

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут нафти і газу  
Кафедра буріння та геології  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Спеціальність Гірництво та нафтогазові технології  
Освітня програма Буріння нафтових і газових свердловин

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми  
геології

Харченко М.О.

« 21 » 01 2026 року

Завідувач кафедри буріння та

Винников Ю.Л.

« 21 » 01 2026 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему Розробка інноваційної технології перетворення бурових шламів на товарні продукти

**Пояснювальна записка**

Керівник

к.т.н., доцент

кафедри буріння та геології

Ягольник А.М.

посада, наук. ступінь, ПІБ

підпис, дата

Виконавець роботи

студент група 601-НБ

Червонцев Олег Володимирович

студент, ПІБ

підпис, дата,

Консультант за 1 розділом

к.т.н., доцент кафедри буріння та геології

А.М. Ягольник

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 2 розділом

К.т.н., ст. викл. кафедри буріння та геології

М.О. Рибалко

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 3 розділом

К.т.н., ст. викл. кафедри буріння та геології

О.В. Матяш

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Дата захисту 22.09.2026

Полтава, 2026

Національний університет  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут: Нафти і газу  
Кафедра: Буріння та геології  
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр  
Спеціальність: 185 Нафтогазова інженерія та технології  
Освітня програма: Буріння нафтових і газових свердловин

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри буріння та геології  
Винников Ю.Л.

« 5 » 09 2025 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

**Червонцев Олег Володимирович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка інноваційної технології перетворення бурових шлаків на товарні продукти

2. Керівник роботи доц. кафедри буріння та геології, доц., к.т.н. Ягольник А.М.

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

затверджені наказом вищого навч. закладу від « 3 » 09 2025 року № 1015-40

3. Строк подання студентом роботи 28.09.2025р.

4. Вихідні дані до роботи

1. Нормативно-технічна література, періодичні видання, патенти на винаходи за темою роботи.

2. Проекти на влаштування свердловин (за необхідності).

3. Геологічні звіти за профілем роботи (за необхідності)

5. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Анотація

Вступ

1. Аналітичний огляд літературних джерел та сучасного стану досліджуваної проблеми

2. Обґрунтування об'єкта дослідження, вихідних даних та методів розв'язання поставлених задач.

3. Дослідження, розрахунки та експериментальне обґрунтування прийнятих технічних рішень.

Загальні висновки по роботі

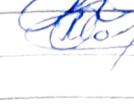
Список використаних джерел

Додатки (за необхідності)

6. Перелік графічного матеріалу

Презентація із основними результатами кваліфікаційної роботи

### 7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	к.т.н. Козачук А.М.		
	к.т.н. Рибакко М.О.		
	к.т.н. Малець О.В.		

8. Дата видачі завдання 3.09.2025

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

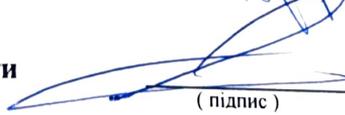
№ з/п	Етапи підготовки	Термін виконання
1	Аналіз літературних джерел та сучасного стану проблеми	13.10.2025 - 02.11.2025
2	Формування мети, задач, обґрунтування об'єкта і предмета дослідження	03.11.2025 - 16.11.2025
3	Виконання основної частини роботи (розрахунки / експерименти / аналіз)	17.11.2025 - 28.12.2025
4	Узагальнення результатів, формування висновків	29.12.2025 - 05.01.2026
5	Оформлення та узгодження кваліфікаційної роботи	06.01.2026 - 12.01.2026
6	Попередній захист кваліфікаційної роботи	13.01.2026 - 15.01.2026
7	Захист кваліфікаційної роботи	19.01.2026 - 23.01.2026

Студент

  
(підпис)

Гербасов О. В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Козачук А. М.  
(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ANOTATION .....	3
ВСТУП.....	4
INTRODUCTION.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	8
1.1 Джерела виникнення бурових шламів .....	8
1.2 Технології переробки бурових шламів на товарні продукти .....	17
1.4 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження.....	30
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БУРОВИХ ШЛАМІВ .....	32
2.1 Кількісна оцінка утворення шламу та визначення його об'ємно-масових характеристик .....	32
2.3 Обґрунтування та вибір технологічного устаткування для переробки шламу. .....	34
2.3 Методики лабораторної підготовки та визначення фізичних властивостей бурового шламу .....	37
2.4 Висновки до розділу 2 .....	40
РОЗДІЛ 3 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БУРОВОГО ШЛАМУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ АГЛОПОРИТУ .....	42
3.1 Комплексний аналіз вихідної сировини та підготовка проби .....	42
3.4 Експериментальна розробка технологічного процесу отримання аглопориту.....	47
3.3 Оцінка якості товарного продукту .....	53
3.4 Висновки до розділу 3 .....	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	59
GENERAL CONCLUSIONS ON THE WORK .....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

## АНОТАЦІЯ

Червонцев О.В. Розробка інноваційної технології перетворення бурових шламів на товарні продукти. Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава; Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – 2026.

Магістерська робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі, пов'язаної з екологічно безпечною утилізацією бурових шламів та розробкою ефективної технології їх переробки у товарний продукт – аглопорит.

У розділі 1 проведено аналітичний огляд сучасного стану питання. Проаналізовано масштаби накопичення бурових відходів, їх токсичний вплив на навколишнє середовище, а також наявні методи утилізації. Визначено переваги термічної переробки шламів як найефективнішого напрямку їх екологічно безпечної утилізації з отриманням товарної продукції — легкого заповнювача аглопориту.

У розділі 2 подано результати кількісної оцінки утворення бурового шламу та визначено його основні об'ємно-масові характеристики. Обґрунтовано вибір технологічного устаткування для переробки шламу, описано методики лабораторної підготовки проб і визначення фізичних властивостей сировини. Отримані дані стали основою для подальшого проектування процесу термічної обробки.

У розділі 3 виконано фізико-хімічні дослідження бурового шламу та експериментально розроблено технологію отримання аглопориту. Встановлено оптимальні умови гранулювання та випалу шихти з додаванням 10% золи і коагулянту  $Al_2(SO_4)_3$  при температурі 970–1000 °С. Отриманий матеріал характеризується низькою щільністю, достатньою міцністю та придатністю для використання у виробництві легких будівельних матеріалів.

**Ключові слова:** свердловина, буровий шлам, утилізація, аглопорит, буріння, термічна обробка, коагулянт, екологічна безпека, відходи.

## ANOTATION

Chervontsev O.V. Development of innovative technology for converting drilling sludge into commercial products. Master's thesis in the specialty 185 “Oil and Gas Engineering and Technology.” – Poltava; Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic National University. – 2026.

The master's thesis is devoted to solving an urgent scientific and technical problem related to the environmentally safe disposal of drilling sludge and the development of an effective technology for its processing into a commercial product – agloporite.

Section 1 provides an analytical overview of the current state of the issue. The scale of drilling waste accumulation, its toxic impact on the environment, and existing disposal methods are analyzed. The advantages of thermal processing of sludge as the most effective method of its environmentally safe disposal with the production of a commercial product—lightweight agloporite filler—are identified.

Section 2 presents the results of a quantitative assessment of drilling sludge formation and determines its main volume and mass characteristics. The choice of technological equipment for sludge processing is justified, and methods for laboratory preparation of samples and determination of the physical properties of raw materials are described. The data obtained became the basis for further design of the thermal treatment process.

Section 3 presents the results of physical and chemical studies of drilling sludge and the experimentally developed technology for obtaining agglomerate. The optimal conditions for granulation and firing of the mixture with the addition of 10% ash and  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  coagulant at a temperature of 970–1000 °C have been established. The resulting material is characterized by low density, sufficient strength, and suitability for use in the production of lightweight building materials.

**Keywords:** well, drilling mud, utilization, agloporite, drilling, heat treatment, coagulant, environmental safety, waste.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Проблема утилізації бурових шламів є однією з найгостріших екологічних і технологічних викликів нафтогазової галузі. За останні два десятиліття обсяги похованих відходів буріння збільшилися більш ніж утричі, перевищивши 1 млрд тонн на рік. Традиційні методи утилізації, такі як поховання, не лише не вирішують проблему накопичення токсичних відходів, а й створюють серйозну загрозу для довкілля – забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, атмосферного повітря. Водночас бурові шлами містять велику частку мінеральних компонентів, які потенційно можуть бути використані як вторинна сировина у виробництві будівельних матеріалів. Саме тому розробка інноваційних технологій їх переробки у товарну продукцію, зокрема аглопорит, набуває стратегічного значення. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям циркулярної економіки, спрямованої на мінімізацію відходів і підвищення ресурсоефективності. Комплексна утилізація бурових шламів дозволяє одночасно досягти екологічного ефекту, зменшити витрати на утилізацію та створити економічно привабливий продукт будівельного призначення.

**Мета роботи** – це розроблення інноваційної технології термічної переробки бурових шламів з отриманням товарних будівельних матеріалів (аглопориту), що забезпечить мінімізацію екологічного впливу нафтовидобувної промисловості.

### **Основні завдання дослідження:**

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми утилізації бурових шламів і визначити найбільш перспективні напрями їх переробки.
2. Провести кількісну та якісну оцінку складу і властивостей бурових шламів.
3. Обґрунтувати вибір технологічного устаткування для їх переробки.
4. Визначити фізико-хімічні характеристики шламів і підготувати сировину до термічної обробки.

5. Експериментально дослідити вплив компонентного складу та температури випалу на властивості отриманого аглопориту.

6. Провести оцінку якості та придатності отриманого матеріалу для використання у будівництві.

**Об'єкт дослідження** – процес утворення, переробки та утилізації бурових шламів, що утворюються при бурінні нафтових і газових свердловин.

**Предмет дослідження** – фізико-хімічні властивості бурових шламів та технологічні параметри процесу їх перетворення у товарний продукт – аглопорит..

**Наукова новизна роботи:** на основі експериментальних досліджень встановлено оптимальні умови переробки бурових шламів у будівельний матеріал – аглопорит – із застосуванням коагулянтів ( $Al_2(SO_4)_3$ ) та домішок золи. Визначено раціональні співвідношення компонентів шихти й температурні режими термообробки (970–1000 °С), які забезпечують отримання матеріалу з низькою щільністю, високою міцністю та стабільними показниками якості.

**Практичне значення роботи** – результати роботи можуть бути використані для впровадження ефективної технології комплексної утилізації бурових шламів на підприємствах нафтогазової галузі. Запропонований метод дозволяє зменшити екологічне навантаження на довкілля, скоротити витрати на зберігання та транспортування відходів, а також отримати ринково затребуваний будівельний матеріал – аглопорит, що відповідає сучасним вимогам до екологічності та енергоефективності.

**Методи дослідження:** аналіз наукових джерел; порівняльний аналіз; системний підхід; узагальнення; класифікація; техніко-економічне оцінювання; аналіз виробничого досвіду.

**Структура і обсяг роботи.** Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Робота викладена на 65 сторінках, у тому числі 61 сторінках основного тексту, 32 рисунків, 11 таблиць, 4 сторінок списку використаних джерел.

## INTRODUCTION

**Relevance of the topic.** The problem of drilling mud disposal is one of the most pressing environmental and technological challenges facing the oil and gas industry. Over the past two decades, the volume of buried drilling waste has more than tripled, exceeding 1 billion tons per year. Traditional disposal methods, such as burial, not only fail to solve the problem of toxic waste accumulation, but also pose a serious threat to the environment – contamination of soil, surface and groundwater, and atmospheric air. At the same time, drilling sludge contains a large proportion of mineral components that can potentially be used as secondary raw materials in the production of building materials. That is why the development of innovative technologies for their processing into commercial products, in particular agloporite, is of strategic importance. This approach is in line with current trends in the circular economy, which aims to minimize waste and increase resource efficiency. Comprehensive utilization of drilling sludge allows for simultaneous achievement of environmental benefits, reduction of disposal costs, and creation of an economically attractive product for construction purposes.

**The aim of the work** is to develop an innovative technology for the thermal processing of drilling sludge to obtain commercial building materials (agglomerated clay), which will minimize the environmental impact of the oil industry.

**The main objectives of the study are:**

1. To analyze the current state of the problem of drilling mud disposal and identify the most promising areas for its processing.
2. To conduct a quantitative and qualitative assessment of the composition and properties of drilling mud.
3. To justify the choice of technological equipment for its processing.
4. To determine the physical and chemical characteristics of sludge and prepare raw materials for heat treatment.
5. To experimentally investigate the influence of the component composition and firing temperature on the properties of the resulting agloporite.
6. To evaluate the quality and suitability of the resulting material for use in

construction.

**The object of the study** is the process of formation, processing, and disposal of drilling sludge generated during the drilling of oil and gas wells.

**The subject of the study** is the physical and chemical properties of drilling sludge and the technological parameters of the process of its conversion into a commercial product—agglomerated clay.

**Scientific novelty of the work:** based on experimental studies, the optimal conditions for processing drilling sludge into a building material – agloporite – using coagulants ( $Al_2(SO_4)_3$ ) and ash additives have been established. The rational ratios of the components of the charge and the temperature regimes of heat treatment (970–1000 °C) have been determined, which ensure the production of a material with low density, high strength, and stable quality indicators.

**The practical significance of the work** is that the results can be used to implement effective technology for the comprehensive utilization of drilling sludge at oil and gas industry enterprises. The proposed method reduces the environmental impact, cuts the costs of waste storage and transportation, and produces a marketable building material – agglomerated porosity—that meets modern requirements for environmental friendliness and energy efficiency.

**Research methods:** analysis of scientific sources; comparative analysis; systems approach; generalization; classification; techno-economic evaluation; analysis of operational experience.

**Structure and scope of the work.** The master's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references. The thesis is 65 pages long, including 61 pages of main text, 32 figures, 11 tables, and 4 pages of references.

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Джерела виникнення бурових шламів

Нафта одна з найдавніших речовин, з якою людина першою познайомилася і почала застосовувати її в народному господарстві. У давнину люди застосовували нафтовий бітум як в'язучий матеріал, для будівництва грандіозних споруд [3]. У Стародавньому Єгипті знайшли застосування нафти для бальзамування тіла мертвого. Крім цього її масово використовували як зброю для підпалювання будинків або як оборону фортець від зовнішніх ворогів.

У наші дні нафту в промисловому масштабі почали видобувати в 19 столітті, і з того часу зростає частка споживаної нафти в енергетичній галузі. Відкриваються нові родовища, покращуються методи ефективнішої видобутку нафти тощо, але не розвивалося методи утилізації нафтових відходів.

Буріння нафтових свердловин це процес будівництва гірничого вироблення великої довжини та малого діаметра, із застосуванням спеціальної техніки (долото) та спеціального бурового розчину.

Найбільш поширеним методом видобутку корисних копалин вважається кущове буріння. Кущове буріння, є методом розробки та експлуатації кількох свердловин одночасно на обмеженій території, званим кущем. В рамках кущового буріння бурові установки розміщуються близько один до одного, а свердловини буряться паралельно або під різними кутами щодо вертикальної осі представленої на рисунку 1.1 [4].

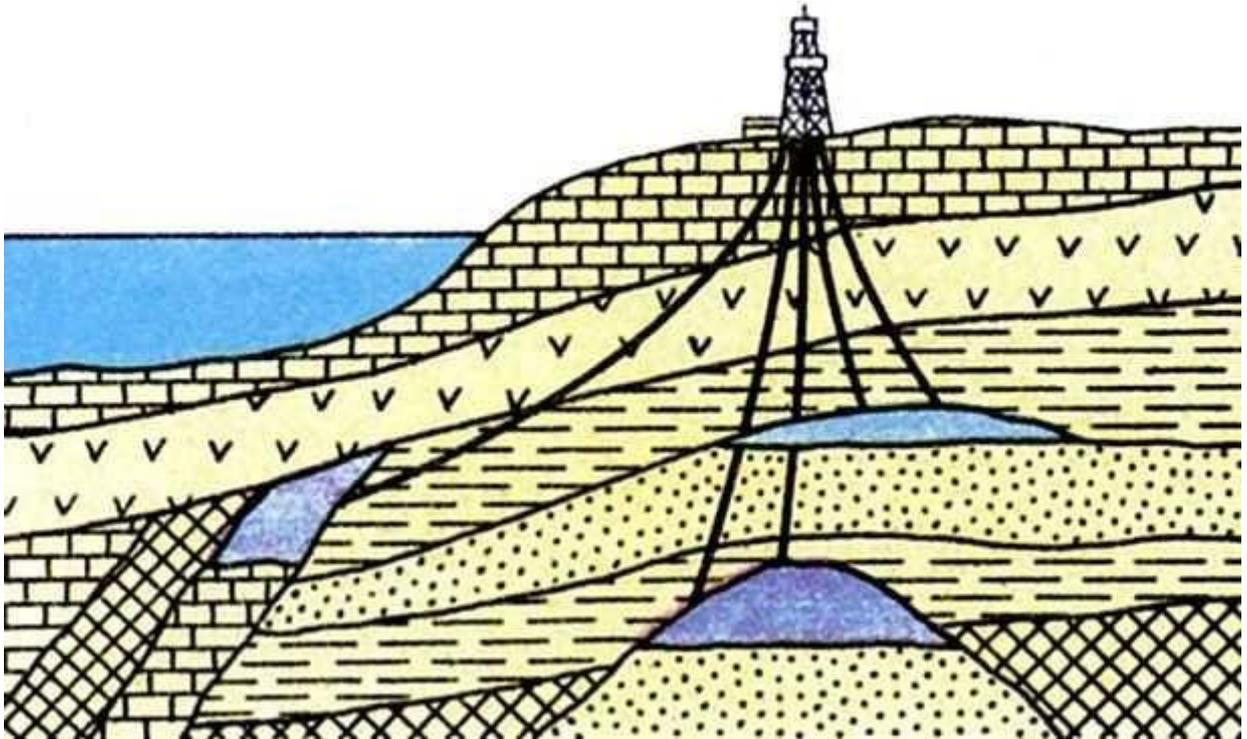


Рисунок 1.1- Кущовий метод буріння

Перевагою кущового буріння є:

- Значна економія часу і ресурсів.
- Спільне використання бурових установок дозволяє ефективніше використовувати обладнання та робочий персонал, що дає можливість оптимізувати витрати.
- Скорочення витрат на транспортування: через близьке розташування свердловин близько один одного дозволяє скоротити відстань, яку необхідно подолати для транспортування матеріалів, обладнання та персоналу.

У кущовому бурінні використовують різне спеціалізоване обладнання. Існує кілька різних видів бурових доліт, кожна з яких призначена для певних умов буріння та типів ґрунтів чи порід [5]. Нижче наведено деякі поширені види бурових доліт:

1. Карбідні долота: Цей тип долот складається з твёрдосплавних (карбідних) вставок, розташованих на кромках. Карбідні долота широко використовуються для буріння в твердих породах, таких як граніт, сланець чи кварцит.

2. Алмазні долота Дані долота оснащені алмазними вставками або мають алмазне покриття на своїх ріжучих кромках. Алмазні долота застосовують для буріння в міцних і абразивних породах, таких як карбонати, пісковики або вулканічні породи.

3. Тригранні долота: Цей тип долот має форму трикутника і використовується для буріння в м'яких і середньоущільнених ґрунтах. Вони широко використовуються у будівництві фундаментів або для геологічних досліджень.

4. Плоскі долота: Дані долота мають плоску ріжучу кромку і використовуються для буріння свердловин великого діаметру, таких як опорні конструкції або фундаменти.

5. Пильні долота: Цей тип долот має зубчастий або пиляльний профіль і застосовується для буріння в сильно вапняних або обвалованих ґрунтах, таких як вапняк або глина.

Кожен із цих видів бурових доліт має свої особливості, переваги та обмеження, і вибір конкретного типу залежить від умов буріння, характеристик ґрунту чи породи, а також вимог проекту. Чимало, важливу роль підтримки процесу буріння мають бурові розчини [6] і вони мають кілька функцій:

– Змащування та охолодження: Буровий розчин служить мастильною та охолоджувальною речовиною для бурового інструменту, такого як бурові долота та свердла. Він знижує тертя між інструментом та свердловиною, зменшуючи знос та пошкодження інструменту, а також запобігає його перегріву.

– Утримання свердловини: Буровий розчин створює гідростатичний тиск, який допомагає утримувати стінки свердловини під час буріння. Це запобігає обвалу та обвали ґрунту або породи, забезпечуючи стабільність свердловини.

– Винос породних відходів: Буровий розчин служить для винесення вибурених породних відходів зі свердловини на поверхню. Він переміщає відходи та промиває свердловину, забезпечуючи їх видалення та забезпечуючи прогрес буріння.

– Безпека та контроль тиску: Буровий розчин використовується для контролю тиску в пласті, щоб запобігти небажаним притокам газу, нафти або води в свердловину. Він створює протитиск, який допомагає утримувати пластові рідини та запобігає їх неконтрольованому проникненню в свердловину.

– Підтримка структурних властивостей свердловини: Буровий розчин може містити добавки, такі як полімери або глинисті матеріали, які допомагають утримувати структурні властивості свердловини, запобігаючи її обвалам або колапсу.

В цілому буровий розчин відіграє важливу роль у забезпеченні ефективності та безпеки процесу буріння свердловин. Він має різні властивості, які допомагають досягти успішного виконання робіт з буріння і забезпечують стабільність і контроль у свердловині.

Залежно від специфіки місцевості, склад бурового розчину може змінюватись в залежності від вимог і конкретно поставлених цілей проекту. Наприклад: розвідувальні свердловини і нафти - газові свердловини істотно відрізняються за складом бурових розчинів і хімічних реагентів, що додаються туди.

Як приклад, наведено реальний склад бурових розчинів, рисунку 1.2 і 1.3.



Рисунок 1.2- Склад бурового розчину на водній основі

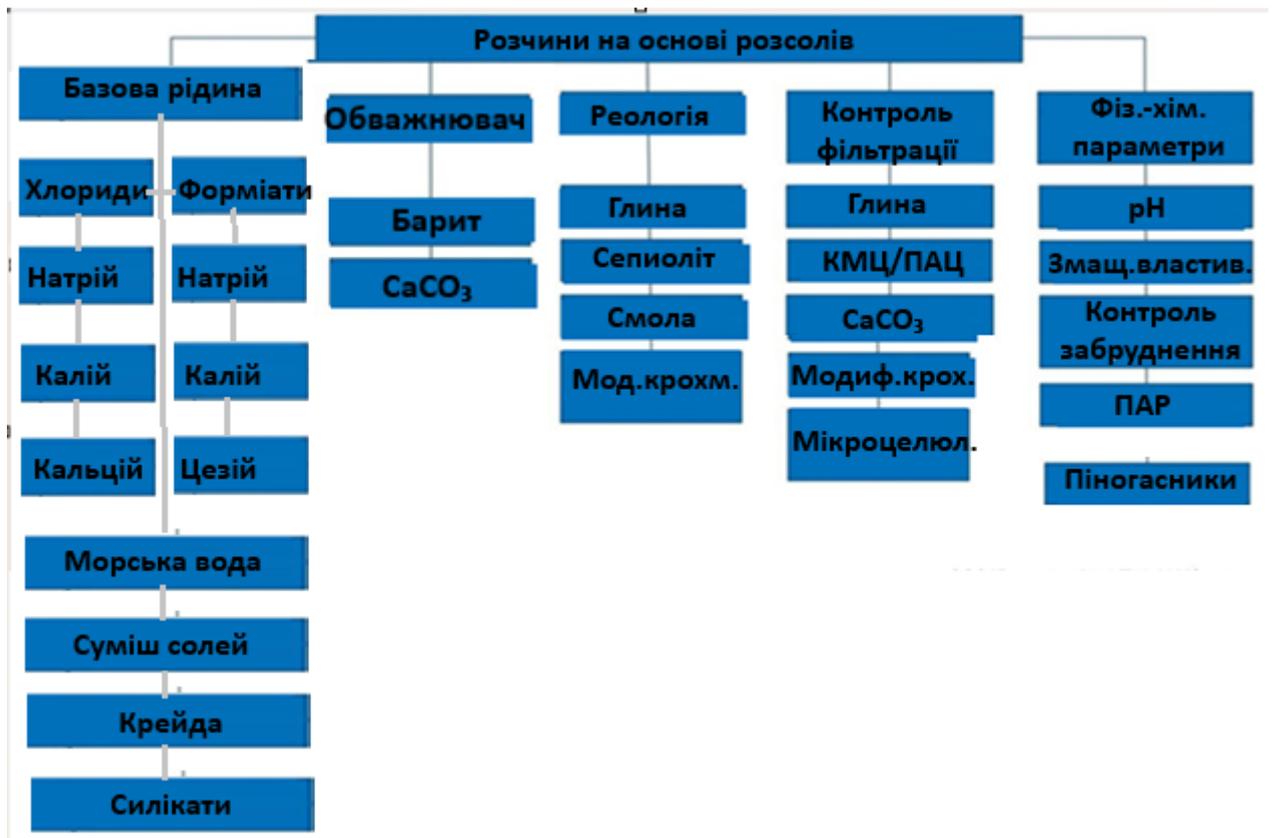


Рисунок 1.3 - Склад бурового розчину на основі розсолів

Проте основні компоненти, присутні у більшості бурових розчинів, включають[7]:

- Вода: Вода є основною складовою бурового розчину. Вона використовується для розведення інших добавок та забезпечення подачі розчину у свердловину.

- Глина або бентоніт: Глина або бентоніт додаються в розчин для надання йому необхідної в'язкості та покращення властивостей мастила. Це допомагає контролювати тиск пласта, змащувати інструменти та запобігати провалюванню стінок свердловини.

- Полімери: У деяких випадках використовуються полімери для покращення реологічних властивостей бурового розчину. Вони здатні змінювати його в'язкість і структуру, що може бути корисно при особливих умовах буріння.

- Добавки для зниження тертя: Для зниження тертя між інструментами та стінками свердловини додаються спеціальні присадки, наприклад, полімерні

мастила або масляні добавки.

– Добавки для запобігання утворенню відкладень: У розчини можуть вводитися спеціальні добавки, які запобігають утворенню відкладень, таких як солі або глинисті опади, у свердловині та на обладнанні.

– Кислоти або розчинники: У деяких випадках використовуються кислоти або розчинники для видалення або руйнування певних відкладень чи порід у свердловині.

Це лише деякі з основних компонентів, які можуть бути присутніми у бурових розчинах. Конкретний склад розчинів залежить від вимог проекту, геологічних умов та типу порід, з якими стикається бурова операція.

Буровий шлам, незважаючи на свою значимість в процесі буріння свердловин, може представляти певні ризики та небезпеки. Ось деякі з основних аспектів, пов'язаних з небезпекою бурового шламу:

1. Шкідливість навколишньому середовищу: Буровий шлам містить різні хімічні сполуки, включаючи важкі метали та нафтопродукти, які можуть негативно впливати на навколишнє середовище. Якщо шлам не контролюється і не утилізується правильно, це може привести до забруднення ґрунту, води та повітря, завдаючи шкоди на екосистеми та здоров'я людей і тварин.

2. Небезпека для здоров'я: Деякі компоненти бурового шламу можуть бути токсичними або канцерогенними. Неправильне поводження з ним або недостатні заходи безпеки можуть призвести до ризику отруєння або захворювань у працівників, пов'язаних із впливом небезпечних речовин.

3. Пожежі і вибухи: Деякі компоненти бурового шламу можуть бути легкозаймистими або вибухонебезпечними. Неправильне зберігання або витікання шламу можуть спричинити пожежі та вибухи, що становлять серйозні загрози для працівників та навколишнього середовища.

4. Пошкодження обладнання: Невідповідність тиску або неправильна консистенція бурового шламу можуть викликати проблеми з обладнанням та призвести до його пошкодження.

Для зниження ризиків, пов'язаних з буровим шламом, необхідно суворо

дотримуватися запобіжних заходів, таких як правильна обробка, зберігання та утилізація шламу, а також забезпечення працівників відповідними засобами захисту та навчання з безпечного поводження з буровим шламом.

Сучасні методи утилізації бурового шламу включають різноманітні технології та підходи, які покликані мінімізувати його потенційні негативні наслідки для навколишнього середовища та максимально ефективно використовувати його ресурси. Ось кілька прикладів сучасних методів утилізації бурового шламу:

- Рециркуляція та переробка: Буровий шлам може бути підданий процесу рециркуляції, в ході якого він проходить через системи очищення та фільтрації для видалення твердих частинок, забруднень та хімічних з'єднань. Після очищення шлам може бути повторно використаний у процесі буріння, що скорочує потребу у нових матеріалах.

- Сушіння та зневоднення: За допомогою сушіння та зневоднення можна видалити з бурового шламу воду, що знижує його об'єм та полегшує його обробку та утилізацію. Зневоднений шлам може бути застосований для виробництва будівельних матеріалів, наприклад, аглопориту або цементу.

- Біорозкладання та компостування: Буровий шлам може бути підданий процесам біорозкладання та компостування, де органічні компоненти розкладаються під впливом мікроорганізмів. Отриманий компост може бути використаний у сільському господарстві чи ландшафтному дизайні.

- Термічна обробка Буровий шлам може бути оброблений термічними методами, такими як піроліз або газифікація, при яких відбувається його розкладання при високих температурах. Це дозволяє отримати енергію у вигляді газу чи палива.

- Поховання та зберігання: У випадках, коли інші методи утилізації недоступні або недоцільні, буровий шлам може бути похований у спеціально обладнаних місцях чи сховищах, які відповідають суворим нормам та вимогам безпеки.

Сучасні методи утилізації бурового шламу прагнуть найбільш

ефективного використання ресурсів і зниження негативного на довкілля. Найбільш перспективним і безпечним для навколишнього середовища є метод сушіння та зневоднення з подальшим отриманням товарного продукту – аглопориту.

Цей метод дозволяє вирішити кілька важливих проблем одночасно:

- утилізація бурових відходів
- охорона навколишнього середовища
- отримання товарного продукту, який є техніко-економічно вигідним
- удосконалення ефективності використання ресурсів.

Наприклад, останні п'ять років спостерігається постійне зростання обсягу похованих відходів. Якщо порівняти ситуацію з 2003 роком, то на той момент було поховано приблизно в три рази менше нафтових відходів – близько 361,6 мільйонів тонн. У 2007 році було встановлено рекордний показник – 1,04 мільярда тонн похованих відходів, а третє місце зайняв 2018 рік з обсягом 1,03 мільярда тонн виробничого сміття. Загалом, за 17 років загальна маса похованих бурових відходів досягла 11,4 мільярда тонн[8]. Графік похованих відходів млн тонн, представлений на рисунку 1.4.

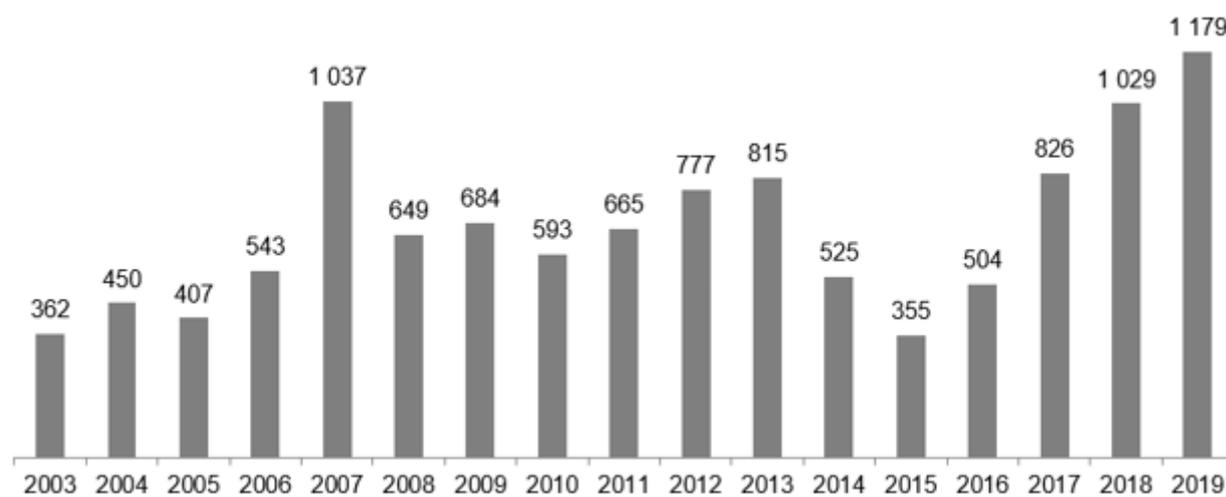


Рисунок 1.4- Графік похованих відходів в млн. тонн

Обсяг генерованих промислових відходів постійно зростає рік у рік. Частка

відходів, які зазнають поховання, коливається в залежності від часу. У 2015 року ця частка становила близько 7%, а в 2007 році вона сягала 27%. У 2019 році близько 15% загального обсягу спрямованих на поховання. Якщо порівняти ситуацію п'ять років тому, тоді лише 7% відходів було поховано, що є найменшим показником за всю історію спостережень.

Термічна обробка бурових шламів є ефективний та екологічно дружній метод утилізації цих відходів, який дозволяє скоротити їх вплив на навколишнє середовище та максимально використати їх ресурси[9].

Переваги термічної обробки бурових шламів полягають у наступному:

1. Знищення шкідливих речовин: Високі температури, використовувані в процесі термічної обробки дозволяють розкладати і знищувати шкідливі хімічні сполуки, що містяться в буровому шламі. Це може включати токсичні та небезпечні речовини, такі як нафтопродукти, важкі метали та інші забруднювачі.

2. Зниження обсягу відходів: Термічна обробка дозволяє скоротити обсяг бурових шламів шляхом їх розкладання та переробки. В результаті цього процесу шлам перетворюється на компактніші і менш об'ємні матеріали, що спрощує їх подальшу утилізацію або зберігання.

3. Енергетична вигода: Термічна обробка бурових шламів може використовуватись для виробництва енергії. Внаслідок розкладання шламу при високих температурах виділяється теплова енергія, яка може бути використана для генерації пари або електрики. Це дозволяє знизити залежність від традиційних джерел енергії та забезпечити стійке та екологічно чисте джерело енергії.

4. Зниження навколишнього впливу: Термічна обробка дозволяє суттєво скоротити негативне вплив бурових шламів на довкілля. Знищення шкідливих речовин та зниження обсягу відходів допомагають запобігти забрудненню ґрунту, води та повітря, а також зменшити ризик захворювань та пошкоджень природних екосистем.

5. Дотримання екологічних норм: Термічна обробка бурових шламів може бути проведена відповідно до вимог та нормативів, встановлених для

охорони навколишнього середовища. Це допомагає запобігти порушенням екологічних стандартів і забезпечити безпеку навколишнього середовища та людського здоров'я.

## **1.2 Технології переробки бурових шламів на товарні продукти**

Проблема утилізації бурових шламів набуває все більшої актуальності у зв'язку зі зростанням обсягів нафтогазовидобутку та посиленням екологічних вимог. Традиційні методи поховання відходів є екологічно небезпечними та економічно недоцільними, що стимулює розробку інноваційних технологій переробки бурових шламів з отриманням товарних продуктів. Сучасні підходи базуються на принципах циркулярної економіки, де відходи розглядаються як цінна вторинна сировина для виробництва різноманітних матеріалів.

Аналіз світового досвіду свідчить про наявність кількох перспективних напрямків переробки бурових шламів. Найбільш поширеним є виробництво будівельних матеріалів, зокрема аглопориту, керамзиту, цегли та цементних композицій. Цей напрямок обумовлений тим, що буровий шлам містить значну кількість глинистих мінералів, кремнезему та оксидів металів, які є традиційними компонентами будівельної сировини. Крім того, органічні домішки та вуглеводні можуть використовуватись як внутрішнє паливо в процесі термічної обробки, що знижує енергетичні витрати виробництва.

Другим важливим напрямком є використання оброблених бурових шламів для виробництва дорожніх покриттів та асфальтобетонних сумішей. Після відповідної підготовки та стабілізації шлами можуть служити як заповнювач або в'язучий компонент дорожніх конструкцій. Цей метод особливо актуальний для віддалених нафтовидобувних регіонів, де відсутня розвинена інфраструктура та існує потреба в будівництві доріг.

Третім перспективним напрямком є застосування бурових шламів у рекультивациі порушених земель та як сорбентів для очищення стічних вод. Після детоксикації та нейтралізації шкідливих компонентів, шлам може

використовуватись для відновлення родючості ґрунтів, особливо в районах нафтовидобутку, де відбулася деградація земельних ресурсів. Сорбційні властивості глинистих мінералів, що містяться в шламів, дозволяють ефективно поглинати важкі метали та нафтопродукти з забруднених вод.

Основні напрямки переробки буровихшламів та їх характеристики представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Напрямки переробки бурових шламів

Напрямок переробки	Товарний продукт	Основні переваги	Обмеження
Будівельні матеріали	Аглопорит, керамзит, цегла, цемент	Висока додана вартість, великий ринок збуту	Потреба в термообробці, енергоємність
Дорожнє будівництво	Асфальтобетон, стабілізовані основи	Великі обсяги споживання, утилізація на місці	Вимоги до механічних властивостей
Рекультивація земель	Ґрунтові суміші, меліоранти	Екологічна ефективність	Обмежений ринок, сезонність
Сорбенти	Очисні матеріали	Використання природних властивостей	Необхідність попередньої підготовки
Паливні брикети	Альтернативне паливо	Енергетична утилізація	Викиди при спалюванні

Технологічні процеси переробки бурових шламів базуються на різних фізико-хімічних методах обробки. Найбільш ефективними та екологічно прийнятними є термічні методи, які забезпечують знешкодження органічних забруднювачів та формування нових матеріалів з покращеними властивостями. Серед термічних методів виділяють піроліз, спікання, випалювання та плазмову газифікацію, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування.

Піроліз бурових шламів здійснюється в температурному діапазоні 400-800°C в умовах обмеженого доступу кисню. При цьому відбувається термічне розкладання органічних компонентів з утворенням газоподібних, рідких та твердих продуктів. Газова фракція містить водень, метан, оксид та діоксид вуглецю, які можуть використовуватись як паливо для підтримання процесу. Рідка фракція представлена синтетичними нафтопродуктами, а тверда -

карбонізованим залишком, який може застосовуватись як сорбент або наповнювач. Перевагою піролізу є можливість утилізації органічної складової шламу з отриманням енергоносіїв, однак процес вимагає складного обладнання та контролю параметрів.

Спінання та випалювання проводиться при температурах 1000-1200°C і призначене для виробництва керамічних матеріалів, зокрема аглопориту та керамзиту. При високотемпературній обробці відбувається спучування глинистої маси внаслідок виділення газів від розкладання органічних речовин та карбонатів. Утворюється пориста структура з закритими порами, що забезпечує низьку теплопровідність та високу міцність матеріалу. Спінання може здійснюватись на конвеєрних агломераційних машинах або в обертових печах, при цьому енергія, що виділяється при згорянні органічних домішок шламу, частково компенсує енергетичні витрати процесу.

Плазмова газифікація є найбільш сучасною та ефективною технологією, яка дозволяє досягти повного знешкодження шламу при температурах 1200-1800°C. Під дією плазмового факела відбувається повна деструкція органічних сполук з перетворенням їх на синтез-газ (суміш CO та H<sub>2</sub>), а мінеральна частина переходить в розплавлений стан, утворюючи після охолодження скловидний шлак. Цей метод забезпечує максимальний ступінь знешкодження та дозволяє утилізувати навіть високотоксичні шлами, однак вимагає значних капітальних вкладень та енергетичних витрат.

Характеристика товарних продуктів, отриманих з бурових шламів, є критично важливою для оцінки економічної доцільності технологій переробки. Аглопорит - пористий керамічний матеріал, що виробляється методом спінання, характеризується насипною щільністю 300-600 кг/м<sup>3</sup>, міцністю при стисканні 1,5-5,0 МПа та теплопровідністю 0,12-0,18 Вт/(м·К). Ці показники відповідають вимогам до легких заповнювачів для бетонів згідно з ДСТУ Б В.2.7-18-95. Аглопорит застосовується для виробництва легких бетонів, теплоізоляційних виробів, як дренажний матеріал та для гідропонного вирощування рослин.

Керамзит, отриманий з бурових шламів, має дещо вищу насипну щільність (400-800 кг/м<sup>3</sup>) та міцність (2,5-8,0 МПа), що дозволяє використовувати його для конструкційно-теплоізоляційних бетонів. Важливою перевагою керамзиту є висока морозостійкість (25-50 циклів) та водостійкість, що забезпечує довговічність конструкцій. Коефіцієнт розм'якшення керамзиту з бурових шламів становить 0,6-0,8, що підтверджує його придатність для використання у вологих умовах.

Цегла та керамічні вироби, виготовлені з бурових шламів із додаванням глини, мають міцність при стисканні 7,5-25,0 МПа, що відповідає маркам М75-М250. Водопоглинання таких виробів становить 8-14%, морозостійкість - не менше 25-35 циклів. Порівняно з традиційною керамічною цеглою, вироби з додаванням бурових шламів мають дещо підвищену пористість, що покращує їх теплоізоляційні властивості, однак може зменшувати міцність.

Технічні характеристики матеріалів, отриманих з бурових шламів, представлені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Фізико-механічні властивості товарних продуктів

Показник	Аглопорит	Керамзит	Цегла	Вимоги стандартів
Насипна щільність, кг/м <sup>3</sup>	300-600	400-800	1400-1800	ДСТУ Б В.2.7-18-95
Міцність при стисканні, МПа	1,5-5,0	2,5-8,0	7,5-25,0	ДСТУ Б В.2.7-61-97
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,12-0,18	0,14-0,23	0,45-0,70	ДСТУ Б В.2.7-38-95
Водопоглинання, %	15-25	10-20	8-14	ДСТУ Б В.2.7-7-94
Морозостійкість, циклів	15-25	25-50	25-35	ДСТУ Б В.2.7-61-97
Коефіцієнт розм'якшення	0,5-0,7	0,6-0,8	0,7-0,9	-

Відповідність отриманих матеріалів державним стандартам якості є обов'язковою умовою їх реалізації на ринку. Аглопорит та керамзит повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-18-95 "Будівельні матеріали. Щебінь і пісок пористі з природної сировини та золошлакових сумішей. Технічні умови", який регламентує гранулометричний склад, насипну щільність, міцність, водопоглинання та морозостійкість. Керамічна цегла має відповідати ДСТУ Б В.2.7-61-97 "Будівельні матеріали. Цегла та камені керамічні. Технічні умови",

що встановлює вимоги до розмірів, міцності, морозостійкості та теплотехнічних характеристик.

Ринковий потенціал матеріалів з бурових шламів визначається кількома факторами. По-перше, будівельна галузь України потребує близько 15-20 млн м<sup>3</sup> легких заповнювачів щорічно, при цьому власне виробництво забезпечує лише 60-70% потреби. По-друге, вартість аглопориту та керамзиту з бурових шламів може бути на 15-25% нижчою порівняно з матеріалами з традиційної сировини за рахунок використання відходів та зниження витрат на паливо. По-третє, розміщення виробництв поблизу родовищ нафти та газу скорочує транспортні витрати та забезпечує конкурентну перевагу на регіональних ринках.

Конкурентоспроможність технологій переробки бурових шламів оцінюється шляхом порівняння техніко-економічних показників з альтернативними методами утилізації. Традиційне поховання шламів на полігонах коштує 500-800 грн/т з урахуванням транспортування, підготовки місць зберігання та екологічних платежів. Термічна переробка з отриманням аглопориту має собівартість 600-900 грн/т, однак забезпечує отримання товарного продукту вартістю 1200-1800 грн/т. Таким чином, питомий прибуток становить 300-900 грн/т шламу, що забезпечує окупність капітальних вкладень протягом 3-5 років.

Екологічні аспекти інноваційних технологій переробки бурових шламів є критично важливими для їх впровадження. Термічна обробка забезпечує деструкцію токсичних органічних сполук, включаючи поліциклічні ароматичні вуглеводні, фенольні сполуки та важкі вуглеводні. При температурах вище 800°C ступінь знешкодження органічних забруднювачів перевищує 99,9%. Важкі метали, що містяться в шламі (свинець, кадмій, миш'як, ртуть), при спіканні фіксуються в керамічній матриці, переходячи в нерозчинні силікатні та алюмосилікатні форми, що запобігає їх міграції в навколишнє середовище.

Зниження викидів парникових газів досягається за рахунок часткової заміни природного газу або інших палив органічними компонентами бурових шламів. За розрахунками, використання енергетичного потенціалу шламу

дозволяє зменшити споживання природного газу на 30-45%, що еквівалентно скороченню викидів CO<sub>2</sub> на 200-350 кг на тонну перероблених відходів. Порівняно з похованням шламів на полігонах, де відбувається тривале виділення метану та інших парникових газів, термічна переробка забезпечує скорочення сукупних викидів у 5-8 разів.

Контроль токсичних викидів при термообробці є обов'язковою вимогою екологічної безпеки. Відхідні гази з печей спікання або піролізних установок повинні проходити багатоступеневу систему очищення, що включає циклони для відділення пилу, скрубери для абсорбції кислих газів, електрофільтри та каталітичні дожигачі для знешкодження оксидів азоту та залишкових органічних сполук. Сучасні установки забезпечують концентрації забруднювачів у викидах значно нижче гранично допустимих: пил - менше 20 мг/м<sup>3</sup>, оксиди азоту - менше 200 мг/м<sup>3</sup>, оксид вуглецю - менше 100 мг/м<sup>3</sup>, що відповідає вимогам ДСП 201-97 "Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць".

Запобігання вторинному забрудненню є важливою перевагою технологій з отриманням товарних продуктів. На відміну від полігонів, де шлами залишаються джерелом забруднення протягом десятиліть, переробка на будівельні матеріали повністю виключає можливість міграції токсичних речовин. Аглопорит та керамзит є хімічно інертними матеріалами, що підтверджується випробуваннями на вилуговування згідно з ДСТУ Б В.2.7-235:2010. Концентрації важких металів та нафтопродуктів у водних витяжках з аглопориту в 10-50 разів нижчі за гранично допустимі для питної води.

Порівняльний аналіз екологічних показників різних методів утилізації представлений в таблиці 1.3.

Світовий досвід переробки бурових шламів демонструє різноманітні підходи залежно від економічних, екологічних та геологічних умов регіонів. У країнах Європейського Союзу пріоритет надається технологіям з високим ступенем знешкодження та отриманням товарних продуктів. Директива ЄС 2008/98/ЕС встановлює ієрархію поводження з відходами: запобігання, повторне використання, переробка, утилізація з отриманням енергії і лише в останню

чергу - поховання. Німеччина, Нідерланди та Норвегія активно застосовують термічні методи переробки з виробництвом будівельних матеріалів, забезпечуючи утилізацію понад 80% бурових шламів.

Таблиця 1.3 - Екологічні показники методів утилізації бурових шламів

Метод утилізації	Ступінь знешкодження, %	Викиди CO <sub>2</sub> -екв, кг/т	Ризик вторинного забруднення	Відповідність екостандартам
Поховання на полігоні	0-10	800-1200	Високий	Низька
Біорозкладання	40-60	150-300	Середній	Середня
Піроліз	85-95	200-400	Низький	Висока
Спікання (аглопорит)	95-99	300-500	Мінімальний	Висока
Плазмова газифікація	99,9	400-600	Відсутній	Найвища

У США та Канаді широко розповсюджена практика термічної десорбції бурових шламів з подальшим використанням очищеної твердої фази для рекультивації земель або виробництва дорожніх основ. Компанії Halliburton, Schlumberger та Baker Hughes впровадили мобільні установки термічної обробки, які розміщуються безпосередньо на бурових майданчиках і забезпечують переробку шламів з мінімальними транспортними витратами. Вартість переробки становить 80-150 USD/т, що є конкурентоспроможним порівняно з похованням (60-100 USD/т) з урахуванням екологічних платежів та довгострокових зобов'язань.

Досвід Росії та Казахстану характеризується активним розвитком технологій виробництва аглопориту з бурових шламів. ТОВ "Буровые технологии" (Росія) експлуатує установки потужністю 50-100 т/рік, що забезпечують переробку шламів з родовищ Західного Сибіру. Собівартість аглопориту становить 3500-4200 руб/м<sup>3</sup> при ринковій ціні 5500-7000 руб/м<sup>3</sup>, що забезпечує рентабельність 25-35%. У Казахстані на базі родовища Кашаган впроваджена технологія виробництва керамзиту з буровими шламами з додаванням місцевих глин, що дозволяє утилізувати до 150 тис. т шламів щорічно.

Найбільш цікавим є досвід Китаю, де розроблена комплексна технологія переробки бурових шламів методом "безвідходного виробництва". Після механічного зневоднення рідка фаза проходить біологічне очищення з отриманням технічної води для повторного використання у бурінні. Тверда фаза після термічної обробки при 950-1100°C використовується для виробництва цегли-сирцю та дрібних керамічних блоків. Додатково відновлюється до 15% нафтопродуктів методом низькотемпературного піролізу. Китайські установки забезпечують переробку понад 2 млн т бурових шламів щорічно з отриманням прибутку 15-20 USD/т.

Узагальнення світового досвіду дозволяє виділити кращі практики, які можуть бути адаптовані в українських умовах. По-перше, найбільш ефективними є інтегровані технології, що поєднують кілька методів обробки та дозволяють максимально використовувати всі компоненти шламу. По-друге, економічна ефективність суттєво підвищується при розміщенні переробних установок безпосередньо на родовищах, що мінімізує транспортні витрати. По-третє, державна підтримка у вигляді податкових пільг, субсидій або обов'язкових квот на переробку відходів стимулює впровадження інноваційних технологій. По-четверте, створення замкнутих циклів з поверненням очищеної води та регенованих реагентів у буровий процес забезпечує максимальну ресурсоефективність.

Географія впровадження технологій переробки бурових шламів у світі представлена на рисунку 1.7.

Перспективи розвитку інноваційних технологій переробки бурових шламів пов'язані з підвищенням енергоефективності, зниженням викидів та покращенням якості товарних продуктів. Активно досліджуються можливості використання відновлювальних джерел енергії (сонячної, вітрової) для забезпечення процесів сушіння та попередньої підготовки шламів. Розробляються каталізатори, що дозволяють знизити температуру спікання до 850-950°C при збереженні високої міцності аглопориту. Впроваджуються

системи штучного інтелекту для оптимізації режимів обробки залежно від складу шламів та вимог до кінцевого продукту.

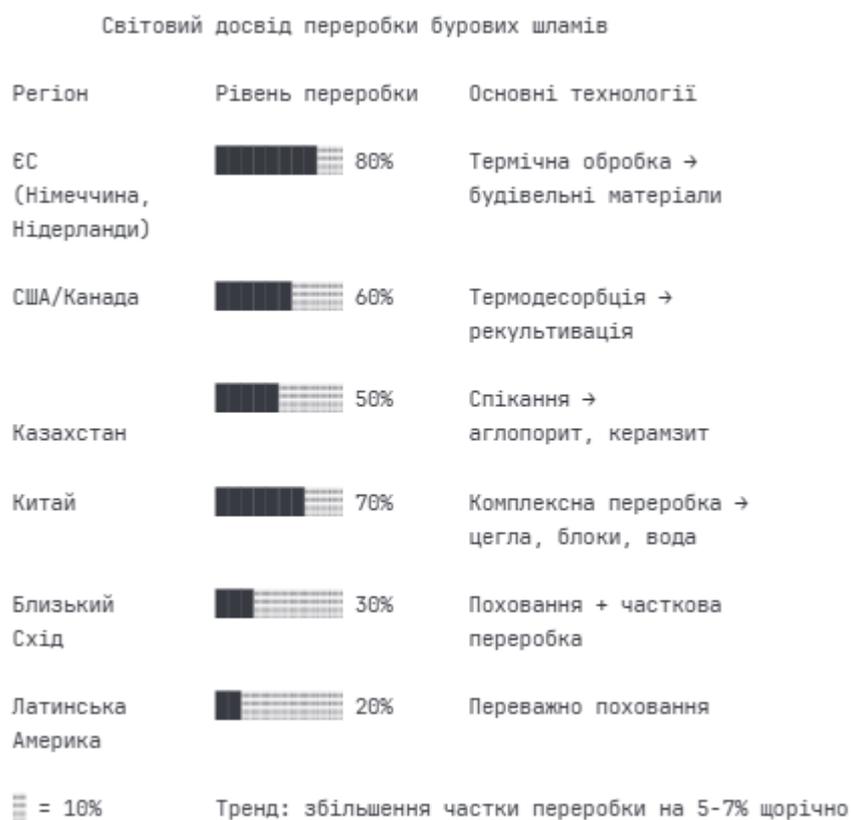


Рисунок 1.5 - Регіональні рівні переробки бурових шламів

Особливий інтерес представляють нанотехнологічні підходи до модифікації властивостей матеріалів з бурових шламів. Введення наночастинок діоксиду кремнію, оксиду титану або вуглецевих нанотрубок у керамічну масу дозволяє підвищити міцність на 20-40%, знизити теплопровідність на 15-25% та надати додаткові функціональні властивості (фотокаталітична активність, антибактеріальні властивості). Хоча ці технології перебувають на стадії лабораторних досліджень, їх потенціал для створення високотехнологічних будівельних матеріалів є значним.

Впровадження інноваційних технологій переробки бурових шламів в Україні стримується кількома факторами: відсутністю економічних стимулів для нафтогазовидобувних компаній, недостатньою розвиненістю нормативно-правової бази, браком спеціалізованого обладнання та досвідчених кадрів. Однак

посилення екологічних вимог, зростання вартості поховання відходів та потенціал експорту екологічних технологій створюють сприятливі передумови для розвитку цього напрямку.

Технологічна схема типової установки для виробництва аглопориту з бурових шламів включає кілька послідовних стадій. На першій стадії здійснюється приймання та усереднення вихідної сировини, де буровий шлам змішується з коригуючими добавками (глина, трепел, відходи вуглезбагачення) для досягнення оптимального хімічного складу. Друга стадія - механічне зневоднення на фільтр-пресах або центрифугах до вологості 18-25%, що забезпечує можливість формування гранул. Третя стадія - подрібнення та гомогенізація у змішувачах інтенсивної дії з одночасним додаванням порофорів (речовин, що утворюють пори). Четверта стадія - грануляція маси на тарілчастих або барабанних грануляторах з отриманням зерен розміром 5-40 мм. П'ята стадія - сушіння гранул у сушильних барабанах при температурі 150-200°C. Шоста стадія - випал у обертових печах або на агломераційних машинах при температурі 1050-1180°C з витримкою у зоні максимальних температур 15-25 хвилин. Сьома стадія - охолодження, фракціонування та упаковка готової продукції.

Енергетичний баланс процесу виробництва аглопориту характеризується високою часткою внутрішнього палива. Органічні компоненти бурових шламів (нафтопродукти, бітуми, органічні реагенти) при згорянні виділяють 15-25 МДж/кг, що забезпечує 30-45% теплоти, необхідної для спікання. Решта теплоти надходить від спалювання природного газу або мазуту. Питомі витрати умовного палива становлять 150-200 кг/т аглопориту, що на 20-30% менше, ніж при виробництві з традиційної глинистої сировини. Електроенергія витрачається на привід обладнання, вентиляцію та очищення газів - близько 80-120 кВт·год/т продукції.

Якість аглопориту суттєво залежить від хімічного складу вихідного шламу та режимів термічної обробки. Оптимальний склад шихти має містити:  $\text{SiO}_2$  - 55-70%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 12-18%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 4-8%,  $\text{CaO}$  - 2-6%,  $\text{MgO}$  - 1-4%, органічні речовини

- 3-8%. Відхилення від цих діапазонів може призводити до погіршення спучування, зниження міцності або утворення тріщин. Температурний режим повинен забезпечувати поступове нагрівання (50-100°C/хв) до 800°C, потім прискорене нагрівання (150-200°C/хв) до температури спучування 1050-1180°C з швидким охолодженням для фіксації пористої структури.

Порівняльний аналіз різних видів пористих заповнювачів представлений у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Порівняльні характеристики пористих заповнювачів

Вид заповнювача	Сировина	Насипна щільність, кг/м <sup>3</sup>	Міцність, МПа	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Собівартість, грн/м <sup>3</sup>	Екологічність
Аглопорит глини	Глина	400-700	2,0-5,0	0,14-0,20	800-1200	Середня
Аглопорит шламів	Буровий шлам	350-650	1,8-4,5	0,12-0,18	600-1000	Висока
Керамзит	Глина	450-800	2,5-7,0	0,16-0,24	900-1400	Середня
Перліт	Вулканічна порода	200-400	0,5-1,5	0,06-0,12	1500-2500	Середня
Вермікуліт	Слюда	150-350	0,3-1,0	0,05-0,10	2000-3500	Середня
Полістиролбетон	Полістирол	200-500	0,5-2,0	0,07-0,14	1200-2000	Низька

Контроль якості аглопориту здійснюється на всіх етапах виробництва відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-18-95. Вхідний контроль сировини включає визначення хімічного складу, вологості, гранулометрії та спікливості. Операційний контроль передбачає моніторинг температурних режимів, швидкості обертання печі, витрат палива та повітря. Контроль готової продукції включає визначення насипної щільності, міцності зерен при роздавлюванні у циліндрі, водопоглинання, морозостійкості та вмісту радіонуклідів. Періодично проводяться випробування на теплопровідність, звукоізоляцію та довговічність у складі бетонів.

Екологічний моніторинг виробництва аглопориту є обов'язковим елементом забезпечення безпеки. Контролюються викиди в атмосферу (пил, оксиди азоту, сірки та вуглецю, органічні сполуки), скиди у водойми (за

відсутності замкнутого циклу водопостачання) та утворення вторинних відходів (бракована продукція, пил газоочищення). Сучасні установки обладнуються автоматизованими системами контролю викидів з безперервною реєстрацією параметрів та аварійним відключенням при перевищенні нормативів. Санітарно-захисна зона для виробництв потужністю до 100 тис. т/рік становить 300-500 м залежно від застосовуваних технологій очищення газів.

Важливим аспектом є оцінка життєвого циклу матеріалів з бурових шламів (Life Cycle Assessment, LCA), яка враховує екологічні впливи на всіх етапах: від видобутку сировини до утилізації після закінчення терміну служби. Порівняння з традиційними матеріалами показує, що аглопорит з бурових шламів має на 40-60% менший сумарний вплив на довкілля, головним чином за рахунок виключення стадії видобутку глини та утилізації відходів. Питомі викиди парникових газів знижуються з 250-350 кг CO<sub>2</sub>-екв/т для традиційного керамзиту до 150-220 кг CO<sub>2</sub>-екв/т для аглопориту з шламів.

Соціальні аспекти впровадження технологій переробки бурових шламів включають створення робочих місць, покращення екологічної ситуації у регіонах нафтовидобутку та розвиток супутніх виробництв. Один завод потужністю 50 тис. т/рік забезпечує 40-60 постійних робочих місць безпосередньо на виробництві та 100-150 опосередкованих робочих місць у сфері постачання, транспортування та збуту продукції. Покращення екологічної ситуації проявляється у скороченні площ земель, зайнятих під шламосховища, зниженні ризику забруднення підземних вод та атмосферного повітря. Розвиток будівельної індустрії регіону стимулюється наявністю місцевих недорогих матеріалів, що знижує вартість житлового та промислового будівництва.

Перспективні напрямки досліджень у галузі переробки бурових шламів включають:

- Розробку низькотемпературних технологій спікання (800-950°C) з використанням спеціальних флюсів та мінералізаторів
- Створення композиційних матеріалів на основі аглопориту з полімерними або неорганічними модифікаторами

- Впровадження мембранних технологій для глибокого очищення рідкої фази шламів з поверненням води у буровий процес
- Використання біотехнологій для деструкції стійких органічних забруднювачів перед термічною обробкою
- Розробку мобільних компактних установок для переробки невеликих обсягів шламів безпосередньо на бурових майданчиках
- Дослідження можливостей виробництва високотехнологічних матеріалів (сорбентів, каталізаторів, функціональної кераміки) з очищених бурових шламів

Нормативно-правове забезпечення переробки бурових шламів в Україні потребує вдосконалення. Необхідно розробити державні стандарти на товарні продукти з бурових шламів, методики контролю їх екологічної безпеки, технічні умови на сировину для різних напрямків переробки. Доцільно запровадити економічні механізми стимулювання утилізації, зокрема диференційовані ставки екологічного податку (знижені для підприємств, що переробляють шлами, підвищені - для тих, що здійснюють поховання), податкові пільги для інвесторів у проекти переробки, державні замовлення на будівельні матеріали з вторинної сировини.

Міжнародне співробітництво у сфері переробки бурових шламів дозволяє впроваджувати кращі світові практики та залучати іноземні інвестиції. Україна може скористатися програмами технічної допомоги ЄС, зокрема проектами Twinning та TAIEХ, для адаптації європейських екологічних стандартів. Перспективним є співробітництво з провідними виробниками обладнання (Metso Outotec, ThyssenKrupp, FEESCO International) для створення спільних підприємств або трансферу технологій. Участь у міжнародних виставках, конференціях та професійних асоціаціях (International Association of Drilling Contractors, Society of Petroleum Engineers) сприяє обміну досвідом та просуванню українських розробок на зовнішні ринки.

Таким чином, інноваційні технології переробки бурових шламів на товарні продукти представляють собою багатогранний напрямок, що поєднує екологічні,

економічні та соціальні переваги. Термічні методи з виробництвом аглопориту та інших будівельних матеріалів є найбільш перспективними для впровадження в Україні, забезпечуючи високий ступінь знешкодження відходів, конкурентоспроможність продукції та мінімізацію впливу на довкілля. Світовий досвід демонструє економічну доцільність та технічну реалізованість таких проектів за умови державної підтримки та дотримання екологічних стандартів.

#### **1.4 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження**

1 Аналіз статистичних даних свідчить про критичне зростання обсягів бурових відходів – за період 2003-2019 років обсяг похованих відходів збільшився у три рази (з 361,6 млн до понад 1 млрд тонн щорічно), що підтверджує актуальність розробки ефективних технологій утилізації. Загальна маса похованих бурових відходів за 17 років досягла 11,4 мільярда тонн, створюючи значну екологічну загрозу.

2 Буровий шлам містить токсичні компоненти (важкі метали, нафтопродукти, хімічні реагенти), які за відсутності належної утилізації спричиняють забруднення ґрунту, водних ресурсів та атмосфери, становлячи загрозу для екосистем і здоров'я населення. Традиційні методи поховання є неефективними та екологічно небезпечними.

3 Серед існуючих методів утилізації найбільш перспективним визначено метод термічної обробки з отриманням товарних продуктів, зокрема аглопориту. Цей підхід забезпечує знищення шкідливих речовин при високих температурах, скорочення обсягу відходів, можливість енергетичної утилізації та отримання економічно вигідної продукції.

4 Встановлено, що буровий розчин виконує критично важливі функції у процесі буріння (змащування, охолодження, утримання свердловини, винос породних відходів, контроль тиску), а його склад варіюється залежно від геологічних умов та типу свердловин, що впливає на характеристики утворюваних шлаків та вимоги до їх переробки.

5 Розробка інноваційної технології перетворення бурових шламів на товарні продукти дозволяє одночасно вирішити три ключові завдання: утилізацію небезпечних відходів, охорону навколишнього середовища та отримання економічно вигідної продукції будівельного призначення, що відповідає принципам циркулярної економіки.

6 Незважаючи на існування різних методів утилізації (рециркуляція, сушіння, біорозкладання, термічна обробка), відсоток утилізованих відходів залишається низьким (7-15% у різні роки), що свідчить про потребу в розробці більш ефективних, економічно доступних та екологічно безпечних технологій переробки бурових шламів.

**Мета роботи** – це розроблення інноваційної технології термічної переробки бурових шламів з отриманням товарних будівельних матеріалів (аглопориту), що забезпечить мінімізацію екологічного впливу нафтовидобувної промисловості.

**Основні завдання дослідження:**

- Проаналізувати сучасний стан проблеми утилізації бурових шламів і визначити найбільш перспективні напрями їх переробки.
- Провести кількісну та якісну оцінку складу і властивостей бурових шламів.
- Обґрунтувати вибір технологічного устаткування для їх переробки.
- Визначити фізико-хімічні характеристики шламів і підготувати сировину до термічної обробки.
- Експериментально дослідити вплив компонентного складу та температури випалу на властивості отриманого аглопориту.
- Провести оцінку якості та придатності отриманого матеріалу для використання у будівництві.

## РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БУРОВИХ ШЛАМІВ

### 2.1 Кількісна оцінка утворення шламу та визначення його об'ємно-масових характеристик

Середній діаметр свердловини може значно змінюватись в залежності від конкретних умов і цілей буріння. Для нафтових і газових свердловин типові діаметри можуть змінюватись від декількох десятків сантиметрів до декількох метрів. Наприклад, для звичайних нафтових свердловин діаметр може становити від 15 до 30 сантиметрів, а для глибоководних свердловин може досягати 1 метра або більше, як показано на рисунку 2.1.

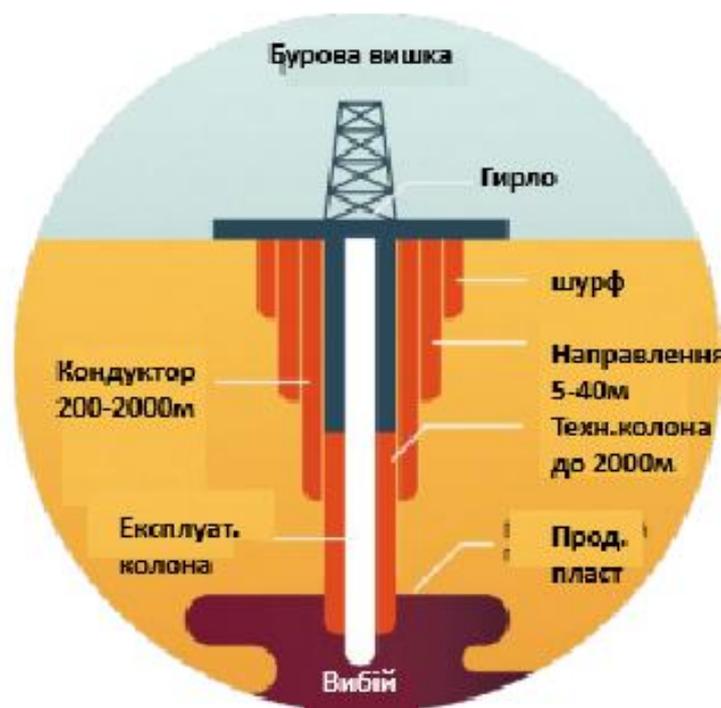


Рисунок 2.1 – Конструкція свердловини

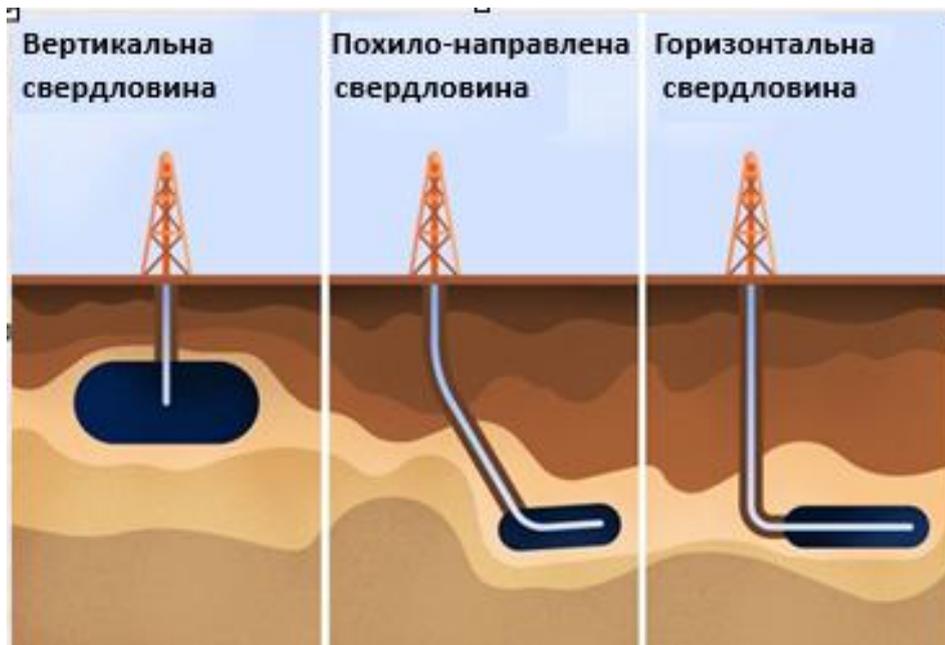


Рисунок 2.2 - Методи буріння свердловини

Виходячи з цих даних, можна розрахувати теоретичний обсяг вибуреної породи ( $V$ ), який, після врахування коефіцієнта розпушення (збільшення об'єму породи при винесенні на поверхню), відповідатиме середньому обсягу бурового шламу, що виділяється в процесі буріння.

Обсяг бурового шламу ( $V$ ) на одній свердловині розраховується за формулою обсягу циліндра.

$$V = \frac{h\pi d^2}{4} = \frac{2000 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2}{4} = 62,8 \text{ м}^3 \quad (2.1)$$

Зазвичай на невеликих родовищах може експлуатуватися від кількох десятків свердловин одночасно. У той же час, на великих родовищах з великими запасами нафти чи газу число одночасно свердловин, що експлуатуються, може досягати декількох сотень або навіть тисяч. Середній розмір вибуреної породи можуть становити від 15 до 50 см, але може бути більшим залежно від родовища та спеціального обладнання, що використовується. Розрахунок обсягу вибуреного бурового шламу наочно показує, наскільки актуальною є проблема утилізації бурового шламу та модернізація процесу.

Насипна вага (або об'ємна насипна маса) – це ключова фізична характеристика дисперсного матеріалу, яка визначається як маса матеріалу, що займає одиницю об'єму в його природному (сипкому) стані. Цей об'єм включає як об'єм твердих частинок, так і об'єм порожнеч (пор) між ними.

При вимірюванні насипної ваги матеріал, зазвичай у сухій або зернистій формі, засипається в мірну посудину без додаткового ущільнення (компактування). Таким чином, насипна вага відображає властивості матеріалу при його природному розосередженні і залежить від форми, розміру частинок та їхнього гранулометричного складу.

Щільність насипного матеріалу має важливе значення у різних галузях промисловості. У Вашому дослідженні насипна вага бурового шламу є критично необхідною для:

- 1 Розрахунку транспортних і складських обсягів: Допомогає визначити необхідну ємність транспорту та сховищ.
- 2 Проектування технологічного процесу: Впливає на роботу дозуючого та змішувального обладнання.
- 3 Визначення марки кінцевого продукту (аглопориту): Насипна вага безпосередньо корелює з пористістю та легкістю готового аглопоритового матеріалу, що є основним показником його якості та марки (наприклад, для легких бетонів).

Формула розрахунку насипної ваги:

$$M = \frac{m \text{ (маса сипучого матеріалу)}}{V \text{ (об'єм тари)}} = \frac{0,063375}{0,0002} = 316,87 \text{ кг/м}^3 \quad (2.2)$$

### **2.3 Обґрунтування та вибір технологічного устаткування для переробки шламу.**

У виробництві аглопориту використовуються спеціальні печі, які забезпечують оптимальні умови для процесу формування. Ці печі

виготовляються з урахуванням вимог до температурного режиму та структурних особливостей процесу випалу аглопориту.

Одним з поширених типів печей, застосовуваних в виробництві аглопориту, є тунельні печі [11]. Тунельна піч являє собою довгу і вузьку конструкцію, якою переміщуються завантажені матеріали. Усередині печі створюється певна температурна зона, у якій відбувається випал аглопориту. Температура та час випалу контролюються для досягнення бажаних фізичних та хімічних властивостей матеріалу.

Іншим типом печей, що використовуються у виробництві аглопориту, є печі, що обертаються [12]. Ці печі мають циліндричну форму і спеціальні елементи, що обертаються всередині, які забезпечують рівномірне перемішування і нагрівання матеріалу. Печі, що обертаються, дозволяють більш ефективно контролювати процес випалу і отримати бажані властивості аглопориту.

Важливо відзначити, що конструкція та характеристики печей можуть змінюватись в залежності від конкретних умов виробництва аглопориту. Вони можуть бути адаптовані до необхідних параметрів температури, часу випалу, швидкості процесу та інших факторів для отримання оптимальних результатів.

Крім спеціальних печей чимало важливу роль відіграють сита, у виробничих процесах широко застосовуються різні типи сіт для класифікації та сортування матеріалів за їх розміром. Нижче наведено кілька варіантів виробничих сіт [13]:

Вібраційні сита: Цей тип сіт використовується з вібраційними системами для поділу матеріалів на різні фракції. Під впливом вібрації частинки проходять через отвори сіта залежно від їхнього розміру.

Роторні сита: Роторні сита мають циліндричну форму і оснащені ротором, що обертається, з отворами. Матеріал подається в сито і обертання ротора дозволяє частинкам проходити через отвори в залежності від їх розміру.

Відцентрові сита: Відцентрові сита використовуються для поділу матеріалів на основі відцентрової сили. Вони мають круглу форму і обертаються

з високою швидкістю, що дозволяє частинкам розділятися в залежності від їх розміру та форми.

**Прокатні сита:** Прокатні сита використовуються у металургійній промисловості для класифікації металевих матеріалів. Вони складаються з рядів паралельно розташованих роликів з отворами, якими проходять частинки.

**Пневматичні сита** використовують потік повітря для сортування матеріалів. Частинки подаються в потік повітря, який поділяє їх на основі їх розміру та ваги.

Кожен вид виробничого сита має свої особливості та застосовується залежно від вимог конкретного виробничого процесу та характеристик матеріалів, які потрібно обробити.

Для визначення розподілу розмірів частинок, у складі шламу, використали метод гранулометрії[14]. Гранулометричний аналіз є важливим інструментом вивчення розмірного складу гранульованих матеріалів. Він дозволяє визначити відсотковий вміст часток різних розмірів і побудувати гранулометричну криву, яка відображає розподіл розмірів частинок в зразок.

Процес гранулометричного аналізу включає кілька етапів. Спочатку зразок матеріалу розбивається більш дрібні частки. Потім отримані фракції проходять через серію сит з отворами різних розмірів, які поділяють частинки їхнього розміру. Кожна фракція зважується визначення їх маси.

Після сортування частинок за розміром проводяться обчислення процентного вмісту частинок різних розмірів та будується гранулометрична крива. Ця крива показує, який відсоток частинок знаходиться в кожному діапазоні розмірів. Аналіз гранулометричної кривою дозволяє оцінити структуру та характеристики гранульованого матеріалу. Гранулометричний аналіз широко застосовується в різних галузях, включаючи гірничу справу, будівництво, геологію та сільське господарство. Він допомагає визначити фізичні властивості матеріалів, такі як розмір частинок, розподіл розмірів, щільність та проникність. Ці дані важливі для проектування процесів виробництва, контролю якості матеріалів і оцінки впливу на навколишню середу.

## 2.3 Методики лабораторної підготовки та визначення фізичних властивостей бурового шламу

Квартирування є альтернативним методом зменшення обсягу вибірки сипучого матеріалу, коли недоступний дільник проб. Процедура квартирування включає перелопачування сипучого зразка для формування конуса, його перевертання для створення нового конуса, і повторення цієї дії ще двічі. Потім третій конус згладжується до отримання рівного шару завтовшки 75-100 мм, який потім ділиться на чотири рівні квадранти, відкидаючи дві діагонально протилежні чверті. Цей процес повторюється з частиною вибірки до досягнення бажаного обсягу вибірки (рис. 2.2).

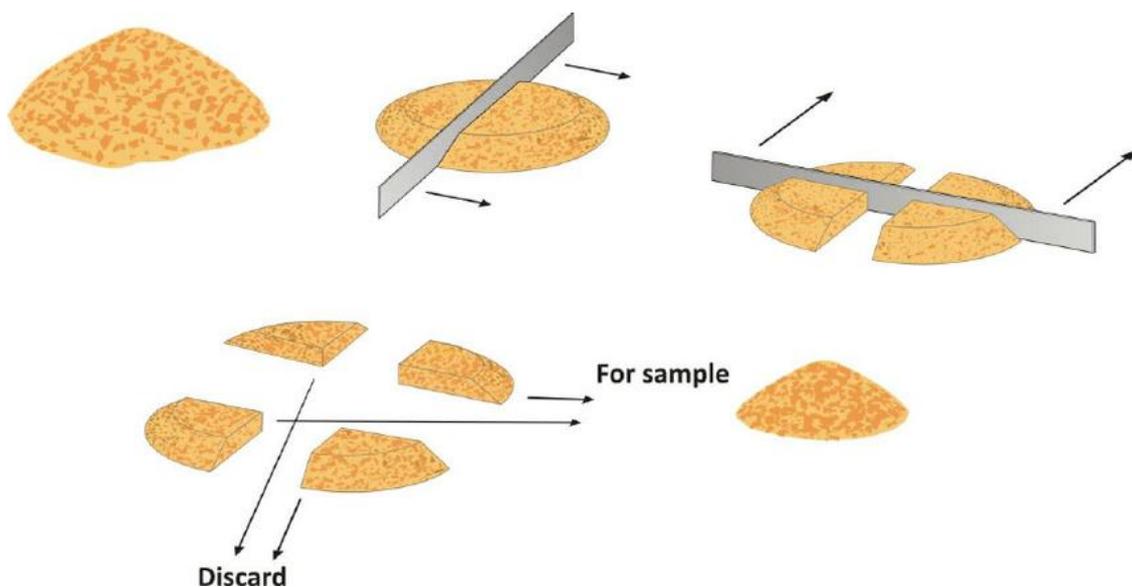


Рисунок 2.2 - Метод квартирування

Метод відмучування є процесом видалення домішок чи забруднень із сирого матеріалу шляхом обробки його водою чи іншими розчинами[15]. У процесі відмучування матеріал занурюється у воду або розчин, а потім механічно або хімічно обробляється для видалення небажаних домішок. Це може включати взаємодію з розчином, осадження, фільтрацію або інші процеси відділення забруднень від основного матеріалу. Метод відмучування має на меті покращити якість та чистоту матеріалу, забезпечуючи його відповідність вимогам та

стандартам. Він відіграє важливу роль у виробництві якісних продуктів та матеріалів, а також у обробці сировини перед її подальшою переробкою чи використанням. Цей широко використовується в харчовій промисловості, будівельної, хімічної та багатьох інших.

Пікнометрична густина - це фізична характеристика речовини, яка визначає його відношення маси до обсягу. Цей параметр вимірюється з використанням пікнометра - спеціального скляного судини з відомим об'ємом, показаний на рисунку 2.3. У процесі вимірювання пікнометричної густини, пікнометр заповнюється досліджуваною речовиною, після чого його маса визначається з високою точністю. Потім обчислюється густина шляхом розподілу маси на об'єм.



Рисунок 2.3- Пікнометр

Пірометр – це пристрій, який використовується для безконтактного виміру високих температур. У пірометра є свої плюси та мінуси, які слід врахувати:

Плюси пірометра:

- Неконтактний вимір: Пірометр дозволяє вимірювати температуру об'єктів без фізичного контакту з ними, що є корисним для запобігання пошкодженням або контамінації.

- Висока швидкість вимірювання: Пірометри можуть забезпечувати швидкі та миттєві вимірювання температури, що особливо важливо у випадках,

коли швидке реагування на зміни температури необхідне.

- Вимірювання високих температур: Пірометри здатні вимірювати дуже високі температури, що робить їх ідеальними для застосування у високотемпературних процесах, наприклад, у промисловості чи металургії.

- Мінуси пірометра:

- Обмеження діапазону вимірювання: Кожен пірометр має свій діапазон вимірювань, обмежений певним діапазоном температур. Для вимірювання дуже низьких або дуже високих температур може бути потрібне використання інших методів вимірювання.

- Вплив навколишнього середовища: Пірометри можуть бути піддані впливу навколишніх умов, таких як пил, пари або дим, що може вплинути на точність вимірювань та вимагати спеціальних корекцій.

- Залежність від емісійної здатності: Пірометри вимірюють температуру на основі випромінювання об'єкта, і емісійна здатність поверхні об'єкта може вплинути на точність вимірювань. Різні поверхні можуть мати різні емісійні здібності, що може вимагати обліку та корекції даних.

Існує кілька різних методів зневоднення бурових розчинів:

- Фільтрування: це процес поділу твердих частинок від рідини шляхом пропускання через фільтри або пористі матеріали.

- Центрифугування: метод, заснований на використанні відцентрової сили для поділу рідкої та твердої фаз.

- Випаровування: це процес, при якому рідина перетворюється на газоподібний стан шляхом нагрівання та видалення вологи або інших розчинених речовин.

- Осадження: метод, при якому тверді частинки осідають на дні рідини після її стояння, а потім видаляються.

- Стиснення: процес, при якому матеріал стискається, щоб видалити надмірну вологу.

- Зворотний осмос: метод, заснований на використанні мембран для фільтрації та видалення розчинених речовин та води.

- Екстракція: процес отримання рідини з твердого матеріалу з використанням розчинників або хімічних речовин.
- Кожен із цих методів має свої переваги і може бути обраний залежно від необхідного результату та особливостей конкретного процесу зневоднення.

## 2.4 Висновки до розділу 2

1 Проведені розрахунки обсягу бурового шламу за формулою об'єму циліндра, що враховує діаметр, глибину свердловини та коефіцієнт розпушення, підтверджують значні масштаби утворення цього відходу. Отримані дані підкреслюють критичну актуальність розробки інноваційних технологій його переробки та модернізації процесу утилізації нафтогазових родовищ.

2 Визначення насипної ваги бурового шламу є необхідним етапом для подальшого проектування технології. Показник насипної ваги бурового шламу є критичним для правильного розрахунку транспортних обсягів, вибору дозуючого обладнання та, найголовніше, для визначення марки кінцевого продукту (аглопориту), оскільки безпосередньо корелює з його легкістю та пористістю.

3 Для перетворення бурового шламу на товарний продукт (аглопорит) обґрунтовано вибір ключового технологічного устаткування, а саме: обертових або тунельних печей для термічної обробки та різних типів сит (вібраційних, роторних) для класифікації і гранулометричного аналізу. Вибір цих елементів забезпечує ефективний контроль процесу випалу та отримання кінцевого матеріалу із заданими фізико-механічними властивостями.

4 Репрезентативне відділення проби методом квартування є необхідною передумовою для отримання достовірних результатів подальших досліджень, забезпечуючи однорідність лабораторної вибірки. Відмучування вихідного шламу дозволяє знизити вміст водорозчинних солей та дрібних глинистих частинок, що критично важливо для поліпшення якості сировини перед термічною обробкою та запобігання дефектам аглопориту.

5 У межах дослідження для забезпечення точності технологічних розрахунків визначено дві ключові фізичні характеристики: істинна щільність бурового шламу за пікнометричним методом та вологість за методом зневоднення осаду. Використання пірометра як безконтактного засобу вимірювання температури забезпечує можливість оперативного та точного контролю високотемпературного режиму випалу бурового шламу при виробництві аглопориту.

## РОЗДІЛ 3 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БУРОВОГО ШЛАМУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ АГЛОПОРИТУ

### 3.1 Комплексний аналіз вихідної сировини та підготовка проби

Для дослідження фізико-хімічних властивостей бурового шлам було взято зразки з родовища розташованого в Дніпровсько-Донецькій западині. Шлам був представлений у вигляді обводненої (рідкої) та осадової (твердої) фази. Рідка фаза наведена рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 - Рідка фаза бурового шлам.

Тверда фаза після сушіння являє собою переважно гірську та осадову

породу, наведену на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 - Тверда фаза бурового шламу.

Більшість твердого осаду становить вибурена порода, а колоїдна частина осаду містить значною мірою у вигляді бентоніту. Бентоніт є одним із найпоширеніших видів глинистих мінералів. Він має високу водопоглинаючу здатність і розпухає при контакті з водою, утворюючи гелеподібну консистенцію. Ці властивості роблять його ідеальним для використання в процесах зв'язування, гідроізоляції, ґрунтозахисту, очищення води, бурових робіт та багатьох інших програм.

Основна мета кватрування проби полягає у забезпеченні представницькості досліджуваного матеріалу та зменшенні можливих помилок та неоднорідностей. Кожна з отриманих чотирьох частин може бути

використана для проведення різних аналізів, випробувань або вимірювань, що дозволяє отримати більш точні та надійні результати. Для дослідження твердої фази був використаний цей метод, як показано на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 - Квартування проби.

Характеристика дисперсного матеріалу відіграє важливу роль у їх технологічних властивостях та сферах застосування. Один з основних показників ступеня подрібнення – це гранулометричний склад. Гранулометричний склад визначається за допомогою ситового аналізу, який передбачає процес розсівання проби на ситах з різними розмірами осередків. Цей аналіз може застосовуватися для матеріалів з розмірами частинок в діапазоні від 10 до 0,04 мм, що відповідає шкалі сит (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 - Вібросіто марки «Екрос»

У процесі відсіювання було визначено зміст великих і дрібних частинок бурового шламу на аналітичних терезах, після відсіювання на вібросіте марки «Екрос» розмір осередки позначимо як -  $r$ .

$r=7,0$  мм,  $M_r = 11,445$  г;  $r=5,0$  мм,  $M_r = 22,015$  г;  $r=3,0$  мм,  $M_r = 30,100$  г;  $r=2,0$  мм,  $M_r = 44,260$  г;  $r=1,0$  мм,  $M_r = 91,570$  г;  $r=0,63$  мм,  $M_r = 38,775$  г;  $r=0,5$  мм,  $M_r = 26,410$  г;  $r=0,315$  мм,  $M_r = 29,530$  г;  $r=0,25$  мм,  $M_r = 15,155$  г;  $r=0,1$  мм,  $M_r = 47,170$  г;  $r < 0,1$  мм,  $M_r = 11,470$  г;

Була побудована діаграма залежності маси дрібно дисперсних частинок від розміру осередку вібросіта марки «Екрос» (рис. 3.5).

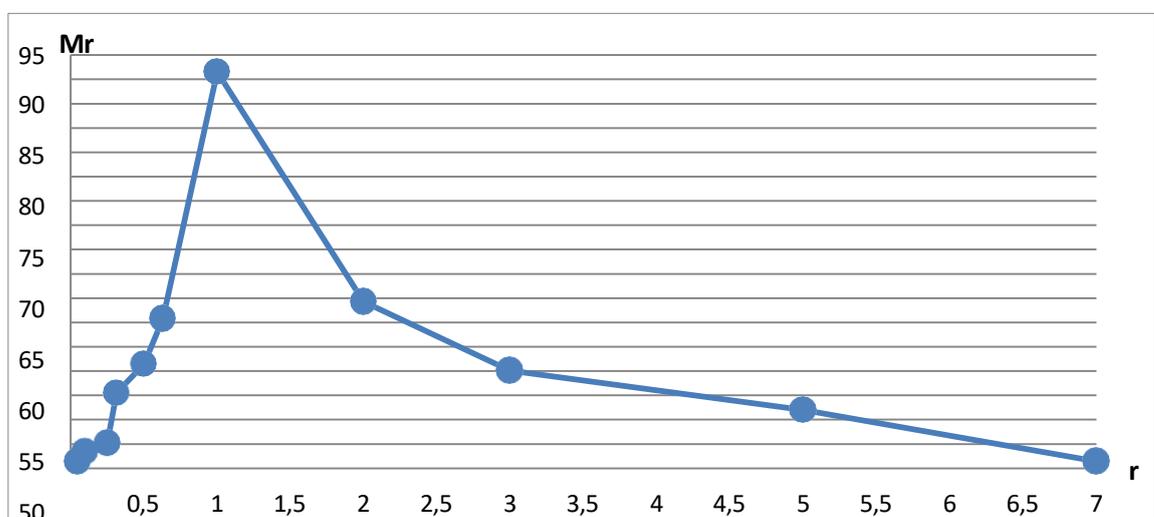


Рисунок 3.5 - Діаграма залежності маси від розміру осередків

З діаграми можна зробити висновок, що більше кількість твердого бурового шламу включає частинки розміром від 1 мм рисунки 3.6 – 3.9.



Рисунок 3.6 - Дисперсні частинки розміром: 7,0; 5,0; 3,0



Рисунок 3.7 - Дисперсні частинки розміром: 2,0; 1,0; 0,63



Рисунок 3.8 - Дисперсні частинки розміром: 0,5; 0,315; 0,25

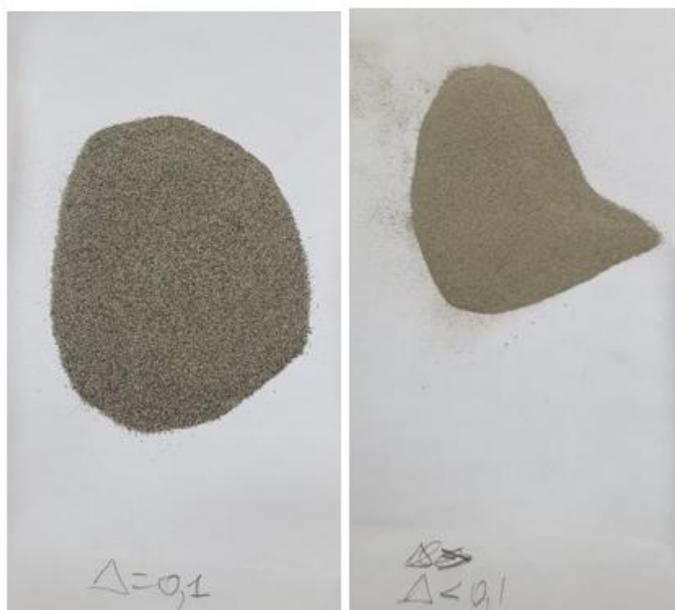


Рисунок 3.9 - Дисперсні частинки розміром: 0,1; 0,05

### **3.2 Експериментальна розробка технологічного процесу отримання аглопориту**

Для підвищення газопроникності в шарі, в процесі отримання аглопоритового гравію, застосовується попереднє гранулювання шихти, показане на рисунку 3.10. Гранулювання шихти покращує поверхневий шар для

кращого протікання процесу термообробки, що дозволяє однорідно розподілити речовини та підвищує продуктивність виробництва аглопориту. Оптимальний розмір гранул становить від 5 до 10 мм., насипна вага яких становить 350-550кг/м<sup>3</sup> а міцність варіюється від 20 до 60 кгс/см<sup>2</sup> [16]. Перед початком робіт потрібно очищення шихти методом відмучування. Далі проводиться укрупнення гранул на тарілчастому грануляторі. до оптимального значення зі зв'язувальною речовиною, показаний на рисунку 3.10. Як зв'язуючу речовину був взятий нами метил целюлоза, з відсотковим вмістом 5%.



Рисунок 3.10 - Гранулятор тарілчастий

В результаті проведеного експерименту було виявлено, що для досягнення необхідного розміру гранул необхідно використовувати інертне речовина, яка забезпечить стабільність зростання частинок. У процесі виробництва аглопориту додається близько 10% золи для досягнення оптимального балансу властивостей матеріалу[17]. Це конкретне значення вибирається на основі досліджень та досвіду, щоб забезпечити найкращі результати.

Застосування 10% золи в аглопорит має свої причини. По-перше, зола

може бути додатковим джерелом мінеральних добавок, які покращують характеристики матеріалу, такі як міцність та теплоізоляція. По-друге, це додавання може сприяти досягненню оптимальної щільності матеріалу, що є важливим для його механічних властивостей.

Після отримання гранул необхідного розміру була виконана термічна обробка з отриманням товарного продукту - аглопориту. Як термічний посуд було виготовлено лабораторну установку з кварцового скла, яка витримує необхідні температури і є зручною для візуального спостереження експерименту, показана на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 - Лабораторна кварцева установка

Для визначення температури всередині установки, був використаний пірометр FLIR SYSTEMS – Thermo Point (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 - Пірометр FLIR SYSTEMS - Thermo Point



Рисунок 3.13 - Керамічні кільця

Через технічні обмеження пірометра і здатність кварцового скла, що відбиває, пірометр дав не точні значення температури, приблизно 700 -740 °С. Для отримання точних даних був використаний метод керамічних кілець (рис. 3.13). Похибка вимірювання Температура за допомогою керамічних кілець становить від 1 до 5 градусів Цельсія.

Таблиця 3.1 – Розрахунку температури

Номер конуса	Температура, °С	Номер конуса	Температура, °С	Номер конуса	Температура, °С
022	600	03	1045	17	1485
021	650	02	1070	18	1505
020	670	01	1100	19	1530
019	690	1	1130	20	1550
018	710	2	1155	23	1590
017	730	3	1170	26	1605
016	750	4	1185	27	1630

015	790	5	1195	28	1635
014	815	6	1225	29	1645
013	835	7	1240	30	1655
012	855	8	1265	31	1680
011	885	9	1280	31 ½	1700
010	900	10	1305	32	1720
09	920	11	1315	32 ½	1730
08	940	12	1325	33	1740
07	960	13	1345	34	1760
06	980	14	1365	35	1785
05	1000	15	1430	36	1795
04	1020	16	1470		

Експериментально було доведено, що температура стінок температура досягає 850 °С, а центрі зони горіння становить 970 -1000 °С (рис. 3.14-3.15).



Рисунок 3.14 - Високотемпературне випалення аглопориту



Рисунок 3.15 - Високотемпературне випалення аглопориту

Крім керамічних кілець, теоретично було розраховано метод визначення температури кольору вогню, наведений на рисунку 3.16.

Колір накаливання	Температура, °C
Темнокоричневий	530-580
Коричнево-червоний	580-650
Темно-червоний	650-730
Темновишнево-червоний	730-770
Вишнево-червоний	770-800
Світловишнево-червоний	800-830
Світло-червоний	830-900
Помаранчевий	900-1050
Темно-жовтий	1050-1150
Світло-жовтий	1150-1250
Білосніжний	1250-1300

Рисунок 3.16 - Метод визначення температури по кольору розжарювання

Нафти-газові родовища у ДДЗ вважаються найбільш оптимальними для виробництва аглопориту, так як у цих родовищах велике кількість осадових і гірських порід і дефіцит шматкового матеріалу, які потрібні для потреб

підприємства. З погляду фінансової ефективності аглопорит є найсучаснішим, та ресурсоефективним напрямом для нафтових компаній, і негативно впливає на довкілля (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 - Готовий товарний продукт - аглопорит

Додавання золи для підтримки екзотермічної реакції, є додатковою перевагою утилізації відразу двох техногенних відходів. Зміст великої кількості кальцинованої солі у складі золошлакового матеріалу збільшує додатково міцність наповнювача та зростання гранул.

### **3.3 Оцінка якості товарного продукту**

У процес дослідження було докладніше досліджено обводнені (рідкі) фази бурового шламу. У більшості випадків буровий шлам буває сильно обводненим, і осадження твердих частинок відбувається повільно. У свердловинах спеціально йде процес добавки антикоагулянта в буровий розчин, для вимивання свердловини від порожньої породи. У ході фізико-хімічних методів аналізу ці

фактори були враховані і обрані оптимальні коагулянти для більш швидкого і повного осадження рідкої фази розчину. З вищевказаних методів зневоднення опадів, найбільш доцільним та економічно вигідним є осадження із застосуванням ефективних коагулянтів. Було проведено серію лабораторних експериментів.

Як оптимальний коагулянт був використаний алюміній сірчаноокислий  $Al_2(SO_4)_3$  та поліакриламід ПАА.

Найшвидше осадження осаду в ході експериментів було встановлено  $pH=7$ . Як нейтралізація рідкої фази бурового розчину був використаний кальцинована сода  $Na_2CO_3$ . У ході дослідження було виявлено, що більш повне та швидке осадження йшло з коагулянтом сірчаноокислим алюмінієм  $Al_2(SO_4)_3$  та подальші роботи були саме з цим коагулянтом, рисунок 3.18.



Рисунок 3.18 - Алюміній сірчаноокислий  $Al_2(SO_4)_3$

Перед початком робіт було підготовлено розчини, зважуючи точну кількість речовин на аналітичних терезах. Використання аналітичних ваг забезпечує високу точність та контроль маси речовини, що є важливим для точних результатів та досліджень, рисунок 3.19.



Рисунок 3.19 - Маса проби коагулянта і кальцинованої соди

Для експерименту були приготовлені 500 мл 0,1 М розчини коагулянту та кальцинованої соди, рисунок 3.20.

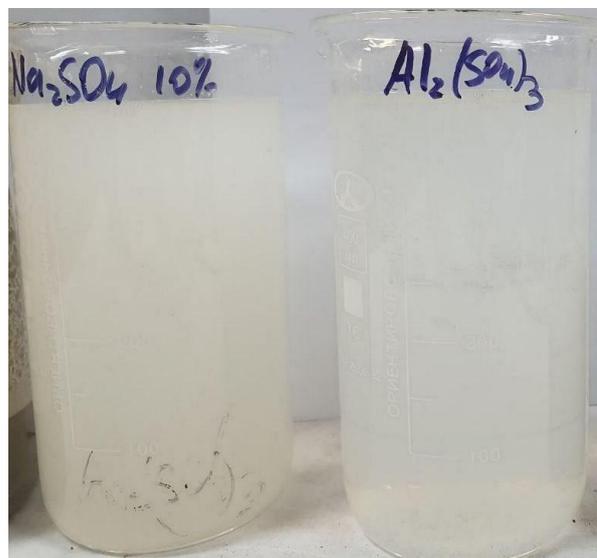


Рисунок 3.20- Розчин коагулянту та кальцинованої проби

Дослідження показало, що осадження бурового розчину обсягом 100 мл і доведення рН до 7 відбувається швидше і повніше з використанням коагулянта  $Al_2(SO_4)_3$  ніж з застосуванням коагулянту ПАА (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 - Осадження бурового розчину з допомогою коагулянта

В рамках дослідження були проведені додаткові досліди з додаванням розчину золи різної концентрації (10%, 15%, 20%) у поєднанні з коагулянтом у бурові розчини. Максимально ефективним є з них є 10% розчин золи (рис. 3.22).

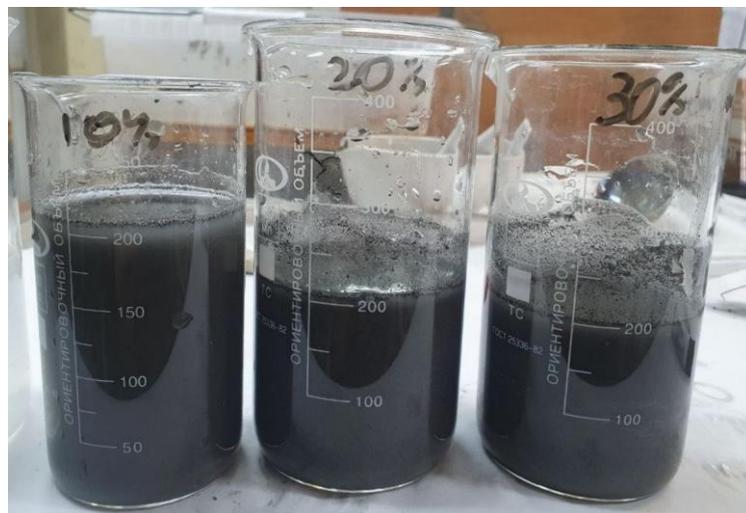


Рисунок 3.22 - Розчини золи з різною концентрацією

Поєднання додавання золи з коагулянтом значно прискорює процес осадження та забезпечує більш повне осадження осаду. Метод осадження з використанням золи являє собою процес, при якому розчин додається зола з метою утворення осаду [18]. Речовини, що містяться в золі, здатні стимулювати

злипання та осадження розчинених частинок. При взаємодії з розчином, попіл сприяє утворенню більш щільного осаду, що покращує його відокремлення від розчину (рис. 3.23). Цей метод знаходить широке застосування в різних областях, включаючи обробку води, очищення стічних вод та інші процеси фільтрації та очищення.

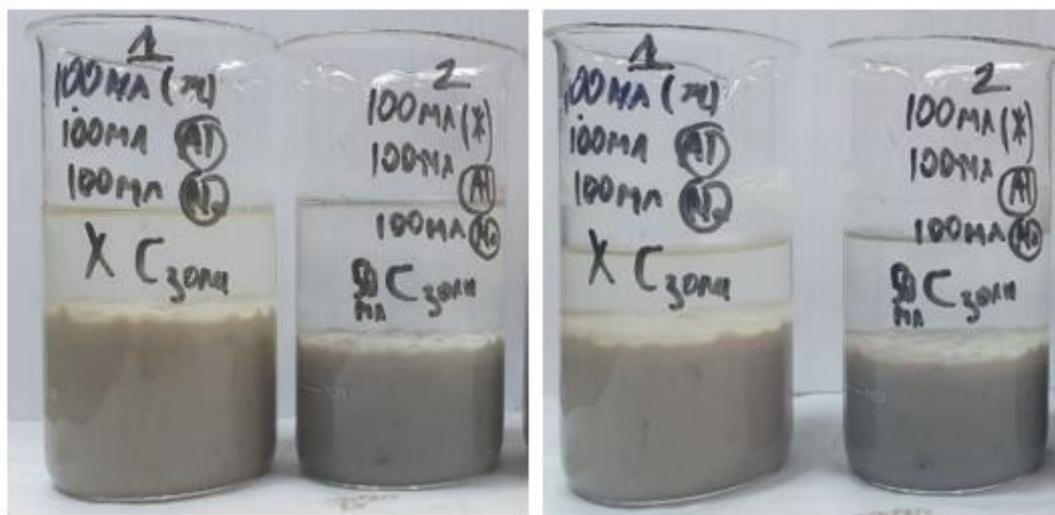


Рисунок 3.23 - Осадження бурового розчину в комплекті з коагулянтном та золюю

### 3.4 Висновки до розділу 3

1 У результаті фізико-хімічних досліджень бурового шламу, відібраного з родовища Дніпровсько-Донецької западини, встановлено, що тверда фаза представлена переважно вибуреною породою та бентонітовмісними компонентами, які зумовлюють високу водопоглинальну здатність і придатність матеріалу для подальшого використання.

2 Проведено гранулометричний аналіз, який показав, що основна частина твердого шламу складається з частинок розміром понад 1 мм, що забезпечує хороші умови для гранулювання та формування однорідної шихти при отриманні аглопориту.

3 Експериментально розроблено технологію отримання аглопориту шляхом гранулювання шихти з додаванням 10% золи та подальшої

термообробки при температурі 970–1000 °С. Отриманий матеріал характеризується низькою щільністю, достатньою міцністю та є перспективним для використання як легкий заповнювач у будівельних матеріалах.

4 У ході проведених експериментальних досліджень встановлено, що найбільш ефективним коагулянтном для зневоднення бурового шламу є сірчаноокислий алюміній  $Al_2(SO_4)_3$ , який забезпечує швидке та повне осадження твердої фази при оптимальному значенні рН = 7. Використання кальцинованої соди  $Na_2CO_3$  як нейтралізатора дозволило досягти стабільності показників середовища та підвищити ефективність коагуляції.

5 Додаткове введення 10% розчину золи у поєднанні з коагулянтном  $Al_2(SO_4)_3$  значно покращує процес осадження бурового розчину, сприяючи утворенню щільного, добре відокремлюваного осаду. Такий підхід є технологічно доцільним і економічно вигідним методом обробки рідкої фази бурових шламів, що підвищує якість отриманого товарного продукту.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено важливу науково-технічну задачу підвищення ефективності утилізації бурових відходів шляхом розробки технології перетворення бурового шламу на товарний продукт – аглопорит.

1 Аналіз статистичних даних свідчить про стрімке зростання обсягів утворення бурових відходів, що створює серйозну екологічну загрозу та підтверджує необхідність розробки ефективних технологій їх утилізації та повторного використання у промисловості.

2 Дослідження фізико-хімічних властивостей бурового шламу показало, що він містить токсичні компоненти, однак після відповідної підготовки та термічної обробки може бути використаний як сировина для виготовлення легких заповнювачів будівельних матеріалів.

3 Встановлено, що найефективнішим способом зневоднення бурового шламу є коагуляція з використанням сірчаноокислого алюмінію  $Al_2(SO_4)_3$  при нейтральному середовищі ( $pH = 7$ ), що забезпечує швидке осадження твердої фази та підвищує якість отриманого матеріалу.

4 Експериментально доведено, що додавання 10% золи до шихти під час гранулювання сприяє поліпшенню структурних властивостей аглопориту. Термічна обробка при 970–1000 °C забезпечує отримання матеріалу з низькою густиною, високою пористістю та достатньою міцністю.

5 Проведення експериментальних досліджень із використанням аналітичного обладнання (ваг, пірометра, пікнометра) забезпечило високу точність визначення фізико-хімічних параметрів бурового шламу. Отримані результати підтвердили достовірність розробленої технології та її практичну придатність до промислового впровадження.

## GENERAL CONCLUSIONS ON THE WORK

The work solves an important scientific and technical problem of increasing the efficiency of drilling waste disposal by developing a technology for converting drilling sludge into a commercial product – agloporite.

1 Analysis of statistical data shows a rapid increase in the volume of drilling waste, which poses a serious environmental threat and confirms the need to develop effective technologies for its disposal and reuse in industry.

2 Research into the physical and chemical properties of drilling sludge has shown that it contains toxic components, but after appropriate preparation and heat treatment, it can be used as a raw material for the production of lightweight fillers for building materials.

3 It has been established that the most effective method of dewatering drilling sludge is coagulation using aluminum sulfate  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  in a neutral environment (pH = 7), which ensures rapid precipitation of the solid phase and improves the quality of the resulting material.

4 It has been experimentally proven that adding 10% ash to the charge during granulation improves the structural properties of agloporite. Heat treatment at 970–1000 °C ensures the production of a material with low density, high porosity, and sufficient strength.

5 Experimental studies using analytical equipment (scales, pyrometer, pycnometer) ensured high accuracy in determining the physicochemical parameters of drilling sludge. The results confirmed the reliability of the developed technology and its practical suitability for industrial implementation.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко В.С. Підземний ремонт свердловин / В.С. Бойко. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 587 с.
2. Боровик М. В., Гордійчук М. В., Васильченко А. О., Матушек Р. Р. Перспективні напрямки підвищення якості розкриття продуктивних пластів і методів інтенсифікації // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 2(55). – С. 45–54.
3. Боровик М. В., Гордійчук М. В., Кобзар Ю. Б., Ліхван В. М. Термосолестійкі бурові розчини для буріння глибоких свердловин з АВПТ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 4(49). – С. 149–158.
4. Буріння свердловин: навч. посіб. / Є.А. Коровяка, В.Л. Хоменко, Ю.Л. Винников, М.О. Харченко, В.О. Расцветаєв; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 292 с.
5. Винников Ю.Л. Методологія науково-дослідних робіт: конспект лекцій для студентів спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології. Ступінь вищої освіти – магістр / Ю.Л. Винников. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022 – 70 с.
6. Дем'яненко І.І. Проблеми і оптимізація нафтогазопошукових і розвідувальних робіт на об'єктах Дніпровсько–Донецької западини / І.І. Дем'яненко. – Чернігів: ЦНТЕІ, 2004. – 220 с.
7. Деякі аспекти впровадження сучасних технологій буріння глибоких нафтових і газових свердловин // Мінеральні ресурси України. – 2020. – №11 (35). – С. 23-29.
8. Коровяка Є.А. Прогресивні технології спорудження свердловин: монографія [Електронний ресурс] / Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатів ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Електрон. текст. дані. – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. – 166 с.
9. Коцкулич Я.С. Закінчування свердловин: підручник / Я.С.Коцкулич, О.В. Тищенко. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2009. – 366 с.

10. Нестеренко М.Ю. До питання визначення відкритої пористості порід за допомогою газоволюметричного методу / М.Ю. Нестеренко, Я.А. Пилип, В.В. Іванов, Ю.М. Віхоть // Нафтова і газова промисловість. – 2011. – №2. – С. 17 – 20.
11. Новітні методи розкриття та освоєння пластів з аномально низькими пластовими тисками / О.О.Іванків, В.М.Світлицький, М.М. Яворський, А.А.Писаренко // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2007. – №2(16). – С. 48 – 53.
12. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурові промивальні рідини та тампонажні суміші: Підручник. – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – 296 с.
13. Павличенко А.В. Гідрогазодинамічні процеси при спорудженні та експлуатації свердловин. Монографія. А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов, О.М. Давиденко; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 201 с.
14. Павличенко А.В. Дослідження гідравлічних основ циркуляції технологічних рідин Монографія / А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка».– Дніпро: Журфонд, 2023. – 212 с.
15. Пащенко О.А. Експлуатація бурового обладнання: навч. посіб. О.А. Пащенко, Є.А. Коровяка, В.Л. Хоменко, В.О. Расцветаєв, О.М. Федик, С.В. Калинович. Дрогобич. Посвіт, 2024. – 300 с
16. Політучий О.І. Буріння нафтових і газових свердловин: навч. посібник / О.І. Політучий. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 170 с.
17. Промивальні рідини в бурінні: Підручник для студентів спеціальностей 184 «Гірництво» та 185 «Нафтогазова інженерія та технології» / Є.А. Коровяка, Ю.Л. Винников, А.О. Ігнатов, О.В. Матяш, В.О. Расцветаєв; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка», 4-те вид., доп. – Дніпро : Журфонд, 2023. – 420 с.
18. Технологія і техніка буріння / В.С. Войтенко, В.Г. Вітрик, Р.С. Яремійчук, Я.С. Яремійчук. – Львів: Центр Європи, 2012. – 708 с.

19. Фем'як Я. М. Практичне використання кавітаційних процесів у бурінні свердловин. Монографія. Фем'як Я. М., Чудик І. І., Судаков А. К., Якимченко Я.Я., Федик О. М.. – Дрогобич: «Посвіт». - 2021. - 232 с
20. Яремійчук Р. С., Качмар Ю. Д., Семак О. С. Відкриття, розвідка та експлуатація нафтових і газових родовищ. – Львів: Центр Європи, 2003. – 450 с.
21. Ясов В. Г., Костик М. А. Розробка гуматно-біополімерного бурового розчину з низьким вмістом твердої фази для буріння свердловин в умовах родовищ Дніпровсько-Донецької западини: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.10. – Івано-Франківськ, 2001. – 168 с.
22. Abdo J., Haneef M.D. Nano-Enhanced Drilling Fluids: Pioneering Approach to Overcome Uncompromising Drilling Problems. // J. Energy Resour. Technol., ASME, 2012, Vol. 134(1).
23. Adilbekova A., Yertayeva A. Pickering emulsions stabilized by some inorganic materials. // Chemical Bulletin of Kazakh National University, 2021, Vol. 100, p. 30–49. DOI: 10.15328/cb1135.
24. Ahmed N., Alam M.S., Salam M.A. Experimental analysis of drilling fluid prepared by mixing iron (III) oxide nanoparticles with a KCl–Glycol–PHPA polymer-based mud. // J. Pet. Explor. Prod. Technol., Springer, 2020, Vol. 10(8), p. 3389–3397.
25. Alcázar-Vara L.A., Cortés-Monroy I.R. Drilling Fluids for Deepwater Fields: An Overview. // Recent Insights in Petroleum Science and Engineering. InTech, 2018.
26. Al-Saba M.T. et al. Application of nanoparticles in improving rheological properties of water-based drilling fluids. – 2018, p. 23–26.
27. Alsaba M.T., Al Dushaishi M.F., Abbas A.K. A comprehensive review of nanoparticles applications in the oil and gas industry. // J. Pet. Explor. Prod. Technol., Springer, 2020, Vol. 10, №4, p. 1389–1399.
28. Al-Yasiri M.S., Al-Sallami W.T. How the drilling fluids can be made more efficient by using nanomaterials. // Am. J. Nano Res. Appl., 2015, Vol. 3(3), p. 41–45.
29. Aziukovskyi O.O. Drilling and operation of oil and gas wells in difficult

conditions : monograph / O.O. Aziukovskyi, Ye.A. Koroviaka, A.O. Ihnatov; Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro University of Technology. – Dnipro: Zhurfond, 2023. – 159 p.

30. Basfar S., Mohamed A., Elkatatny S. Barite–Micromax mixture, an enhanced weighting agent for the elimination of barite sag in invert emulsion drilling fluids. // *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, Springer, 2020, Vol. 10(6), p. 2427–2435.

31. Berthonneau J. et al. Crystal-chemistry control of the mechanical properties of 2:1 clay minerals. // *Appl. Clay Sci.*, Elsevier, 2017, Vol. 143, p. 387–398.

32. Bridges S., Robinson L.H. A practical handbook for drilling fluids processing. // Gulf Professional, 2020.

33. Cayeux E., Leulseged A. Modelling of Drilling Fluid Thixotropy. // OMAE2018, ASME, 2018.

34. De Oliveira C.R.S. et al. Synthesis of superacid sulfated TiO<sub>2</sub> prepared by sol-gel method and its use as a titania precursor in obtaining a kaolinite/TiO<sub>2</sub> nano-hybrid composite. // *Powder Technol.*, Elsevier, 2021, Vol. 381, p. 366–380.

35. Jain R. et al. Study the effect of synthesized graft copolymer on the inhibitive water-based drilling fluid system. // *Egyptian Journal of Petroleum*, Elsevier, 2017, Vol. 26(4), p. 875–883.

36. Karpiński B., Szkodo M. Clay Minerals – Mineralogy and Phenomenon of Clay Swelling in Oil & Gas Industry. // *Advances in Materials Science*, Walter de Gruyter GmbH, 2015, Vol. 15(1), p. 37–55.

37. Krishnan S., Abyat Z., Chok C. Characterization of boron-based nanomaterial enhanced additive in water-based drilling fluids. – 2016.

38. Li M.C. et al. pH-Responsive water-based drilling fluids containing bentonite and chitin nanocrystals. // *ACS Sustain. Chem. Eng.*, ACS, 2018, Vol. 6(3), p. 3783–3795.

39. Mao H. et al. Hydrophobic associated polymer-based silica nanoparticles composite with core–shell structure as a filtrate reducer for drilling fluid at ultra-high temperature. // *J. Pet. Sci. Eng.*, Elsevier, 2015, Vol. 129, p. 1–14.

40. Mao H. et al. Novel hydrophobic associated polymer-based nano-silica

composite with core–shell structure for intelligent drilling fluid under ultra-high temperature and ultra-high pressure. // *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int.*, Elsevier, 2015, Vol. 25(1), p. 90–93.

41. Pakdaman E. et al. Improving rheology, lubricity, and differential sticking properties of water-based drilling muds at high temperatures using hydrophilic Gilsonite nanoparticles. // *Colloids Surf. A*, Elsevier, 2019, Vol. 582, p.

42. Perumalsamy J., Gupta P., Sangwai J.S. Performance evaluation of esters and graphene nanoparticles as additives on the rheological and lubrication properties of water-based drilling mud. // *J. Pet. Sci. Eng.*, Elsevier, 2021, Vol. 204, p. 108680.

43. Rafati R. et al. Effect of nanoparticles on the modifications of drilling fluids properties: A review of recent advances. // *J. Pet. Sci. Eng.*, Elsevier, 2018, Vol. 161, p. 61–76.

44. Sajjadian M., Sajjadian V.A., Rashidi A. Experimental evaluation of nanomaterials to improve drilling fluid properties of water-based muds HP/HT applications. // *J. Pet. Sci. Eng.*, Elsevier, 2020, Vol. 190, p. 107006.

45. Słomka-Słupik B. Self-Immobilizing Metals Binder for Construction Made of Activated Metallurgical Slag, Slag from Lignite Coal Combustion and Ash from Biomass Combustion. // *Materials*, 2021, Vol. 39. DOI: 10.3390/ma14113101.

46. Stanić V., Tanasković S.B. Antibacterial activity of metal oxide nanoparticles. // *Nanotoxicity*, Elsevier, 2020, p. 241–274.

47. Yuda A.P. et al. Advances of the top-down synthesis approach for high-performance silicon anodes in Li-ion batteries. // *J. Mater. Chem. A*, Royal Society of Chemistry, 2021, Vol. 9, №35.