрема відмові від використання хлориду міді та впровадженню китайських полірувальних дисків buff, підприємство «Гроніс» досягло IV класу

небезпеки відходів. Це значно розширило спектр можливих методів утилізації утвореної пульпи.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ГЕОЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ПУЛЬПИ

3.1 Механічні, фізико-хімічні та біологічні методи утилізації пульпи у контексті їх впливу на геокомпоненти

Механічні методи утилізації включають процеси зневоднення та згущення. Відстоювання (гравітаційне осадження) дозволяє знизити вологість до 50-60%, проте вимагає значних площ. Центрифугування із застосуванням фільтрувальних або осаджувальних центрифуг знижує вологість до 25-35%, але характеризується високими енергетичними витратами. Найефективнішим є фільтрування з використанням вакуум-фільтрів, дискових фільтрів та фільтр-пресів, що знижують вологість до 10-15%. У сучасних установках фільтр-преси дозволяють відновлювати до 90% води, залишаючи шлам з вологістю 22-28% [23].

Фізико-хімічні методи передбачають використання реагентів для інтенсифікації процесів розділення фаз. Коагуляція із застосуванням солей алюмінію або заліза прискорює осадження в 2-5 разів. Флокуляція з використанням полімерних флокулянтів збільшує швидкість осадження в 8-15 разів. Хімічна модифікація (нейтралізація, окислення, силікатизація) застосовується для стабілізації шламу. Електрохімічні методи (електрокоагуляція, електрофлотація) дозволяють досягти високого ступеня очищення без додавання реагентів.

Комбіновані технології, що поєднують механічні та фізико-хімічні методи, є найефективнішими для утилізації пульпи. Типова послідовність операцій включає гомогенізацію пульпи, коригування рН, введення коагулянту та флокулянту, згущення та механічне зневоднення.

Зневоднена пульпа знаходить застосування в будівельній промисловості (виробництво цементу, бетону, цегли, керамічної плитки), дорожньому будівництві, сільському господарстві та для очищення стічних вод.

Адсорбція є економічно вигідним та надійним методом очищення стічних вод з ефективністю видалення забруднень до 99,9%. Цей процес включає масоперенос розчинених речовин з рідкої фази на поверхню твердої фази, проходячи три основні етапи: міграцію адсорбату до зовнішньої оболонки адсорбенту, внутрішню частинкову дифузію в пори та безпосередньо адсорбцію розчиненої речовини. Серед поширених сорбентів виділяють активоване вугілля, яке є нетоксичним матеріалом з високою ефективністю завдяки пористій структурі, біосорбенти на основі сільськогосподарських відходів, силіку з великою площею поверхні та оксиди металів, особливо наноматеріали на основі оксиду титану (TiO_2), які демонструють значну адсорбційну здатність через високу питому площу поверхні та доступні активні центри для зв'язування забруднювачів.

У порівнянні з альтернативними методами очищення, такими як мембранна фільтрація, сорбційні методи вирізняються простотою виконання та меншими витратами, хоча для підвищення ефективності очищення фільтраційних вод перспективним є використання комбінованих технологій, що дозволяє досягти синергетичного ефекту та забезпечити більш повне видалення забруднюючих речовин.

Поряд із фізико-хімічними методами очищення, все більшого значення набувають біологічні методи відновлення забруднених територій. Каменеобробна галузь спричиняє забруднення ґрунтів важкими металами через використання різного виду інструментів у обробці, що призводить до накопичення токсичних сполук кадмію, свинцю, міді та цинку в ґрунтовому комплексі. Одним із методів екологічного очищення вважається біологічний метод, зокрема фіторемедіація, яка об'єднує комплекс природних процесів: фітостабілізацію (іммобілізацію забруднювачів кореневою системою), фітоекстракцію (вилучення токсикантів із ґрунту та транслокацію їх у надземні

органи), фітодеградацію (розкладання ксенобіотиків до нетоксичних сполук) та ризофільтрацію (вилучення розчинених форм забруднювачів із ґрунтової вологи). Особливо перспективним є використання енергетичних культур (міскантус, світчграс, верба, тополя), які активно накопичують важкі метали у своїй біомасі, формують потужну кореневу систему та надземну частину, що дозволяє не лише очищувати забруднені території, але й отримувати біомасу для енергетичних цілей, перетворюючи процес фіторе mediaції у прибуткову галузь біоенергетичної промисловості [24].

3.2 Ефективність методів щодо зниження негативного впливу на водні та земельні ресурси на досліджуваному об'єкті

Для оцінки ефективності різних методів утилізації кам'яної пульпи на підприємстві "Гроніс" було застосовано метод інтегральної оцінки, що враховує екологічні критерії впливу на водні ресурси (концентрація важких металів, рН, вміст завислих речовин, показники БСК₅ та ХСК) та земельні ресурси (рівень забруднення важкими металами, зміна фізико-хімічних властивостей ґрунту). За результатами аналізу, найвищу інтегральну оцінку отримали методи використання пульпи у виробництві будівельних матеріалів та застосування для підсипки доріг, тоді як інші методи отримали нижчі оцінки (табл. 3.1).

Аналіз впливу методів утилізації на водні ресурси показав, що найменший ризик забруднення поверхневих і підземних вод має метод використання пульпи у виробництві будівельних матеріалів (мінімальний ризик забруднення через іммобілізацію важких металів у цементній матриці).

Щодо впливу на земельні ресурси, силікатна пульпа підприємства "Гроніс" характеризується медіанним розміром частинок 7,7-8,3 мкм та коефіцієнтом однорідності (U) 10-10,8, що робить її подібною до мулистоглинистих ґрунтів з низькою водопроникністю. Найбільш безпечними для земельних ресурсів є методи, що передбачають стабілізацію або іммобілізацію потенційно небезпечних компонентів пульпи – використання у виробництві будівельних

матеріалів та біоремедіація з правильно підібраними рослинами фіторемедіаторами. Використання пульпи для підсипки доріг створює середній ризик забруднення ґрунтів з негативним локальним впливом на родючість, проте цей метод є економічно ефективним та технологічно простим (табл.. 3.1).

Таблиця 3.1

Порівняльна характеристика методів утилізації кам'яної пульпи на підприємстві "Гроніс"

Метод утилізації	Інтегральна оцінка (бали)	Вплив на водні ресурси	Вплив на земельні ресурси	Економічні показники
Використання у виробництві будівельних матеріалів	4,3	Мінімальний ризик забруднення через іммобілізацію важких металів у цементній матриці	Безпечний: стабілізація потенційно небезпечних компонентів	Економія на платежах за відходи, потенційний дохід від реалізації продукції
Використання для підсипки доріг	4,3	Середній ризик забруднення (потребує протифільтраційних екранів)	Середній ризик: може негативно впливати на локальну родючість	Економічно ефективний, технологічно простий
Біоремедіація	3,7	Низький ризик за умови правильного підбору рослин	Безпечний: рослини-гіперакумулятори поглинають важкі метали	Екологічно чистий метод для пульпи IV класу небезпеки
Захоронення на полігоні ТПВ	3,7	Високий ризик забруднення поверхневих і підземних вод	Високий ризик забруднення	Високі платежі за розміщення відходів
Використання в сільському господарстві	3,3	Високий ризик міграції важких металів у ґрунтові води	Високий ризик забруднення сільгоспугідь	Не вказано

На основі комплексного аналізу для підприємства "Гроніс" рекомендуються три основні методи утилізації кам'яної пульпи в порядку пріоритетності. Першим є використання пульпи у виробництві будівельних матеріалів, що забезпечує найвищий рівень екологічної безпеки та має відносно

короткий термін окупності (1-3 роки). Силікатна пульпа з медіанним розміром частинок 7,7-8,3 мкм ідеально підходить для використання в якості мінерального наповнювача в бетонних сумішах, де вона може замінити до 15-20% цементу, що також має позитивний економічний ефект. Другим рекомендованим методом є біоремедіація, що являє собою екологічно чистий метод, особливо ефективний для пульпи IV класу небезпеки. Для підприємства "Гроніс" рекомендується технологія фіторемедіації з використанням рослин-гіперакумуляторів, здатних накопичувати важкі метали без суттєвого порушення своїх фізіологічних функцій. Третім є використання пульпи для підсипки доріг, що допустимо за умови влаштування протифільтраційних екранів для запобігання міграції потенційно небезпечних елементів у ґрунти та ґрунтові води, особливо на територіях з глибоким заляганням ґрунтових вод (понад 5 м).

Впровадження рекомендованих методів утилізації кам'яної пульпи дозволить суттєво знизити негативний вплив на водні та земельні ресурси. Економічний ефект досягається за рахунок економії на платежах за розміщення відходів на полігонах, уникнення штрафів за забруднення навколишнього середовища та потенційного доходу від реалізації продуктів переробки пульпи. Розрахунки показують, що залежно від обраного сценарію термін окупності впровадження технологій утилізації пульпи для підприємства складає від 1 до 13 років, причому найкоротший термін окупності має метод використання пульпи для виробництва будівельних матеріалів.

Для забезпечення екологічної безпеки при впровадженні рекомендованих методів утилізації кам'яної пульпи необхідно розробити та реалізувати систему екологічного моніторингу, що включає контроль якості поверхневих та підземних вод, моніторинг стану ґрунтів та контроль якості продукції при використанні пульпи у виробництві будівельних матеріалів. Такий моніторинг рекомендується проводити не рідше одного разу на рік, а також після кожної зміни технології виробництва чи обробки каменю, що може вплинути на склад та властивості утворюваної пульпи.

Варто відзначити, що методи захоронення пульпи на полігоні ТПВ та використання в сільському господарстві мають найвищі ризики негативного впливу на водні та земельні ресурси і рекомендуються лише у випадку неможливості застосування інших методів. Комплексне застосування рекомендованих методів утилізації кам'яної пульпи дозволить підприємству "Гроніс" не лише мінімізувати негативний вплив на довкілля, але й отримати додаткові економічні вигоди за рахунок зменшення екологічних платежів та комерціалізації продуктів переробки відходів.

3.3 Економічна доцільність впровадження сучасних методів утилізації пульпи з урахуванням екологічних наслідків

Впровадження сучасних методів утилізації пульпи на підприємстві «Гроніс» є важливим кроком не лише з точки зору оптимізації виробничих витрат, але й для мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Як було описано у розділі 2.1 «Методи дослідження ефективності утилізації пульпи та оцінки її впливу на водні та земельні ресурси», традиційні методи поводження з кам'яною пульпою, особливо забрудненою хлоридом міді (до впровадження нових технологій), призводили до значного забруднення земельних та водних ресурсів у Коростишівській громаді (див. рис. 2.4).

Перехід підприємства «Гроніс» на використання полірувальних дисків buff (див. рис. 2.5) дозволив отримувати пульпу IV класу небезпеки, що є інертним та нетоксичним відходом. Впровадження італійської технології відкачування та підготовки пульпи, економічний аналіз якої представлений далі, є важливим елементом комплексного підходу до утилізації. Ця технологія не лише готує пульпу до безпечного використання, наприклад, для пересипання шарів на полігонах ТПВ, але й запобігає її неконтрольованому потраплянню в навколишнє середовище у рідкому стані, що раніше було серйозною проблемою.

Таким чином, економічна доцільність впровадження технології підготовки кам'яної пульпи, нерозривно пов'язана зі значними екологічними вигодами.

Уникнення штрафів за забруднення (одна зі складових економічних вигод) є прямим наслідком зменшення негативного екологічного впливу завдяки контрольованій та безпечній утилізації пульпи. Впровадження цих сучасних методів сприяє більш відповідальному природокористуванню та узгоджується з принципами сталого розвитку.

Впровадження технології підготовки кам'яної пульпи на підприємстві «Гроніс» пов'язане з певними економічними витратами, проте обіцяє значні вигоди в перспективі (табл. 3.2, рис. 3.1, рис. 3.2).

Таблиця 3.2

Економічний аналіз впровадження технології утилізації пульпи

Капітальні витрати, тис. грн	Річні експлуатаційні витрати, тис. грн.	Економічні вигоди, тис. грн.
Відкачування пульпи: 150-200	Електроенергія: 40-60	Економія на платежах: 100-150
Мулові відстійники: 100-150	Техобслуговування: 30-50	Уникнення штрафів: 200-500
Просушування пульпи: 200-300	Транспортування: 60-70	Дохід від вторсировини: 50-100
Загалом 450-650/рік	Загалом: 200-300/рік	Загалом: 350-750/рік

Економічний аналіз впровадження технології утилізації пульпи на підприємстві «Гроніс» показує, що початкові інвестиції в обладнання хоча й є значними, але обіцяють суттєві річні економічні вигоди. Ці вигоди включають економію на платежах за розміщення відходів, уникнення штрафів за забруднення та дохід від реалізації пульпи як вторсировини.

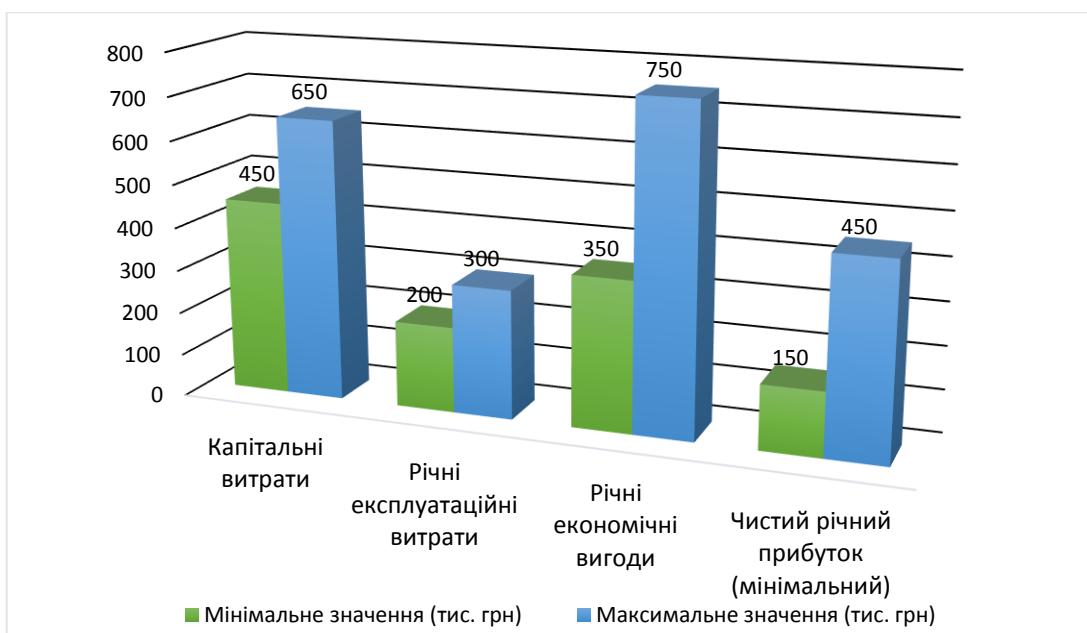


Рис. 3.1. Порівняння витрат та економічної вигоди (тис. грн.)

Термін окупності інвестицій залежить від сценарію (рис. 3.2).

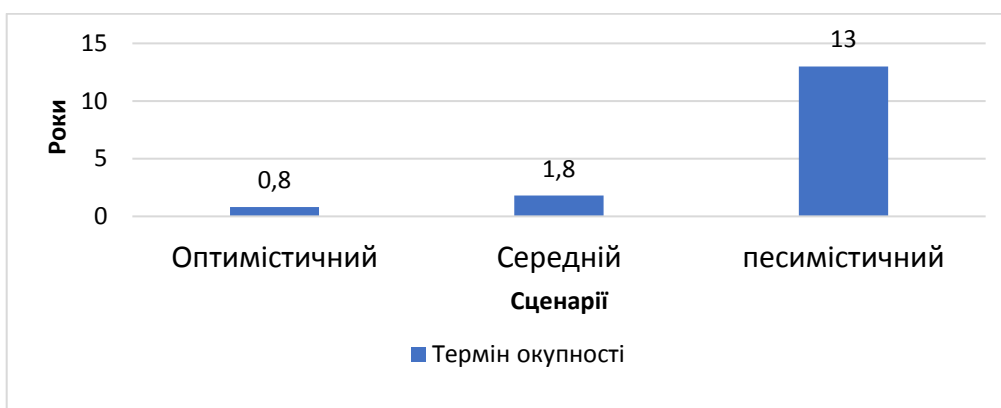


Рис. 3.2. Терміни окупності витрат

Згідно з виконаним аналізом термінів окупності витрат слід зазначити, що термін окупності інвестицій суттєво залежить від обраного сценарію.

- Оптимістичний сценарій. Термін окупності становить 0,8 року. Це найкоротший термін, що свідчить про швидке повернення інвестицій за найбільш сприятливих умов.
- Середній сценарій. Термін окупності збільшується до 1,8 року. Цей сценарій, ймовірно, відображає більш реалістичні умови та очікування.
- Песимістичний сценарій. Термін окупності є найдовшим і становить 13 років. Це вказує на значні ризики та можливість дуже тривалого повернення інвестицій у несприятливих умовах.

РОЗДІЛ 4

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ПУЛЬПИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВОДНИХ ТА ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

4.1 Інноваційні геоекологічно орієнтовані методи переробки та використання пульпи як вторинної сировини

Вилучення цінних компонентів, таких як метали та рідкоземельні елементи, з відходів гірничодобувної промисловості (пульпи) є важливим напрямком для забезпечення сталого розвитку галузі. Ці відходи часто містять значні концентрації цінних елементів, які раніше вважалися економічно не вигідними для вилучення.

Процес вилучення включає кілька ключових етапів. Спочатку застосовуються методи подрібнення (наприклад, перемішувальне помелення) для розкриття мінералів та очищення їх поверхонь. Потім використовуються технології розділення за розміром (циклони) та методи сепарації мінералів від пустої породи. Такі методи включають флотацію та гравітаційне збагачення. Успішне застосування цих технологій залежить від детального мінералогічного аналізу відходів. За даними досліджень Whitworth, A. J [25], впровадження ефективних методів вилучення не лише забезпечує додаткове джерело критичних металів, але й сприяє зменшенню екологічного навантаження.

Крім вилучення цінних компонентів, іншим перспективним напрямком утилізації є використання шламу в будівельній галузі. Дослідження демонструють ефективність використання цього шламу як часткової заміни традиційних компонентів у виробництві будівельних матеріалів, зокрема бетону. Експериментально доведено, що додавання шламу може покращити когезію та консистенцію бетонної суміші. Це також підвищує міцність на осьовий стиск. Одночасне використання переробленого кам'яного заповнювача сприяє

зменшенню водопоглинення та індексу пустотності бетону, зберігаючи при цьому достатню ударостійкість.

Особливо перспективним є виготовлення гранілітобетону з використанням шламу та переробленого каменю. Цей підхід дозволяє отримувати декоративні та міцні матеріали для різних будівельних застосувань. Хоча очищення поверхонь з такого бетону від плям може бути ускладненим без попередньої гідроізоляції, загалом використання відходів обробки декоративного каменю у виробництві бетону є екологічно та економічно доцільним рішенням. Як зазначено в дослідженні Richetti, F [26], це сприяє сталому розвитку будівельної галузі шляхом збереження природних ресурсів та мінімізації промислових відходів.

Важливим напрямком є також застосування пульпи целюлозно-паперових комбінатів у сільському господарстві. З урахуванням значних обсягів утворення такої пульпи, її використання як меліоранту та ґрунтоутворюючої добавки набуває особливого значення. Пульпа целюлозно-паперових комбінатів поділяється на первинну та вторинну. Вона характеризується високим вмістом органічних речовин та потенційною вапнуючою здатністю завдяки вмісту карбонату кальцію. Це робить її цінною для покращення фізико-хімічних властивостей ґрунтів, особливо кислих.

При використанні первинної пульпи існує ризик зв'язування азоту через високе співвідношення вуглецю до азоту. Проте цей ефект можна мінімізувати шляхом внесення азотних добрив або попередньої обробки пульпи. Дослідження Turner T. [27] підтверджують позитивний вплив внесення пульпи на ріст сільськогосподарських культур без значного негативного екологічного впливу при типових нормах застосування. Для визначення придатності кожного виду пульпи в агрономії необхідна індивідуальна характеристика, що робить цей підхід потенційно екологічно відповідальним рішенням для утилізації відходів целюлозно-паперової промисловості.

4.2 Міжнародний досвід впровадження безвідходних та маловідходних технологій у галузях, що утворюють пульпу, з акцентом на охорону водних та земельних ресурсів

Аналіз діяльності підприємств з обробки природного каменю в Туреччині виявив значний обсяг щоденного утворення відходів, включаючи тверді відходи та шлам [28]. Це підкреслює актуальність пошуку шляхів утилізації цих матеріалів не лише в Туреччині, але й в інших країнах з розвинутою промисловістю природного каменю.

У Бразилії роботи науковців зосереджувалися на потенціалі використання відходів декоративного каменю у виробництві червоної кераміки. Результати показали помітне покращення властивостей кінцевого продукту при додаванні шламу.

Паралельно португальські фахівці активно вивчали можливості застосування відходів різання та полірування природного каменю, зокрема граніту. Особлива увага приділялася виробництву покрівельної черепиці та екологічно чистої цегли з покращеними характеристиками. Ці приклади свідчать про зростаючий інтерес до повторного використання кам'яних відходів у будівельній галузі різних країн.

Окрім керамічної промисловості, в різних країнах також проводиться пошук методів використання кам'яних відходів як стабілізаторів ґрунту та сировини для геополімерів. Особливої уваги заслуговують лугоактивовані суміші. Зокрема, в Португалії ведеться поглиблена робота з розробки будівельних кам'яних композитів на основі карбонізованого шламу та поліефірних смол. Мета таких розробок — створення економічно вигідних та екологічно стійких будівельних матеріалів. Різноманітні напрямки цих робіт у різних країнах підтверджують глобальне розуміння цінності повторного використання кам'яних відходів для зменшення екологічного навантаження та сприяння циркулярній економіці [29].

4.3 Розробка комплексної геоекологічної програми управління пульповими відходами для досліджуваного об'єкта

Зважаючи на аналіз діяльності каменеобробного підприємства «Гроніс» та виявлені екологічні наслідки поводження з пульповими відходами, розроблено комплексну геоекологічну програму управління цими відходами (рис. 4.1). Програма націлена на мінімізацію негативного впливу на водні та земельні ресурси шляхом системного підходу до утилізації пульпи з урахуванням екологічних, економічних та технологічних аспектів.

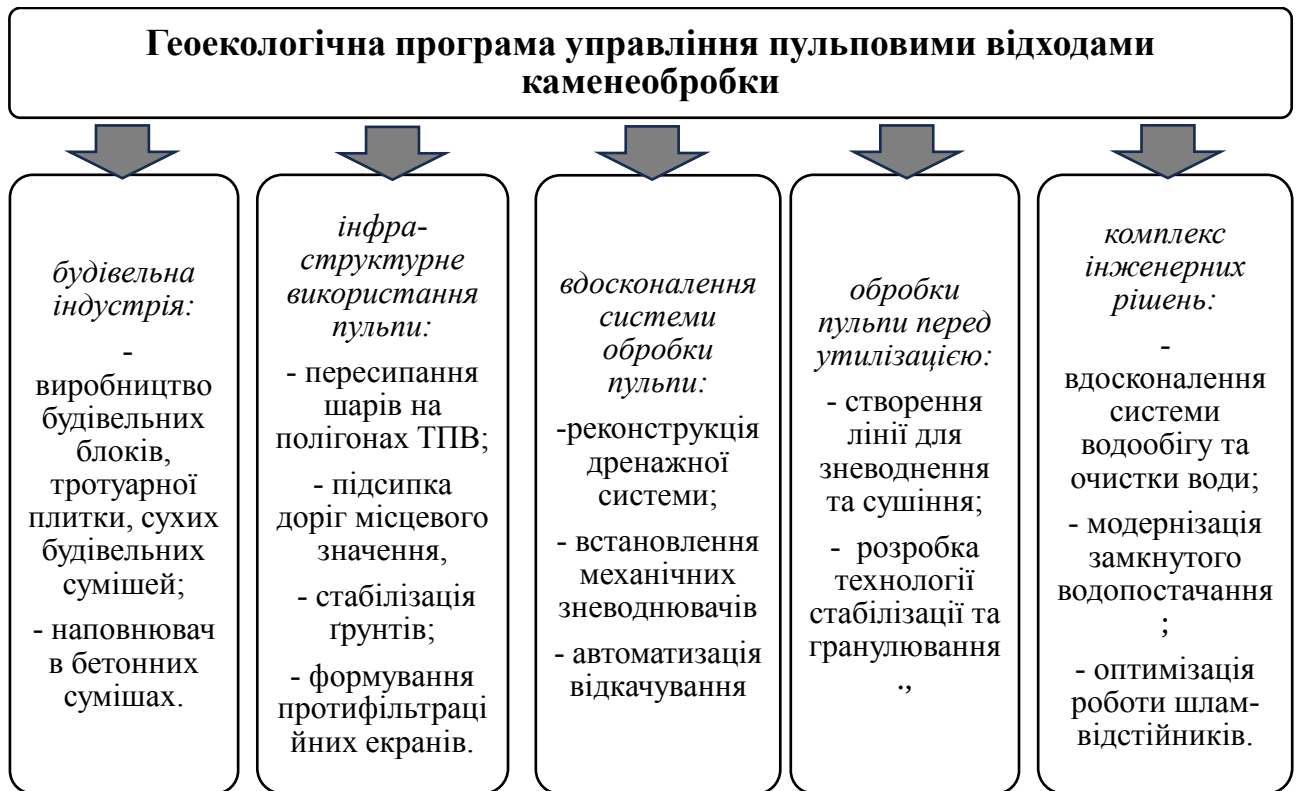


Рис. 4.1. Модель геоекологічної програми поводження з пульповими відходами каменеобробного підприємства

Аналіз поточної ситуації на підприємстві «Гроніс» виявив значний обсяг утворення пульпи (близько 12,1 м³ щорічно) та буту (114,08 м³), що підкреслює високу частку відходів у каменеобробній галузі. Завдяки застосуванню екологічно безпечної технології полірування та відмові від хлориду міді, силікатна пульпа підприємства має IV клас небезпеки, що відкриває широкі можливості для її утилізації.

Виходячи з фізико-хімічних властивостей пульпи, визначено пріоритетні напрямки її використання. Першочергово пропонується застосування пульпи в будівельній індустрії для виробництва будівельних блоків, тротуарної плитки, сухих будівельних сумішей та як наповнювача в бетонних сумішах. Лабораторні

дослідження підтвердили, що додавання пульпи в зазначених пропорціях не погіршує, а іноді навіть покращує експлуатаційні характеристики будівельних матеріалів.

Другим пріоритетом є інфраструктурне використання пульпи для пересипання шарів на полігонах ТПВ, підсіпки доріг місцевого значення, стабілізації ґрунтів та формування протифільтраційних екранів. Важливою умовою для цього є підтримання належної вологості пульпи.

Спеціальні напрямки утилізації, такі як використання в композитних матеріалах, керамічних виробах та мінеральних пігментах, мають високу додану вартість, але потребують додаткової технологічної підготовки.

Для контролю ефективності запропонованих заходів розроблено комплексну систему моніторингу стану навколишнього середовища, що охоплює поверхневі та підземні води, ґрунти та якість пульпи. Система передбачає створення мережі точок відбору проб, визначення контрольованих параметрів, встановлення періодичності відбору та використання сертифікованих лабораторій для аналізів. Запропоновано також впровадження автоматизованої системи контролю з використанням датчиків та метеостанції, а також програмного забезпечення для збору та аналізу даних. Система звітності включає формування квартальних внутрішніх та річних звітів для екологічної інспекції, а також публічних звітів для місцевої громади.

Для мінімізації негативного впливу пульпи на водні та земельні ресурси запропоновано комплекс інженерних рішень, включаючи вдосконалення системи водообігу та очистки води (модернізація замкнутого водопостачання, оптимізація роботи шлам-відстійників), вдосконалення системи збору та обробки пульпи (реконструкція дренажної системи, встановлення механічних зневоднювачів, автоматизація відкачування), технології обробки пульпи перед утилізацією (створення лінії для зневоднення та сушіння, розробка технології стабілізації та гранулювання), заходи щодо зменшення пилоутворення (впровадження системи пилоподавлення, модернізація аспіраційної системи, оптимізація умов

зберігання) та технологічні рішення для впровадження пріоритетних напрямків утилізації.

Таким чином, розроблена комплексна геоекологічна програма управління пульповими відходами для підприємства «Гроніс» є економічно вигідною та екологічно обґрунтованою інвестицією, що сприятиме сталому розвитку підприємства та регіону.

4.4 Рекомендації щодо вибору оптимальних методів утилізації пульпи для різних типів підприємств з урахуванням геоекологічних вимог та можливостей повторного використання ресурсів

В Україні поводження з пульпою регулюється законами «Про відходи», «Про охорону навколишнього природного середовища» та «Податковим кодексом України». Підприємства мають мінімізувати відходи, безпечно їх утилізувати та повторно використовувати ресурси. Відповідно до Закону «Про оцінку впливу на довкілля», підприємства, які генерують значні обсяги пульпи I та II класів небезпеки, зобов'язані пройти оцінку впливу на довкілля.

Властивості пульпи залежать від галузі промисловості та технологічних процесів. У різних галузях утворюються різні типи пульпи:

- у гірничодобувній промисловості виникає відвальна пульпа при збагаченні руд та хвостова пульпа після вилучення корисних компонентів;
- у хімічній промисловості утворюється технологічна пульпа при виробництві добрив та пігментів, а також осад при очищенні стічних вод;
- у целюлозно-паперовій промисловості генерується деревна пульпа (целюлоза) та утворюються стічні води з високим вмістом волокон;
- у будівельній промисловості формується шламова пульпа при виробництві цементу та будівельних матеріалів;
- у харчовій промисловості виникає органічна пульпа при переробці продуктів харчування;

- у каменеобробній промисловості утворюється шламова пульпа, що складається з дрібнодисперсних частинок каменю та абразивних матеріалів, які використовуються в процесі обробки.

Для наочності взаємозв'язку між галуззю промисловості, типом пульпи та рівнем екологічної небезпеки розроблено узагальнену таблицю (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Класифікація за комбінованими критеріями

Галузь промисловості	Тип утворюваної пульпи	Основні забруднювачі	Рівень екологічної небезпеки (орієнтовно)
Гірничодобувна	Хвостова пульпа	Важкі метали, ціаніди, сульфіді, радіонукліди	I-II клас (залежить від руди та технології)
Хімічна	Технологічна пульпа, осад стічних вод	Кислоти, луги, солі важких металів, органічні сполуки	I-III клас (залежить від продукції)
Целюлозно-паперова	Стічні води з волокнами, лігнінові осади	Органічні речовини, хлорорганічні сполуки, завислі речовини	II-III клас
Металургія	Шлами (від очищення газів, стічних вод)	Важкі метали, оксиди металів, органічні домішки	I-II клас
Енергетика	Зольна пульпа	Важкі метали, сполуки сірки, азоту (при мокрому золовидаленні)	II-III клас
Харчова	Органічна пульпа	Органічні речовини, жири, завислі речовини	III-IV клас
Каменеобробна	Шлам, пил	Дрібнодисперсні частинки каменю, абразивні матеріали	III-IV клас (залежить від типу каменю та технології)

За рівнем екологічної небезпеки підприємства поділяють на чотири класи.

I клас (надзвичайно небезпечні) – підприємства, що утворюють пульпу з токсичними, канцерогенними чи вибухонебезпечними речовинами (наприклад, хімічні підприємства, які використовують ртуть, кадмій або ціаніди);

II клас (високонебезпечні) – підприємства, що утворюють пульпу з високотоксичними речовинами, які викликають довготривале забруднення (гірничодобувні комбінати з відходами, що містять важкі метали).

III клас (помірно небезпечні) – підприємства з пульпою, що містить помірно токсичні речовини (підприємства машинобудування та металообробки).

IV клас (малонебезпечні) – підприємства з пульпою, що містить малотоксичні речовини (невеликі сільськогосподарські, каменеобробні та харчові підприємства) (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Класифікація підприємств за галуззю промисловості, типом пульпи та рівнем екологічної небезпеки

Найнебезпечніші типи пульпи утворюються в гірничодобувній, хімічній та металургійній промисловості через вміст важких металів та токсичних сполук.

На рівень екологічної небезпеки впливають не лише хімічний склад пульпи, а й її обсяги та застосовані технології очищення. Навіть малонебезпечна

пульпа у великих кількостях може становити загрозу через кумулятивний ефект, а сучасні методи очищення здатні знизити небезпеку підприємства.

Класифікація підприємств за типом утворюваної пульпи вимагає врахування специфіки кожного виробництва, обсягів відходів та їх потенційного впливу на навколишнє середовище.

Для підприємств I-II класів небезпеки найбільш доцільними є комбіновані методи утилізації, що включають фізико-хімічні процеси (нейтралізація, осадження важких металів, розділення фаз) та подальшу стабілізацію твердих залишків. Для гірничодобувної та металургійної промисловості перспективним є вилучення цінних компонентів з хвостової пульпи за допомогою біовилуговування та інших біотехнологій, що одночасно забезпечує економічну вигоду та зниження токсичності відходів. Для підприємств III-IV класів небезпеки раціонально застосовувати методи зневоднення пульпи з подальшим використанням твердої фази як вторинної сировини, а рідкої – після очищення – в оборотному водопостачанні.

Впровадження найкращих доступних технологій (НДТ) у сфері управління пульповими відходами має базуватися на принципі запобігання утворенню відходів шляхом оптимізації технологічних процесів та переходу до замкнутих циклів виробництва. Це передбачає встановлення сучасних систем фільтрації та зневоднення пульпи, технологій вакуумної сушки та грануляції осадів, що дозволяють отримати товарні продукти замість відходів. Реалізація цих рекомендацій потребує запровадження економічних стимулів та розвитку нормативної бази щодо застосування НДТ.

ВИСНОВКИ

Підсумовуючи, пульпа є значним геоекологічним фактором, що утворюється внаслідок промислової діяльності, зокрема гірничодобувної, целюлозно-паперової та каменеобробної галузей. Її неналежна утилізація призводить до серйозного забруднення води, ґрунту та повітря, негативно впливаючи на екосистеми та здоров'я людини. Сучасні підходи до управління пульповими відходами зміщуються від традиційних захоронення та спалювання до більш сталих методів, таких як компостування, анаеробне зброджування та повторне використання як вторинної сировини, що відповідає принципам циркулярної економіки. В Україні новий Закон «Про управління відходами» (2023 р.) гармонізує національне законодавство з європейськими стандартами, запроваджуючи ієрархію відходів та розширену відповідальність виробника, що є ключовим кроком до ефективного та екологічно обґрунтованого поводження з пульпою.

Дослідження методів утилізації кам'яної пульпи та її впливу на довкілля показує, що для ефективного та екологічно безпечного поводження з цим типом відходів необхідний комплексний підхід, що враховує як фізико-хімічні властивості пульпи, так і економічну доцільність обраних методів.

Внаслідок успішної модернізації на підприємстві «Гроніс» у місті Коростишів, (відмова від використання шкідливих речовин (хром (III) оксид) та впровадження нової технології полірування) було досягнуто IV класу небезпеки відходів. Це дозволило використовувати пульпу для пересипання шарів на полігонах твердих побутових відходів, у виробництві будівельних матеріалів та для підсипки доріг, зменшуючи ризики забруднення води та ґрунту.

Застосування хімічного, гранулометричного аналізу та біотестування, поряд з економічним аналізом, дозволяє всебічно оцінити ефективність утилізації та мінімізувати негативний вплив на водні та земельні ресурси, сприяючи сталому розвитку каменеобробної галузі.

Економічний аналіз підтверджує доцільність інвестицій у впровадження італійської технології підготовки кам'яної пульпи на підприємстві «Гроніс». Впровадження технології є економічно доцільним. Це забезпечує економію на платежах за відходи (100-150 тис. грн./рік), уникнення штрафів (200-500 тис. грн./рік) та додатковий дохід від реалізації вторсировини (50-100 тис. грн./рік). Загальні річні вигоди становлять 350-750 тис. грн. При цьому, початкові інвестиції (450-650 тис. грн.) та експлуатаційні витрати (200-300 тис. грн./рік) окупаються досить швидко: за оптимістичним сценарієм – 0,8 року, за середнім – 1,8 року. Ця технологія демонструє синергію екологічної відповідальності та економічної вигоди.

Проаналізовані перспективні напрямки вдосконалення технологій утилізації пульпи для забезпечення екологічної безпеки водних та земельних ресурсів підкреслюють важливість комплексного підходу. Вилучення цінних компонентів з гірничодобувних відходів, використання шламу в будівельній галузі для створення нових матеріалів, а також застосування пульпи целюлозно-паперових комбінатів у сільському господарстві демонструють інноваційні геоекологічно орієнтовані методи переробки.

Міжнародний досвід підтверджує ефективність безвідходних та маловідходних технологій, а розроблена для підприємства «Гроніс» геоекологічна програма управління пульповими відходами є прикладом системного вирішення проблеми.

Запропонована класифікація підприємств за рівнем небезпеки пульпи та рекомендації щодо вибору оптимальних методів утилізації забезпечують базу для сталого розвитку та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище, що є ключовим для реалізації принципів циркулярної економіки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Камінський В. Л. Управління екологізацією промисловості ПРАТ «ПІВНІЧНИЙ ГІРНИЧОЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ КОМБІНАТ» : кваліфікаційна робота магістра : 051 «Економіка» / наук. керівник С. О. Корінний. Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 116 с.
2. Бригінець К. Д., Абашина К. О. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Утилізація промислових відходів» (для студентів 3 курсу денної форми навчання напряму підготовки 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування»). Харків: ХНАМГ, 2012. 30 с.
3. Singh S., Tiwari M. K. A case study on pulp and paper industry effluent treatment. International Conference on Infrastructure Development and Environment Assessment (Gaya, India, 2021). Gaya : Gaya College of Engineering, 2021. P. 107–119. URL: https://www.researchgate.net/profile/Vikram-Kumar-5/publication/357931783_WEENTECH_Proceedings_in_Energy/links/61e802499a753545e2e0e637/WEENTECH-Proceedings-in-Energy.pdf#page=127 (дата звернення: 13.05.2025).
4. Брагіна Л. Л., Рябінін С. О., Федоренко О. Ю., Дегурко О. П., Мельник С. О. Сучасний стан та перспективи використання відходів каменевидобування і каменеобробки в силікатних галузях (огляд). Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки. 2020. № 120. С. 196–210. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vognetryv_2020_120_21 (дата звернення: 13.05.2025).
5. Утилізація твердих побутових відходів у м. Жовті Води (Україна). URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/42463264-4963-4755-8f4b-805110a9ddaf/download> (дата звернення: 13.05.2025).
6. Методи, які використовують країни світу для контролю промислових відходів. Ecolog-ua.com : вебсайт. URL: <https://ecolog-ua.com/news/metody-yaki->

[vykorystovuyut-krayiny-svitu-dlya-kontrolyu-promyslovyh-vidhodiv](#)

(дата

звернення: 13.05.2025).

7. Яцук С. В. Технології захисту гідросфери в целюлозно-паперовій промисловості : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : 183 «Технології захисту навколишнього середовища» / наук. кер. Є. В. Батальцев. Суми: Сумський державний університет, 2023. 49 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/91959> (дата звернення: 13.05.2025).

8. Тимощук Л. Європейські стандарти у галузі поводження з відходами: що це таке і як вони реалізуються в Україні? Міжнародна благодійна організація «Екологія – Право – Людина» : вебсайт. Київ, 2017. URL: <https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2019/09/YEvropejski-standarty-u-galuzi-povodzhennya-z-vidhodamy.pdf> (дата звернення: 13.05.2025).

9. Компостування як спосіб утилізації органічних відходів. URL: <https://vseosvita.ua/library/embed/01006vld-fl79.doc.html> (дата звернення: 13.05.2025).

10. Біогазові рішення. Biotechprom : вебсайт. URL: <https://biotechprom.com/technologies/biogazovi-rishennya/> (дата звернення: 13.05.2025).

11. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 р. № 2320-IX. Відомості Верховної Ради України. 2023. № 17. Ст. 75. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-IX> (дата звернення: 13.05.2025).

12. Порядок класифікації відходів : затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2023 р. № 1102. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2023-п> (дата звернення: 13.05.2025).

13. Тверді відходи целюлозно-паперового виробництва. URL: <https://metod.vntu.edu.ua/getfile.php/7436.pdf> (дата звернення: 13.05.2025).

14. Директива Європейського Парламенту і Ради 2008/98/ЄС від 19 листопада 2008 року про відходи та про скасування деяких директив (Текст стосується ЄП) : документ 984_029-08 у редакції від 05.07.2018. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08 (дата звернення: 13.05.2025).

15. Базельська конвенція про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням : міжнародний документ від 22.03.1989 р. № 995_022 : ратифіковано Законом України від 01.07.1999 р. № 803-XIV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_022 (дата звернення: 13.05.2025).

16. Роттердамська конвенція про процедуру Попередньої обґрунтованої згоди відносно окремих небезпечних хімічних речовин та пестицидів у міжнародній торгівлі : міжнародний документ № 995_a35 : приєднання від 26.09.2002 р., підстава - Закон України № 169-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_a35 (дата звернення: 13.05.2025).

17. Росохата А. С., Ілляшенко А. Г., Матвєєва Ю. А. Компаративний аналіз нормативного забезпечення системи управління відходами. Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка. 2025. № 2. С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-57>.

18. Каредду Н., Діно Г. А. Reuse of residual sludge from stone processing: differences and similarities between sludge coming from carbonate and silicate stones—Italian experiences. Environmental Earth Sciences. 2016. № 75(19). С. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5865-1>.

19. Геологія Житомир та область: особливості та прикладна інформація. URL: <https://topograph.com.ua/uk/blog/geologiya-zhytomyr-ta-oblast-osoblyvosti-ta-prykladna-informacziya/> (дата звернення: 17.05.2025)

20. Zichella L., Bellopede R., Spriano S., Marini P. Preliminary investigations on stone cutting sludge processing for a future recovery. Journal of Cleaner Production. 2018. № 178. С. 866–876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.226>.

21. Офіційний сайт компанії «Гроніс». URL: <https://gronis.com.ua/> (дата звернення: 24.04.2025).

22. Леонолець І. В. Обґрунтування технології утилізації шламу каменеобробних підприємств : дис. ... д-ра філософії : 184 «Гірництво» / Державний університет «Житомирська політехніка» ; наук. керівник В. О. Шлапак. Житомир, 2025. 144 с. URL: <https://salو.li/1953d9D> (дата звернення: 13.05.2025).

23. Serena A. Integrated method for recycling stone wastes and system thereof : пат. WO 2013/084173 A1 : МПК В03В 9/06, С04В 18/16, С04В 7/26. № РСТ/IB2012/056950 ; заявл. 04.12.2012 ; опубл. 13.06.2013. 30 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/fd/f0/82/941d5091c940ec/WO2013084173A1.pdf> (дата звернення: 07.05.2025).

24. Ahmad T., Ahmad K., Ahad A., Alam M. A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: the effectiveness of adsorption method. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 9050–9066. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12395-x>.

25. Борецька І. Ю., Джура Н. М., Романюк О. І. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6(39). С. 76–79. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>.

26. Whitworth A. J., Forbes E., Verster I., Yokovich V., Awatey B., Parbhakar-Fox A. A review of advancements in mineral processing technologies applicable to the recovery of critical metals from mining and processing wastes. *Clean Energy Technologies*. 2022. № 4. Article 100451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>.

27. Richetti F., Grings K. J. O., Ribeiro F. R. C., de Lima C. J. F., Kulakowski M. P. Production of granilite concrete plates with recycled aggregates and ornamental rock processing sludge. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2022. № 27(3). DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0078>.

28. Turner T., Wheeler R., Oliver I. W. Evaluating land application of pulp and paper mill sludge: A review. *Journal of Environmental Management*. 2022. № 317. Article 115439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115439>.

29. Гадіолі М. К. Б., де Агіар М. К., Відал Ф. В. Г., Сант'Ана М. А. К., де Алмейда К. М., Джорі А. Ю. Н. Incorporation of Ornamental Stone Waste in the Manufacturing of Red Ceramics. *Materials*. 2022. № 15(16). Article 5635. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15165635>.

30. Афонсо П., Пірес В., Фарія П., Аццаліні А., Лопес Л., Моурао П., Мартінс Р. Новий підхід до повторного використання відходів видобувної та переробної промисловості в'язких речовин з природного каменю: розробка кам'яних композитів. Сталий розвиток. 2024. № 16(1). Article 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16010064>.