

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

Гарант освітньої програми  
Харченко М.О.

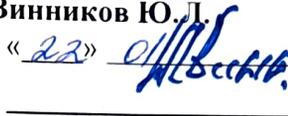
« 22 » \_\_\_\_\_ 2026 року



ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри буріння та геології  
Винников Ю.Л.

« 22 » \_\_\_\_\_ 2026 року



**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на тему Оптимізація систем бурових розчинів із застосуванням наноматеріалів

**Пояснювальна записка**

**Керівник**

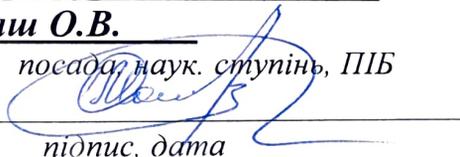
к.т.н., доцент

кафедри буріння та геології

Матяш О.В.

посада, наук. ступінь, ПІБ

підпис, дата



**Виконавець роботи**

студент група 601-НБ

Руденко Павло Сергійович

студент, ПІБ

підпис, дата

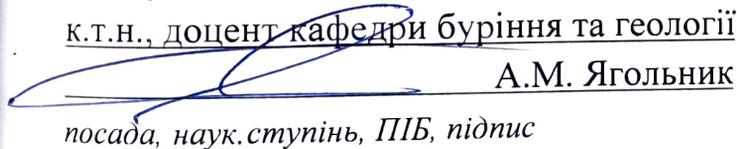


**Консультант за 1 розділом**

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

А.М. Ягольник

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

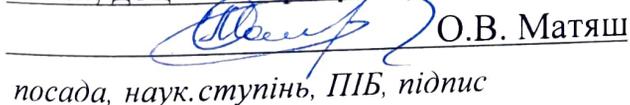


**Консультант за 2 розділом**

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

О.В. Матяш

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

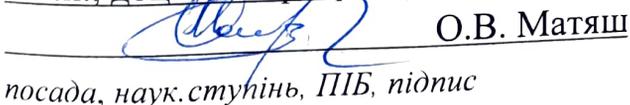


**Консультант за 3 розділом**

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

О.В. Матяш

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис



Дата захисту 23.01.2026 р.

Полтава, 2026

Навчально-науковий інститут:  
Кафедра:  
Освітньо-кваліфікаційний рівень:  
Спеціальність:  
Освітня програма:

Нафти і газу  
Буріння та геології  
Магістр  
185 Нафтогазова інженерія та технологій  
Буріння нафтових і газових свердловин

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри буріння та геології  
Винников Ю.Л.

« 3 » 09 2015 року

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

Руденко Павло Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація систем бурових розчинів із застосуванням наноматеріалів

2. Керівник роботи доц. кафедри буріння та геології, доц., к.т.н. Матяш О.В

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

затверджені наказом вищого навч. закладу від « 3 » 09 2015 року № 115-ра

3. Строк подання студентом роботи 13.09.2016р

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 завдання видав	Дата видачі
1	К.Т.Н., доц. Яковенко А.М.		
2	К.Т.Н., доц. Матієм О.В.		
3	К.Т.Н., доц. Матієм О.В.		

8. Дата видачі завдання 3.09.2025 р

**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

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	3
ANOTATION .....	4
ВИЗНАЧЕННЯ, ПОЗНАЧЕННЯ, СКОРОЧЕННЯ.....	5
ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ.....	6
ВСТУП.....	8
INTRODUCTION.....	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	13
1.1 Концепція наночастинок, фізико-хімічні властивості і їх типи.....	13
1.2 Методи отримання наноматеріалів .....	16
1.3 Застосування наночастинок в нафтогазовій галузі.....	22
1.4 Наночастки в системах бурових розчинів.....	24
1.4 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження.....	33
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПРАКТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАНОЧАСТИНОК.....	35
2.1 Дослідження впливу введення наночастинок на реологічні властивості бурових розчинів .....	35
2.2 Дослідження впливу колоїдних систем з наночастинками на фільтраційні характеристики тріщин.....	46
2.3 Основні висновки експериментального застосування наночастинок .....	51
2.4 Висновки до розділу 2 .....	53
РОЗДІЛ 3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ У НАПРЯМІ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ .....	54
3.1 Удосконалення технологій виробництва наночастинок для бурових розчинів .....	54
3.2 Економічні та екологічні переваги використання наночастинок.....	57
3.3 Перспективи впровадження технологій застосування наночастинок .....	61
3.4 Висновки до розділу 3 .....	66
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	67
GENERAL CONCLUSIONS ON THE WORK .....	69

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71
---------------------------------	----

## АНОТАЦІЯ

Руденко П.С. Оптимізація систем бурових розчинів із застосуванням наноматеріалів. Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава; Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – 2026.

Роботу присвячено вирішенню актуальної науково-технічної задачі, пов'язаної з підвищенням ефективності процесу буріння свердловин шляхом оптимізації технологічних властивостей бурових розчинів із використанням наноматеріалів.

У Розділі 1 проведено аналітичний огляд літературних джерел. Проаналізовано концепцію, фізико-хімічні властивості та типи наночастинок, розглянуто основні методи отримання наноматеріалів. Досліджено світовий досвід застосування наночастинок у нафтогазовій галузі, з особливим акцентом на їхньому впливі на функціональні параметри систем бурових розчинів.

У Розділі 2 виконано аналіз практичних та експериментальних досліджень. Детально вивчено вплив введення різних типів наночастинок на реологічні та фільтраційні властивості бурових розчинів. Проаналізовано дію колоїдних систем з наночастинками на фільтраційні характеристики, зокрема в умовах тріщинуватих колекторів, та узагальнено ключові висновки з експериментального застосування наноматеріалів.

У Розділі 3 окреслено перспективи розвитку технологій бурових розчинів у напрямі створення "інтелектуальних" систем на основі наноконпонентів. Розглянуто шляхи удосконалення технологій виробництва наночастинок, оцінено економічні та екологічні переваги їхнього використання. Обґрунтовано перспективи впровадження нанотехнологій у промислове буріння.

**Ключові слова:** буріння, свердловина, бурові розчини, оптимізація, наноматериали, наночастинки, реологія, фільтрація, інтелектуальні системи.

## ANOTATION

Rudenko P.S. Optimization of drilling fluid systems using nanomaterials. 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 improving the efficiency of the well drilling process by optimizing the technological properties of drilling fluids using nanomaterials.

Chapter 1 provides an analytical review of the literature. The concept, physicochemical properties, and types of nanoparticles are analyzed, and the main methods of obtaining nanomaterials are considered. The global experience of using nanoparticles in the oil and gas industry is studied, with a particular focus on their impact on the functional parameters of drilling fluid systems.

Chapter 2 analyzes practical and experimental studies. The effect of introducing different types of nanoparticles on the rheological and filtration properties of drilling fluids is studied in detail. The effect of colloidal systems with nanoparticles on filtration characteristics, particularly in fractured reservoirs, is analyzed, and key conclusions from the experimental application of nanomaterials are summarized.

Chapter 3 outlines the prospects for the development of drilling fluid technologies in the direction of creating “intelligent” systems based on nanocomponents. Ways to improve nanoparticle production technologies are considered, and the economic and environmental benefits of their use are assessed. The prospects for the introduction of nanotechnologies in industrial drilling are substantiated.

**Keywords:** drilling, well, drilling fluids, optimization, nanomaterials, nanoparticles, rheology, filtration, intelligent systems.

## ВИЗНАЧЕННЯ, ПОЗНАЧЕННЯ, СКОРОЧЕННЯ

**ВМР** – вишково-монтажні роботи;

**ГРП** – гідророзрив пласта;

**ДНС** – динамічна напруга зсуву;

**мкм** – мікромметр ( $10^{-6}$  м);

**нм** – наномметр ( $10^{-9}$  м);

**ПАР** – поверхнево-активні речовини;

**ПВ** – пластична в'язкість;

**СНС** – статична напруга зсуву;

**СПО** – спуско-підймальні операції;

**ЕСН** – емульсійна система з наночастинками;

**ЕСС** – емульсійно-суспензійна система з наночастинками;

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – оксид алюмінію;

**Ar** – аргон;

**C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O** – дитиоефір;

**C<sub>8</sub>H<sub>12</sub>N<sub>4</sub>** – азобісізобутиронітрил;

**CuO** – оксид міді;

**CuO<sub>2</sub>** – діоксид міді;

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – оксид заліза;

**He** – гелій;

**KCl** – хлорид калію;

**KOH** – гідроксид калію;

**MgO** – оксид магнію;

**NaCl** – хлорид натрію;

**NaOH** – гідроксид натрію;

**SiO<sub>2</sub>** – діоксид кремнію;

**TiO<sub>2</sub>** – діоксид титану;

**ZnO** – оксид цинку.

## ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

**Акватермоліз** – процес високотемпературної конверсії нафти під дією водяної пари.

**Амфіфільність (речовини)** – властивість речовини одночасно відштовхувати воду (гідрофобність) і взаємодіяти з нею (гідрофільність).

**Вакуум** – простір, вільний від речовини.

**Десульфуратія** – фізико-хімічний процес, що сприяє видаленню сірки.

**Диспергатор** – спеціальний пристрій, який подрібнює різні речовини та перемішує їх до однорідної маси.

**Гідратація** – приєднання молекул води до молекул або йонів речовини.

**Інгибування** – зниження поверхневої активності речовини або уповільнення хімічних процесів.

**Інертна атмосфера** – середовище, заповнене інертним газом, без вмісту кисню та вуглекислого газу.

**Іонна бомбардування** – взаємодія поверхні твердого тіла з направленим потоком йонів.

**Колоїд** – система, у якій одне речовинне середовище містить мікроскопічно дисперговані нерозчинні частинки, зважені в іншому середовищі.

**Конверсія** – процес перетворення або обробки газів з метою зміни складу вихідної газової суміші.

**Лазерна абляція** – метод видалення речовини з поверхні за допомогою лазерного імпульсу.

**Наноккомпозит** – багатофазний твердий матеріал, у якому одна з фаз має один, два або три розміри менше 100 нм, або структуру з нанорозмірними відстанями між фазами.

**Наноемульсія** – рідина, що містить частинки або агломерати частинок із характерним розміром до 100 нм.

**Наномембрана** – напівпроникний матеріал, який фільтрує речовини, пропускаючи молекули або йони певного розміру.

**Органоглина** – спеціальний продукт, отриманий обробкою бентонітової глини амонієвими сполуками для надання їй здатності взаємодіяти з органічними розчинниками.

**Ексфоліативний матеріал** – матеріал із малою кількістю шарів (тонкошаровий наноматеріал, наприклад графен).

**Евапорація** – фізико-хімічний метод очищення або концентрування речовин за допомогою випаровування водяною парою.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Буріння нафтових і газових свердловин в сучасних умовах характеризується постійним ускладненням гірничо-геологічних умов, зокрема збільшенням глибин, бурінням у породах зі складними колекторськими властивостями, а також роботою в зонах аномально високих температур і тисків (АВТ і АВП). За цих обставин, стандартні системи бурових розчинів часто не здатні повною мірою забезпечити технологічну ефективність, безаварійність та екологічну безпеку процесу.

Ключові проблеми включають високі фільтраційні втрати (водовіддачу) у проникні пласти, недостатні реологічні та змашувальні властивості, що призводять до ускладнень (зокрема, диференціального прихвату), зниження механічної швидкості буріння через високе тертя, а також термічну деградацію компонентів розчину при температурах понад 150°C.

Вирішення цих проблем лежить у площині застосування новітніх технологій, серед яких ключове місце займають нанотехнології. Як підтверджує аналіз, наноматеріали, завдяки унікальним властивостям (квантові ефекти, величезна площа поверхні), здатні кардинально покращити ключові параметри бурових розчинів: знизити фільтраційні втрати на 40-60%, підвищити термостабільність до 170-200°C, та оптимізувати реологію (збільшення міцності гелю до 67%).

Тому, оптимізація систем бурових розчинів шляхом науково обґрунтованого застосування наноматеріалів є надзвичайно актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої спрямоване на підвищення технологічної та економічної ефективності буріння свердловин у складних умовах.

**Мета роботи** – підвищення технологічної та економічної ефективності процесу буріння свердловин шляхом наукового обґрунтування та оптимізації складу бурових розчинів із цільовим застосуванням наноматеріалів.

**Основні завдання дослідження:**

1. Провести аналітичний огляд літературних джерел для систематизації даних про фізико-хімічні властивості наночастинок, методи їх отримання світовий досвід їх застосування у нафтогазовій галузі, зокрема у системах бурових розчинів.

2. Узагальнити результати практичних та експериментальних досліджень щодо впливу різних типів наночастинок на реологічні, фільтраційні, змащувальні та теплофізичні властивості бурових розчинів.

3. Встановити ефективні концентрації та синергетичні ефекти від застосування наноконпонентів для цільового покращення властивостей: підвищення міцності гелю, зниження фільтрації та зменшення коефіцієнту терт.

4. Дослідити ефективність спеціалізованих колоїдних систем з наночастинками для вирішення проблеми поглинань у тріщинуватих колекторах.

5. Оцінити економічні та екологічні переваги впровадження нанотехнологій у процеси буріння та визначити перспективи розвитку "інтелектуальних" систем бурових розчинів.

**Об'єкт дослідження** – процес впливу наноматеріалів на технологічні властивості систем бурових розчинів.

**Предмет дослідження** – вплив наноматеріалів на реологічні, фільтраційні та змащувальні характеристики бурових розчинів з метою їх оптимізації..

**Наукова новизна роботи:** систематизовано дані щодо впливу різних типів наночастинок (оксиди металів, вуглецеві матеріали) на властивості бурових розчинів, що дозволило кількісно узагальнити їх специфічні ефекти: підвищення міцності гелю (MgO), зниження крутного моменту (графен) та ризику прихвату (HGN).

**Практичне значення роботи** – обґрунтовано рекомендації щодо застосування оптимізованих складів бурових розчинів з нанодобавками для покращення техніко-економічних показників буріння.

**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 75 сторінках, у тому числі 72 сторінках основного тексту, 18 рисунків, 12 таблиць, 3 сторінок списку використаних джерел.

## INTRODUCTION

**Relevance of the topic.** Drilling oil and gas wells in modern conditions is characterized by constantly increasing geological complexity, including greater depths, drilling in rocks with complex reservoir properties, and working in areas with abnormally high temperatures and pressures (AHT and AHT). Under these circumstances, standard drilling fluid systems are often unable to fully ensure the technological efficiency, reliability, and environmental safety of the process.

Key problems include high filtration losses (water loss) in permeable formations, insufficient rheological and lubricating properties, leading to complications (in particular, differential sticking), a decrease in mechanical drilling speed due to high friction, as well as thermal degradation of drilling fluid components at temperatures above 150°C.

The solution to these problems lies in the application of the latest technologies, among which nanotechnologies play a key role. As confirmed by analysis, nanomaterials, thanks to their unique properties (quantum effects, huge surface area), are capable of radically improving the key parameters of drilling fluids: reducing filtration losses by 40-60%, increase thermal stability to 170-200°C, and optimize rheology (increasing gel strength by up to 67%).

Therefore, the optimization of drilling fluid systems through the scientifically based use of nanomaterials is an extremely important scientific and technical task, the solution of which is aimed at improving the technological and economic efficiency of drilling wells in difficult conditions.

**The aim of the work** is to increase the technological and economic efficiency of the well drilling process through scientific justification and optimization of the composition of drilling fluids with the targeted use of nanomaterials.

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

1. To conduct an analytical review of the literature to systematize data on the physicochemical properties of nanoparticles, methods of their production, and global experience in their application in the oil and gas industry, in particular in drilling fluid

systems.

2. To summarize the results of practical and experimental studies on the effect of different types of nanoparticles on the rheological, filtration, lubricating, and thermophysical properties of drilling fluids.

3. Establish effective concentrations and synergistic effects from the use of nanocomponents for targeted improvement of properties: increasing gel strength, reducing filtration, and decreasing the friction coefficient.

4. Investigate the effectiveness of specialized colloidal systems with nanoparticles to solve the problem of absorption in fractured reservoirs.

5. Assess the economic and environmental benefits of introducing nanotechnologies into drilling processes and determine the prospects for the development of “intelligent” drilling fluid systems.

**The object of the study** is the process of the influence of nanomaterials on the technological properties of drilling fluid systems.

**The subject of the study** is the influence of nanomaterials on the rheological, filtration, and lubricating characteristics of drilling fluids with the aim of their optimization.

**Scientific novelty of the work:** data on the influence of various types of nanoparticles (metal oxides, carbon materials) on the properties of drilling fluids have been systematized, which made it possible to quantitatively summarize their specific effects: increased gel strength (MgO), reduced torque (graphene), and reduced risk of sticking (HGN).

**The practical significance of the work** is that it provides recommendations for the use of optimized drilling fluid compositions with nanoadditives to improve the technical and economic performance of drilling.

**Structure and scope of work.** The master's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references. The work is presented on pages, including pages of main text, figures, tables, and pages of the list of references.

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

## 1.1 Концепція наночастинок, фізико-хімічні властивості і їх типи

Наночастинки мають унікальні властивості, що істотно відрізняються від властивостей їхніх макроскопічних аналогів. Розмір наночастинок наближається до характеристичних розмірів молекул, атомів та іонів, що зумовлює зміну їхніх фізичних та хімічних властивостей [15, 25, 46].

Однією з найбільш значущих властивостей наночастинок є поверхневий ефект. Оскільки площа поверхні наночастинок пропорційно збільшується зі зменшенням їхніх розмірів, значна частина атомів та молекул знаходиться саме на поверхні. Це призводить до змін у їхній електронній структурі та поведінці, роблячи наночастки більш активними з хімічної, фізичної та каталітичної точок зору [39].

У роботі [39] зазначено, що оптичні властивості наночастинок також є важливими і залежать від їхнього розміру та форми. Маленькі наночастинки можуть володіти плазмонними резонансами, що зумовлює поглинання та розсіювання світла залежно від довжини хвилі та конфігурації. Це дозволяє використовувати наночастинки в оптичних програмах, таких як сенсори, лазери, фотоніка та оптичні покриття.

Механічні властивості наночастинок також змінюються порівняно з їхніми макроскопічними аналогами [39]. Малі розміри наночастинок спричиняють велику поверхневу енергію та високу деформацію. Це робить їх привабливими для використання у посилених матеріалах, таких як композити, де вони можуть покращити міцність і стійкість до руйнування. З іншого боку, властивості наночастинок можуть бути змінені за допомогою контрольованої модифікації їхнього складу, форми, розміру і поверхні [39]. Синтез і функціоналізація наночастинок дають змогу створювати матеріали з бажаними властивостями для різних застосувань, таких як каталіз, сенсорика, медицина та енергетика.

Загалом, наночастинки представляють унікальний клас матеріалів із широким спектром властивостей та потенціалом для інновацій у різних галузях науки та технологій. Розуміння та контроль їхніх властивостей відіграють важливу роль у розробці нових матеріалів та покращенні існуючих технологій.

Класифікація наночастинок за формою є одним із важливих аспектів дослідження наноматеріалів [45]. Форма наночастинок відіграє істотну роль у їхніх фізичних, хімічних та оптичних властивостях, а також впливає на їхнє застосування в різних областях, включаючи бурові розчини.

– Сферичні наночастинки (3D-наночастинки). Сферичні наночастинки мають форму ідеальної сфери. Їхня геометрична форма забезпечує високу симетрію, що робить їх стабільними та зручними у використанні. Сферичні наночастинки мають рівномірний розподіл навантаження і відмінну дисперсію в розчинах, що сприяє покращенню властивостей бурових розчинів, таких як стійкість та реологічні характеристики [21, 46].

– Пластинчасті наночастинки (2D-наночастинки). Пластинчасті наночастинки мають форму плоских пластин або пелюсток. Їхньою характерною особливістю є значна відмінність у довжині та ширині порівняно з товщиною. Пластинчасті наночастинки мають велику поверхню і можуть забезпечувати покращені властивості в бурових розчинах, такі як адсорбційна ємність та адгезія [38].

– Поліедральні наночастинки (3D-наночастинки). Поліедральні наночастинки мають багатогранну форму, що складається з плоских граней. Їхня форма може бути різноманітною, включаючи куби, призми, октаедри та додекаедри. Поліедральні наночастинки мають унікальні оптичні, каталітичні та плазмонні властивості, що робить їх привабливими для застосування у бурових розчинах з метою посилення оптичних та реакційних процесів [25].

– Трубочасті наночастинки (Вуглецеві нанотрубки). Трубочасті наночастинки є структурою у формі трубок або нанотрубок. Трубочасті наночастинки мають унікальні електричні та механічні властивості, їх

застосування в бурових розчинах може поліпшити електропровідність і механічну міцність розчину [38].

– Дендрімери (1D-наночастинки). Дендрімери являють собою розгалужені структури. Дендрімери мають унікальні властивості, такі як висока функціональність, регульована розчинність і розмір, що робить їх застосовними у бурових розчинах для управління реологічними властивостями, структурної модифікації та збільшення стабільності розчину [17].

– Наночастинки нульової розмірності (0D-наночастинки). Такі наночастинки є окремими молекулами або кластерами, не пов'язаними між собою. Такі структури мають високу розчинність та реакційну здатність, внаслідок великої вільної поверхні, здатної зв'язуватися з іншими компонентами бурового розчину [40].

Крім перерахованих вище форм, існують й інші різноманітні форми наночастинок, такі як усічені піраміди, зіркоподібні структури, гібридні наночастинки тощо. Кожна з цих форм має свої унікальні властивості, які можуть бути застосовні в бурових розчинах для досягнення певних цілей і задач.

Класифікація наночастинок за формою надає дослідникам та інженерам широкий спектр інструментів для дизайну і оптимізації наноматеріалів у контексті бурових розчинів. Різноманітність форм наночастинок відкриває можливості для покращення ефективності, стабільності, дисперсності та інших характеристик бурових розчинів, що, своєю чергою, сприяє підвищенню ефективності та безпеки бурових операцій. Загальна класифікація наночастинок за формою представлена на рисунку 1.1 [45].

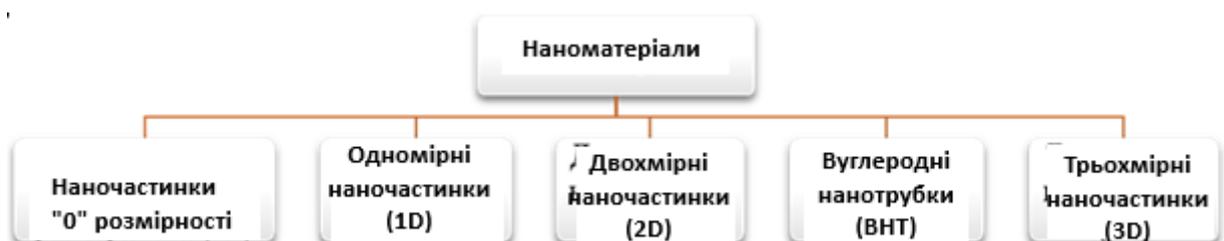


Рисунок 1.1 - Класифікація наночастинок по формі

## 1.2 Методи отримання наноматеріалів

Отримання наночастинок та наноматеріалів відбувається за допомогою трьох основних груп методів: рідиннофазних, газофазних та твердофазних.

Використання рідиннофазних методів синтезу є поширеним підходом для одержання наночастинок та наноматеріалів. Один із найбільш відомих та широко застосовуваних методів – це золь-гель синтез. Цей метод включає розчинення прекурсорів матеріалів у рідкій фазі, за яким слідує гідроліз і полімеризація прекурсорів, утворюючи гелеподібну матрицю. Далі гель піддається термічній обробці для видалення органічних компонентів і одержання кінцевого продукту у вигляді наночастинок або наноматеріалів [29].

Осадження порошкоподібних матеріалів із розчинів також є поширеним методом для одержання наночастинок, особливо у разі оптичних матеріалів, таких як люмінофори [44]. У цьому методі розчини містять прекурсори, які піддаються хімічним реакціям, осаджуючись у вигляді наночастинок на підкладці або поверхні [44, 45]. Ілюстрацію процесу золь-гель синтезу представлено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Процес золь-гель синтезу

У джерелі [33] стверджується, що в останні роки розвивається рідинний полімерно-сольовий метод формування нанорозмірних оптичних покриттів різного хімічного складу. Цей метод включає розчинення полімерних

прекурсорів і солей у рідкому середовищі, де відбувається хімічна взаємодія між компонентами та утворення наночастинок або покриттів.

Таким чином, рідиннофазні методи синтезу, такі як золь-гель синтез, осадження з розчинів та рідинний полімерно-сольовий метод, надають ефективні способи отримання наночастинок та наноматеріалів різного хімічного складу, включаючи оптичні матеріали. Ці методи мають широкий спектр застосувань у різних галузях, включаючи оптику, електроніку, медицину та інші.

Простота та висока продуктивність є одними з головних переваг рідкофазних методів. Вони не вимагають складного технологічного обладнання та можуть бути реалізовані з використанням стандартних лабораторних умов [43, 44]. Це робить ці методи доступними та застосовними навіть для невеликих лабораторій чи промислових підприємств.

Технологічність та універсальність рідиннофазних методів є значними перевагами. Вони можуть бути застосовані для отримання різноманітних наноматеріалів і покриттів з різними хімічними складами. Це дозволяє керувати структурою та властивостями одержуваних матеріалів у широкому діапазоні.

Економічна привабливість рідкофазних методів пов'язана з їхньою відносно низькою вартістю та інвестиційною витратою. Вони не вимагають дорогого обладнання та спеціальних умов, що знижує витрати на їхнє впровадження та масштабування виробництва [44].

Таким чином, рідиннофазні методи синтезу, такі як золь-гель синтез, осадження з розчинів та рідинний полімерно-сольовий метод, надають ефективні способи отримання наночастинок та наноматеріалів різного хімічного складу, включаючи оптичні матеріали структури для застосування їх у бурових розчинах.

Газофазні методи отримання наноматеріалів є важливою дослідницькою областю в науці про наноматеріали. Вони є способами синтезу наночастинок і наноструктур з газової фази, при яких молекулярні або атомарні вихідні матеріали конвертуються у наномасштабні структури [42]. Ці методи широко

застосовуються у різних галузях, включаючи матеріалознавство, електроніку, каталіз, медицину та енергетику.

Один із основних газофазних методів отримання наноматеріалів – хімічне осадження з газової фази (CVD) [43]. У процесі хімічного осадження вихідні гази вводять у реакційну камеру, де під впливом тепла або плазми відбуваються хімічні реакції, що призводять до утворення наночастинок (рис. 1.3). Важливим аспектом даного методу є вибір вихідних газів, температури та тиску в реакційній камері, які визначають розмір, форму та склад одержуваних наноматеріалів [43, 45].

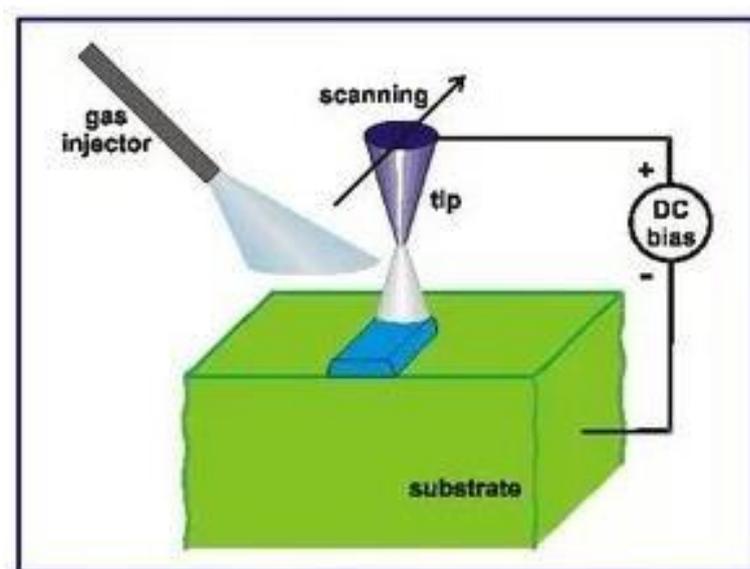


Рисунок 1.3 – Метод локального хімічного осадження наночастинок

Інший поширений газофазний метод – фізичне осадження з газової фази [42]. Виходячи з аналізу джерела [42], у цьому методі використовуються фізичні процеси, такі як евапорація або іонне бомбардування, для створення потоку атомів або молекул у газовій фазі. Ці атоми або молекули потім осідають на поверхні субстрату, утворюючи наночастинки. Методи фізичного осадження дозволяють отримувати наноматеріали з високою чистотою та контрольованими структурними властивостями.

У джерелах [45, 42] роз'яснено принцип роботи та особливості оснащення установок для фізичного осадження наночастинок з газової фази шляхом

імпульсного лазерного випаровування. Схему такої установки представлено на рисунку 1.4. Насамперед, камеру наповнюють інертним газом (Ne чи Ar) при тиску від 1 до 100 Па. Такі умови сприяють створенню стаціонарної конвекції між мішенню лазера і підкладкою, що охолоджується. Потім здійснюється лазерна абляція атомів імпульсним лазером, в результаті чого випаровується більше  $10^{14}$  речовини (при одиночному пострілі 10<sup>8</sup> речовини), які при зіткненні з атомами Ne швидко конденсуються. Лазерну абляцію широко використовують для отримання багатокомпонентних нанокристалічних матеріалів з розміром зерен до 50 нм.

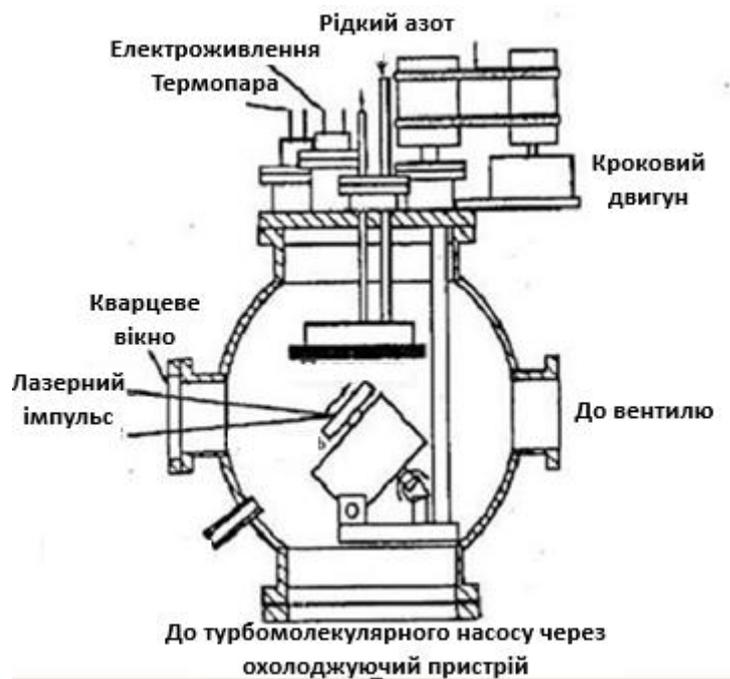


Рисунок 1.4 – Схема установки для фізичного осадження наночастинок.

Газофазні методи отримання наноматеріалів мають низку переваг. По-перше, вони дозволяють отримувати наночастинок з широким діапазоном розмірів та форм, що дає змогу контролювати їхні властивості та адаптувати для конкретних додатків. По-друге, ці методи забезпечують високу чистоту одержуваних наноматеріалів, що є важливим для їхнього подальшого використання у різних галузях. По-третє, газофазні методи мають високу

масштабованість, що дозволяє виробляти наноматеріали у великих кількостях [42].

Однак, газофазні методи також мають свої обмеження та складності. Вони вимагають спеціалізованого обладнання, контролю параметрів процесу та оптимізації умов реакції для досягнення бажаних властивостей наноматеріалів. Крім того, вибір газів-попередників та їхнє поєднання може впливати на структуру та властивості одержуваних наноматеріалів [42, 44].

У джерелі [44] представлена схема апарату для газофазного методу отримання нанопорошків металів на рисунку 1.5. Схема включає робочу камеру-1, барабан, що охолоджується, 2, скребок-3, воронку-4, приймальну ємність для порошку-5, нагрівний трубчастий реактор-6, пристрій для регульованої подачі випаровуваного матеріалу та несучого газу-7. У трубчастому реакторі 6 матеріал змішується з несучим інертним газом і переходить у газофазний стан.

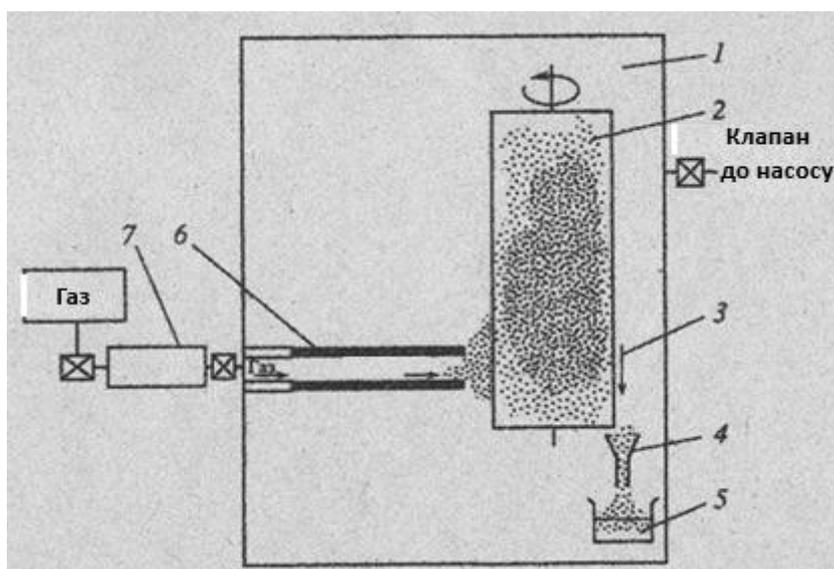


Рисунок 1.5 - Схема апарату для газофазного отримання нанопорошків металів

На завершення, газофазні методи отримання наноматеріалів є важливим інструментом для створення наночастинок та наноструктур з контрольованими властивостями. Вони широко застосовуються у наукових та промислових дослідженнях, а також у різних технологічних додатках. Подальші дослідження і розробки у цій області допоможуть розширити можливості та ефективність

газофазних методів отримання наноматеріалів та сприяти розвитку нових інноваційних технологій.

Твердофазні методи отримання наноматеріалів є широким класом технологій, що використовуються для синтезу наноструктур і наночастинок із твердого вихідного матеріалу. Ці методи відіграють важливу роль у різних галузях, включаючи матеріалознавство, електроніку, каталіз та медицину [44, 45]. Твердофазні методи дозволяють контролювати розміри, форму, структуру та властивості наноматеріалів, що робить їх затребуваними у сучасній науці та технології.

Один із основних твердофазних методів отримання наноматеріалів – механічна дрібна обробка. Цей метод ґрунтується на механічному подрібненні твердого матеріалу до нанорозмірів. Приклади таких методів включають кульове фрезерування, вібраційне фрезерування і планетарне кульове фрезерування. Механічна дрібна обробка дозволяє отримувати наночастинки з унікальними властивостями, такими як велика поверхня та підвищена активність [44, 45].

У джерелі [42] згадано інший поширений твердофазний метод – термічна обробка. У цьому методі матеріал піддається впливу високих температур, що призводить до фазових перетворень, зростання кристалів і формуванню наночастинок. Термічну обробку можна проводити в різних умовах, включаючи вакуум, інертну атмосферу або контрольовану атмосферу для отримання наноматеріалів із бажаними властивостями.

Ще одним важливим твердофазним методом є хімічне осадження із твердої фази [26]. У цьому методі вихідні хімічні реагенти перетворюються на наночастки в результаті хімічних реакцій у твердій фазі. Приклади включають методи гідролізу, гідротермального синтезу та осадження солей [26]. Хімічне осадження з твердої фази дозволяє отримувати наноматеріали з високою чистотою та контрольованими розмірами та формами.

Твердофазні методи одержання наноматеріалів мають низку переваг. Вони мають високу контрольованість над розмірами та формами наночастинок, а також над їхньою структурою та властивостями. Ці методи дозволяють

виробляти наноматеріали у великих кількостях та широкому діапазоні розмірів [31, 26]. Крім того, твердофазні методи є відносно простими та доступними з технологічної точки зору.

Однак, твердофазні методи також мають свої обмеження та складності. Вони можуть вимагати спеціального обладнання, контролю параметрів процесу та оптимізації умов реакції для досягнення бажаних властивостей наноматеріалів [42, 42, 26]. Крім того, вибір вихідного твердого матеріалу та спосіб його попередньої підготовки можуть впливати на якість та властивості одержуваних наночастинок.

На завершення, твердофазні методи отримання наноматеріалів є важливим інструментом для синтезу наноструктур і наночастинок з контрольованими властивостями. Ці методи дозволяють отримувати наноматеріали з різноманітними розмірами, формами та структурами, що робить їх корисними для різних додатків. Подальші дослідження та розробки в області твердофазних методів дозволять розширити межі та ефективність синтезу наноматеріалів та сприяти розвитку нових технологій та матеріалів майбутнього.

### **1.3 Застосування наночастинок в нафтогазовій галузі**

Застосування наночастинок у нафтогазовій галузі відкриває нові можливості та способи оптимізації процесів видобутку, обробки та транспортування нафти та газу. Наночастинки можуть бути використані в різних аспектах нафтогазової промисловості, їх застосування може призвести до покращення ефективності та економічної ефективності операцій.

Одним з важливих застосувань наночастинок є покращення буріння свердловин. Наночастинки можуть бути додані в бурові розчини з метою покращення їх реологічних властивостей, зниження тертя та зношування обладнання, а також поліпшення мастильних властивостей [18, 19]. Це дозволяє підвищити швидкість та ефективність буріння, а також знизити витрати на обслуговування та ремонт обладнання.

Ще одним застосуванням наночастинок у нафтогазовій галузі є покращення вилучення нафти з родовищ. Наночастинки можуть бути використані для створення спеціальних полімерних композитів, які застосовуються у методах збільшення нафтовіддачі, таких як полімерна флуїдна ін'єкція та гідродинамічний легування. Наночастинки допомагають поліпшити проникність та мобільність нафтових флюїдів, що призводить до більш ефективного вилучення нафти з пластів [39].

Також наночастинки можуть бути використані в процесах обробки нафти та газу. Наприклад, вони можуть служити каталізаторами для різних реакцій, таких як гідрування або окислення, що дозволяє поліпшити процеси очищення, десульфурації і конверсії нафти і газу. Наночастинки також можуть використовуватись для зниження в'язкості нафти, що покращує її транспортабельність та знижує енерговитрати на транспортування [40].

Ще одним перспективним напрямком застосування наночастинок у нафтогазовій галузі є створення сенсорних систем для моніторингу та контролю процесів. У джерелі [41] згадується, що наночастинки можуть бути інтегровані в сенсори для виявлення та вимірювання різних параметрів, таких як тиск, температура, склад та фізико-хімічні властивості нафти та газу. Це допомагає забезпечити більш точне та реактивне управління процесами у нафтогазовій промисловості.

Наночастинки також можуть бути використані для створення нових матеріалів та покриттів, що мають особливі властивості, такі як міцність, стійкість до корозії та теплова стабільність. Це сприяє підвищенню надійності та довговічності обладнання та інфраструктури у нафтогазовій галузі [17, 25, 32].

На закінчення, застосування наночастинок у нафтогазовій галузі надає нові можливості для оптимізації та покращення різних процесів. Вони можуть бути використані для покращення буріння, збільшення нафтовіддачі, обробки нафти та газу, створення сенсорних систем та розробки нових матеріалів. Застосування наночастинок сприяє більш ефективній і економічно ефективною роботі в нафтогазовій промисловості.

## 1.4 Наночастки в системах бурових розчинів

У нафтогазовій промисловості оптимізація бурових розчинів відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного та безпечного буріння свердловин. Існують різні методи і підходи до оптимізації бурових розчинів, які спрямовані на покращення їх властивостей та продуктивності. Нижче наведено основні параметри бурових розчинів, контроль яких більшою мірою забезпечує якісне будівництво свердловини.

Регулювання щільності розчину. Щільність бурового розчину має вирішальне значення для контролю тиску в свердловині для запобігання ГНВП та запобігання втраті циркуляції. Регулювання густини може бути досягнуто шляхом зміни концентрації солей або додавання щільних матеріалів, таких як барит чи графіт. Щільні матеріали, такі як барит ( $\text{BaSO}_4$ ), можуть бути додані до бурового розчину для збільшення його щільності [22].

Зважувальні агенти, такі як полімерні частинки, можуть бути додані в буровий розчин для досягнення необхідної густини. Ці агенти мають високою щільністю і можуть бути рівномірно розподілені в розчині, що дозволяє збільшити його густину [22].

Важливо, що вибір методу регулювання щільності бурового розчину залежить від конкретних умов буріння та вимог до густини. Оптимальний метод може бути визначений на основі аналізу геологічних даних, вимог щодо контролю тиску та інших факторів.

Правильне регулювання щільності бурового розчину відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та ефективності буріння свердловин. Ретельне планування і контроль щільності розчину допомагають запобігти втраті циркуляції, контролювати тиск і досягти успішних результатів у нафтогазовій галузі [43].

Контроль рН-значення. рН-значення бурового розчину впливає на розчинність мінералів, реакції з глиною та ефективність добавок. Зміна рН-значення може бути досягнута за допомогою лужних чи кислотних добавок [43].

Для підвищення рН-значення бурового розчину можна додати лужні реагенти, такі як NaOH або KOH. Ці добавки підвищують лужність розчину та можуть бути використані для нейтралізації кислотних компонентів або зниження кислотності в розчині.

Також можна використовувати буферні рідини, що містять суміш слабкої кислоти та її кон'югованої основи або слабкої основи та її кон'югованої кислоти. Вони здатні підтримувати стабільне рН значення розчину, запобігаючи його різким змінам при додаванні кислотних або лужних реагентів [42].

Коректне регулювання рН значення бурового розчину має кілька переваг. По-перше, оптимальне рН-значення сприяє розчинності мінералів і запобігає утворенню відкладень. По-друге, це допомагає ефективно використовувати добавки і реагенти, такі як полімери або мастильні матеріали, які можуть бути рН-чутливими. Крім того, правильне рН-значення сприяє захисту обладнання від корозії та підтримці його працездатності [42, 44].

Регулювання рН значення бурового розчину вимагає уважного моніторингу та розуміння хімічних процесів, що відбуваються під час буріння. Це дозволяє забезпечити безпеку, ефективність та успішне завершення операцій буріння свердловин у нафтогазовій галузі.

Інгібування глини. Глина є поширеною проблемою при бурінні свердловин, оскільки вона може призводити до звуження стін свердловини, прихоплення і втрати циркуляції. Використання інгібіторів глини дозволяє запобігти її гідратації та утворенню колоїдних частинок [43].

Поліпшення мастильних властивостей. Додавання змашувальних добавок, таких як полімери або олії, дозволяє знизити тертя між буровим інструментом і стінками свердловини, що покращує швидкість і ефективність буріння.

Полімерні інгібітори є ефективними речовинами для запобігання гідратації глини та їх розбухання. Вони утворюють захисну плівку на поверхні глини, запобігаючи її взаємодії з буровим розчином. Полімери також покращують стабільність глинистих шарів та запобігають їх руйнуванню [44].

Інгібітори іонного обміну взаємодіють з іонами глини, змінюючи їх

поверхневі властивості та запобігаючи їх адсорбції на частинках глини. Це знижує активність глин та зменшує їх вплив на властивості бурового розчину. Інгібітори іонного обміну також можуть покращувати стабільність та коагуляцію глинистих частинок.

Інгібування глин у буровому розчині є важливим аспектом процесу буріння свердловин. Це дозволяє знизити негативні наслідки взаємодії з глинистими шарами та забезпечити ефективність операцій буріння у нафтогазовій галузі.

Контроль піноутворення. Піна може бути утворена в процесі буріння та призводить до зменшення ефективності циркуляції та проникнення бурового розчину в пласт. Використання антипінних добавок дозволяє контролювати утворення піни та покращити продуктивність бурових операцій [42].

Диспергатори допомагають зруйнувати піну, розподіляючи її у вигляді найдрібніших бульбашок. Це дозволяє покращити поділ газу від рідини і запобігти утворенню пінистого шару. Диспергатори можуть бути додані в буровий розчин для покращення його стабільності та зниження піноутворення.

Деякі параметри буріння, такі як швидкість циркуляції розчину, тиск насоса та швидкість повороту бурового розчину можуть впливати на рівень піноутворення. Оптимізація цих параметрів може допомогти знизити ризик виникнення надлишкової піни та забезпечити більш ефективне буріння.

Використання добавок для покращення фільтрації. Добавки, такі як глиноутворюючі полімери або гідрофільні колоїди можуть поліпшити фільтрацію бурового розчину і запобігти втраті рідини в пласт [2, 42, 44].

Застосування наночастинок. Наночастинки мають унікальні властивості, які можна використовувати для оптимізації бурових розчинів. Вони можуть підвищити мастильні властивості, покращити фільтрацію, зменшити тертя та підвищити ефективність буріння [2, 3, 40].

Це лише деякі з існуючих методів оптимізації бурових розчинів. Комбінування різних підходів і добавок дозволяє досягти найкращих результатів в різних умовах буріння свердловин. Константне дослідження та розвиток у цій

галузі дозволяють покращувати процеси та вдосконалювати нафтогазову індустрію.

Застосовувані бурових розчинів наночастинки можна умовно розділити на 4 групи: наночастинки на основі полімерів, керамічні наночастинки, наночастинки металів, вуглецеві наночастинки [45].

Перша група наночастинок складається з синтетичних полімерів, і включає кілька прикладів їх застосування. Наприклад, застосування комбінації SiO<sub>2</sub>/акрилової смоли дозволяє покращити реологічні та теплові властивості бурових розчинів на водній основі. Використання нанополімерів кремнезему дозволяє змінювати змочування сланцевих формацій, що є важливим фактором на межі контакту фаз. Додавання ZnO-акриламідів впливає на межу плинності бурового розчину, його міцність гелю, мастильні, термічні та хімічні властивості. Також відзначається можливість запобігання закупорюванню пір глинистих сланцевих формацій та зниження їх набухання. На рисунку 1.6 представлена фотографія фільтраційної кірки бурового розчину з наночастинками полімерними [2, 45].

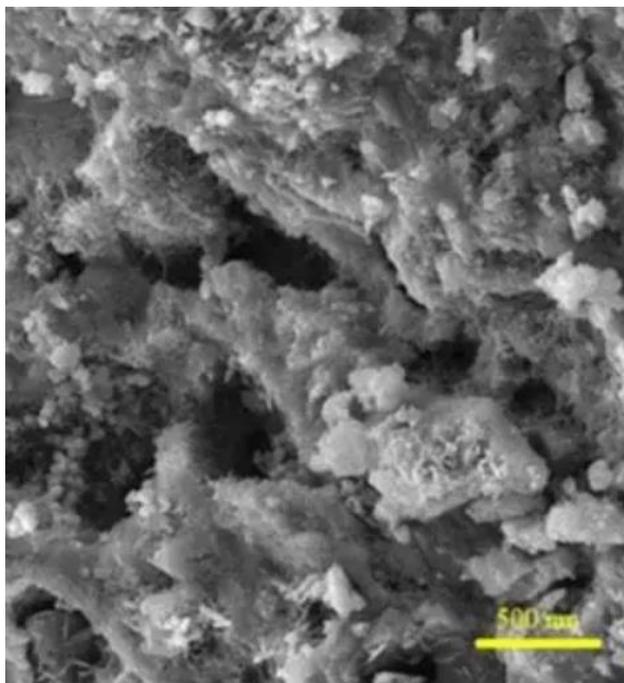


Рисунок 1.6 - Фільтраційна кірка бурового розчину з полімерними наночастинками під скануючим мікроскопом

Друга група наночастинок включає керамічні матеріали, такі як алюмосилікат магнію. Їх використання може значно скоротити споживання звичайних бурових розчинів, що є сприятливим для довкілля. Дослідження показали, що гідрофільні наночастинок кремнезему можуть зменшити утворення гідратів у буровому розчині, а застосування таких розчинів на водній основі знижує взаємодію з сланцевими формаціями [16]. Наночастинок ZnO можуть бути використані для видалення сірководню із бурових розчинів на водній основі. Застосування наночастинок TiO<sub>2</sub> сприяє зниженню межі плинності та пластичної в'язкості бурового розчину, тим самим збільшуючи міцність гелю. Глиняні наночастинок та наночастинок CuO<sub>2</sub> можуть покращити реологічні та термічні властивості бурового розчину. Вид наночастинок ZnO представлений рисунку 1.7 [45,46].

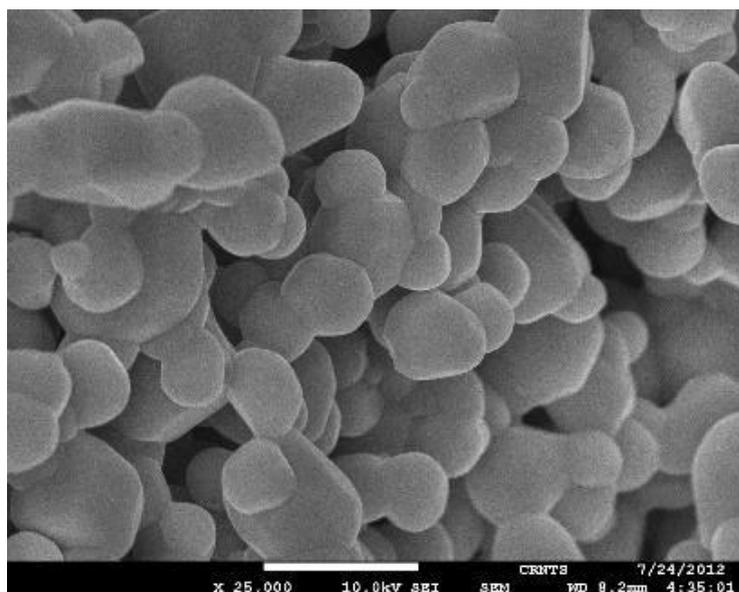


Рисунок 1.7 – Структура наночастинок ZnO під скануючим мікроскопом

Група наночастинок металів, третя по рахунку, має свої особливості.

Наприклад, додавання нітриду бору і наночастинок заліза в бурові розчини призводить до зниження коефіцієнтів механічного тертя бурового розчину. Наночастинок заліза, у свою чергу, здатні скоротити статичні втрати фільтрату бурового розчину та позитивно впливати на його в'язкі характеристики. Деякі дослідження вказують на можливість збільшення тиску гідророзриву більш ніж

на 60% при оптимальній концентрації наночастинок кальцію. Наночастки срібла можуть регулювати втрати фільтрату бурового розчину та знижувати межу плинності. На рисунку 1.8 представлена фотографія наночастинок  $\text{TiO}_2$  [15].

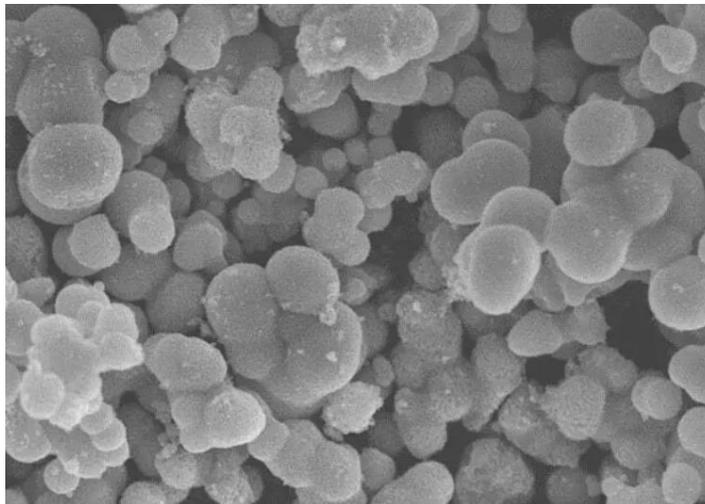


Рисунок 1.8 - Структура наночастинок  $\text{TiO}_2$  під скануючою мікроскопом

У четвертій групі присутні наночастинки вуглецю. Застосування наночастинок вуглецю дозволяє підтримувати однорідність бурового розчину протягом тривалого часу, а також контролювати його щільність та суттєво підвищити термічну стабільність. На особливу увагу заслуговує графен, який може бути використаний як фільтр в бурових розчинах на нафтовій основі. на рисунку 1.9 представлено фотографію структури графена [3, 5].

Останнім часом нанотехнології викликали широкий інтерес у нафтогазовій промисловості через їх широке застосування. Бурові розчини, що містять у своєму складі хоча б одне або кілька наночастинок, відомі як розчин з заданими властивостями або розумний розчин [7].

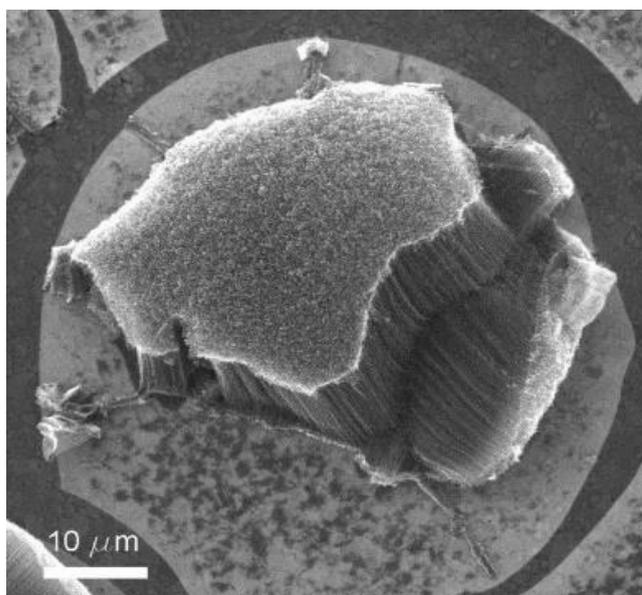


Рисунок 1.9 - Структура графена під скануючою мікроскопом

З швидким розвитком нанотехнологій нанотехнології поступово проникають у всі аспекти бурових розчинів, і вони відіграватимуть важливу роль у приготуванні нової системи бурових розчинів. По-перше, за допомогою наноматеріалів можуть бути синтезовані деякі нові добавки та системи бурових розчинів, здатні витримувати тепло та навантаження, що підвищують соле- та кальційстійкі властивості бурових розчинів, знижувати втрати рідини до пласта та підвищити міцність стовбура свердловини. [19, 17]. По-друге, наномембрана, сформована на поверхні бурового інструменту та стовбура свердловини, може запобігти прихвату при перепаді тиску і обвалення ствола свердловини [27, 29]. Підводячи результат, можна сказати, що застосування наноматеріалів в області бурових розчинів виявилось дуже корисним для підвищення стійкості стовбура свердловини, захисту пласта та збільшення видобутку нафти і газу. Це має велике значення для безпечного буріння, захисту навколишнього середовища і підвищення ефективності розвідки та видобутку нафти [28,19]. У найближчому майбутньому наноматеріали матимуть важливе прикладне значення та широкі перспективи у галузі приготування нових обробних агентів та систем бурових розчинів. Більше того, це зробить новий прорив в підвищенні ефективності буріння, а також принесе всебічну користь розвідці та розробці нафтових та газових родовищ [39].

Нанокмпозитні знижувачі фільтрації.  $C_4H_{10}O$  як агента передачі ланцюга і  $C_8H_{12}N_4$  як ініціатор амфифільний полістирол-блок-акриламід отримують методом ОПЦ-полімеризації [20]. У процесі приготування блок-полімеру додають органічний монтморилоніт для підвищення термостійкості. блок-полімерів, потім синтезують полістирол. Отриманий полімер успішно використовується в якості макроагента ОПЦ для ініціації полімеризації акриlamіду, та виходять амфифільні нанокмпозити. Нанометрові шари монтморилоніту рівномірно розподіляються в блоковій полімерній матриці, і утворюються ексfolіативні нанокмпозити. В результаті нанокмпозити демонструють кращу термостійкість у порівнянні із звичайними полімерами [20].

Наноемульсійне мастило для бурових розчинів. Синтез позитивно заряджених наноемульсій рідких парафінів, стабілізованих змішаними катіонно-неіоногенними ПАР, здійснюється одностадійним методом. Експериментальні результати показують, що дзета-потенціал крапель можна легко регулювати, змінюючи співвідношення катіонного та неіонного ПАР. Завдяки електростеричній стабілізації змішаних катіонно-неіоногенних ПАР отримані наноемульсії демонструють чудову довготривалу стабільність, а розміри їх крапель практично не збільшуються протягом півроку [35]. Тим часом, ця емульсія має властивості інгібування і гарну змащувальну здатність. При концентрації наноемульсій більше 0,5% про. вони демонструють більше сильне інгібування по порівнянні з 7% про. КСІ. З збільшенням змісту емульсії її інгібування набування глини зростатиме, переважно з допомогою абсорбції наноемульсій лежить на поверхні глини з деякими позитивно зарядженими шарами потенційної енергії [40, 25].

Нанометрова органоглина. Створено новий тип бентонітових нанометрових композитів на основі інтеркалового методу. Бентонітові композити синтезуються з використанням органічних катіонних солей як інтеркалюючий агент для бентоніту натрію. Це показує, що інтеркалірований агент проник у кристалітні шари бентоніту, що збільшить міжшарове простір, в

результаті чого пластинка бентоніту стане меншою і пухкою [42, 25].

Органоглина додається в бурові розчини та перевіряється здатність знижувати фільтраційні втрати та підвищувати в'язкість. Експериментальні результати показують, що нанометрові бентонітові композити мають дуже хороші характеристики у зниженні втрат при фільтрації і є хорошим підсилювачем в'язкості. Крім того, органоглина також добре сумісна з буровими розчинами. Бурові розчини на основі органоглін успішно застосовувалися при бурінні понад 5 свердловин на нафтовому родовищі Цинхай. Польове застосування показує, що була отримана очевидна економічна і соціальна вигода [20].

Нанокаталізатори, репрезентують собою нанорозмірні частинки металу, можуть використовуватися в процесі акватермолізу в колекторах з важкої нафти. При закачуванні пари в колектори відбуваються хімічні реакції між парою та нафтою, спрямовані на розрив сірковуглецевого зв'язку в асфальтенах [32].

Метою реакцій акватермолізу є збільшення кількості граничних вуглеводнів та ароматичних сполук у нафті, що призводить до облагородження високов'язкої нафти у пластових умовах. Нанокаталізатори, такі як нікель та залізо, можуть діяти як каталізатори для цих реакцій, прискорюючи їх перебіг [22].

Внаслідок акватермолізу відбувається незворотне зниження в'язкості важкої нафти. Використання нанокаталізаторів дозволяє ефективніше проводити реакції акватермолізу, покращуючи процес розриву сірковуглецевого зв'язку та підвищуючи якість і потокоподатливість нафти [32].

Важливо відзначити, що для конкретних умов і типів нафти можуть При оптимальних металевих каталізаторах дослідження проводяться для визначення найбільш ефективних і економічно вигідних варіантів нанокаталізаторів для застосування в процесі акватермолізу.

Стабілізація емульсії наночастинками забезпечує високу в'язкість, що може бути корисним при управлінні співвідношенням рухливостей під час заводнення. На відміну від стабілізації полімерами, які мають більший розмір і

сильно затримуються в колекторі, наночастки утворюють маленькі крапельки емульсії, здатні проходити через звичайні пори та фільтруватися через колектор без значної затримки. Стабільність емульсії забезпечується незворотною адсорбцією наночастинок на поверхні крапель емульсії. Це дозволяє зберігати стабільність емульсії навіть за суворих умов у пласті [33, 34]. Застосування емульсій стабілізованих наночастинок має потенціал у різних галузях, включаючи нафтову промисловість, для поліпшення видобутку нафти, ефективного витіснення високов'язкої нафти та управління потоком в пласті.

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

1. Аналіз літератури підтверджує, що унікальні властивості наночастинок, такі як значний поверхневий ефект, плазмонні резонанси та підвищена механічна міцність, зумовлені їх нанорозмірністю та квантовими ефектами, що виникають при розмірах менше 100 нм. Класифікація за формою (0D, 1D, 2D, 3D) визначає їх функціональність: сферичні частинки забезпечують стабільність розчинів, пластинчасті – підвищену адгезію, а трубчасті – механічне армування.

2. Вибір технології визначається компромісом між чистотою, вартістю та масовістю виробництва. Рідиннофазні методи (наприклад, золь-гель) є найбільш доступними та універсальними, тоді як газофазні (CVD, лазерна абляція) дозволяють отримувати наночастинки високої чистоти з розміром зерен до 5-50 нм, але вимагають складного обладнання. Твердофазні методи (механохімічне подрібнення) є економічно вигідними для масового виробництва, але часто дають менш однорідний продукт.

3. Застосування наночастинок дозволяє суттєво покращити ефективність буріння за рахунок зниження тертя та зносу обладнання, підвищити нафтовіддачу пластів на 15-25% через поліпшення мобільності флюїдів, а також створити високочутливі сенсорні системи для моніторингу параметрів свердловин. Крім того, наночастинки використовуються як каталізатори для

інтенсифікації процесів обробки нафти та газу, що робить їх ключовим елементом технологічного розвитку галузі.

4. Наночастинки полімерів, кераміки, металів та вуглецю покращують реологічні властивості (підвищують пластичну в'язкість на 20-30%), знижують фільтраційні втрати на 40-60% та підвищують термостабільність розчинів до 150-200°C. Особливу перспективу представляють інтелектуальні наноемульсії та нанокompозити, здатні адаптивно змінювати властивості в залежності від умов буріння, що забезпечує підвищення безпеки та економічної ефективності бурових операцій на 25-30%.

**Мета роботи** – підвищення технологічної та економічної ефективності процесу буріння свердловин шляхом наукового обґрунтування та оптимізації складу бурових розчинів із цільовим застосуванням наноматеріалів.

**Основні завдання дослідження:**

- Провести аналітичний огляд літературних джерел для систематизації даних про фізико-хімічні властивості наночастинок, методи їх отримання світовий досвід їх застосування у нафтогазовій галузі, зокрема у системах бурових розчинів.

- Узагальнити результати практичних та експериментальних досліджень щодо впливу різних типів наночастинок на реологічні, фільтраційні, змащувальні та теплофізичні властивості бурових розчинів.

- Встановити ефективні концентрації та синергетичні ефекти від застосування нанокompонентів для цільового покращення властивостей: підвищення міцності гелю, зниження фільтрації та зменшення коефіцієнту терт.

- Дослідити ефективність спеціалізованих колоїдних систем з наночастинками для вирішення проблеми поглинань у тріщинуватих колекторах.

- Оцінити економічні та екологічні переваги впровадження нанотехнологій у процеси буріння та визначити перспективи розвитку "інтелектуальних" систем бурових розчинів.

## РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПРАКТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАНОЧАСТИНОК

### 2.1 Дослідження впливу введення наночастинок на реологічні властивості бурових розчинів

Пластична в'язкість (ПВ) є одним з стандартних параметрів, що визначають в'язкісний опір течії рідини У контексті бурових розчинів ПВ використовується для оцінки їх здатності утримувати буровий шлам у підвішеному стані [25].

Підвищений вміст твердих частинок, особливо глинистих низької щільності, наводить до збільшення пластичної в'язкості і міцності бурового розчину Бурові розчини з високим вмістом твердої фази утворюють товсту глинисту кірку та характеризуються низькими швидкостями проходки. Висока зміст піску в буровому розчині підвищує його абразивність, що може привести до пошкодження насосів, труб, свердловинного інструменту і двигунів [26]. Для зниження ПВ необхідно зменшити концентрацію твердих частинок у буровому розчині шляхом розведення водою або іншими методами, які покращують його промивні Показники. Поліпшення реологічних властивостей бурового розчину під час бурових робіт зазвичай досягається з допомогою добавок, таких як бентоніт, але для цього також можуть застосовуватися наночастки різних типів. Бентоніт є добавкою, яка в силу своєю низькою вартості широко використовується для модифікації реологічних властивостей бурових розчинів [27].

Наночастки довели свою здатність оптимізувати реологічні властивості бурових розчинів, включаючи ПВ. Додавання різних наночасток (таких як  $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $TiO_2$ ) у концентрації близько 1% про. бурові розчини на основі бентоніту істотно збільшує ПВ та інші реологічні параметри. Введення наночастинок  $MgO$  у поєднанні з модифікованим крохмалем у концентрації 0,5% об. збільшує ПВ бурових розчинів на водній основі на 45% об. При високому тиску та температурі було встановлено, що гібридні структури, перебувають з багатостінних нанотрубок та  $TiO_2$ , позитивно впливають на ПВ, але не впливають на

водовіддачу [28, 19].

Також було виявлено, що функціоналізовані багатостінні вуглецеві нанотрубки в концентраціях від 0,01% об. до 0,5% про. покращують пластичну в'язкість бурових розчинів завдяки своїй більшій поверхні, високому вмісту твердих речовин та питомій поверхні нанотрубок. Додатково, додавання гідрофільного гільсоніту буровий розчин збільшує пластичну в'язкість на 9,5%. Дослідження також показали, що додавання наночастинок  $\text{TiO}_2$  в концентрації близько 0,05% за масою до поліаніонної целюлози, гідроксиетилцелюлози та ксантогенатної камеді при різних температурах до та після обробки в вальцевої печі сприятливо впливає на термостійкість та реологічні характеристики бурових розчинів.

Міцність гелю (СНР) є показником швидкості та міцності утворення гелю в статичних умовах. Чим вища міцність гелю, тим більше розмір частинок, які можуть залишатися в колоїдному стані, не осідаючи під впливом гравітаційних сил. Міцність гелю є важливим фактором підтримки частинок у підвішеному стані в буровому розчині.

Тверді частки не можуть перебувати у підвішеному стані без достатньої міцності гелю бурового розчину під впливом статичних напруг зсуву. Вимірювання міцності гелю зазвичай проводиться при низькій швидкості зсуву після того, як буровий розчин залишається нерухомим протягом певного часового періоду. Стандартна процедура Американського нафтового інституту визначає періоди часу в 10 секунд і 10 хвилин, хоча вимірювання міцності гелю також часто проводять через 30 хвилин або 16 годин.

Використання наночастинок як добавок може позитивно впливати на міцність гелю. Наприклад, дослідження показали, що додавання наночастинок  $\text{MgO}$  в концентрації близько 0,5% за масою буровий розчин може підвищити міцність гелю на 67%. З іншого боку, додавання наночастинок  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в концентрації близько 3% по масі в буровий розчин може збільшити міцність гелю лише на 3%.

При бурінні нафтових і газових свердловин виникають значні значення

моменту, що крутить, і тертя бурового інструменту об стінки свердловини. Це може наводити до проблем, таким як прихват інструменту та підвищений знос обладнання. Для зниження цих проблем у бурових розчинах застосовуються спеціальні мастильні добавки, які покращують антиприхватні та ПАР [43].

Однак багато існуючі мастильні добавки можуть втратити свою ефективність при бурінні сольових відкладень з використанням насичених солями бурових розчинів або при забрудненні бурового розчину в процесі розкриття пластів, що містять двовалентні солі металів, зокрема солі кальцію. Це з тим, що це солі можуть взаємодіяти з добавками і знижувати їх ефективність. Тому для подібних умов потрібна розробка та застосування більш ефективних мастильних добавок, стійких до впливу солей та здатних забезпечувати надійне зниження тертя та крутного моменту при бурінні свердловин.

Використання наночастинок, таких як наночастинки гідрофільного природного гільсоніту (HGN), може дійсно поліпшити здатність змащувальної бурових розчинів. В умовах високої температури та тиску, наночастинки HGN виявляють здатність знижувати крутний момент і покращувати змащувальні властивості бурового розчину.

Дослідження показали, що при додаванні наночастинок HGN в буровий розчин, що піддається високій температурі і тиску, момент, що крутить, може бути знижений на 15% і 13,63%, а також змащувальна здатність розчину може бути покращено. Це має позитивне вплив на ПВ і СНР, а також знижує водовіддачу. Такі покращення сприяють мінімізації ризику диференціального прихвату на 61,5%.

Це пояснюється тим, що після обробки вальцевою піччю значення ДНС/ПВ бурового розчину з додаванням наночастинок HGN збільшується на 9,5% в то час як значення ДНС/ПВ базового бурового розчину знижується на 67%. Таким чином, використання наночастинок HGN дозволяє досягти більш ефективного змащування та зниження тертя при бурінні свердловин в умовах високих температур та тиску [16].

Якщо буровий розчин містить гідрофільний гільсоніт та проходить

обробку в вальцевій печі, він зазвичай має більше високою по порівняно з базовим розчином. Це призводить до зниження ризику диференціального прихоплення бурового інструменту.

На рисунку 2.1 показано, що після обробки у вальцевій печі водовіддача значно знижується як у стандартних умовах, так і в умовах високого тиску та температури. Це вказує на поліпшення властивостей бурового розчину, оскільки зниження водовіддачі зводить до мінімуму втрати рідини та допомагає підтримувати бурову штуцерну рідину в колоїдному стані, забезпечуючи стабільніші умови буріння.

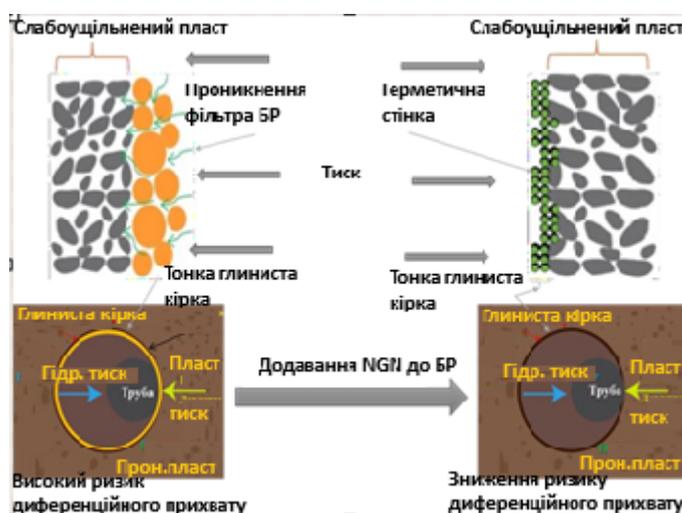


Рисунок 2.1 - Механізм оптимізації реологічних властивостей розчину шляхом додавання NGN

Застосування наночастинок графена в бурових розчинах на водній Основу польових випробувань [19] показало значні переваги. При додаванні 3% по масі наночастинок графену вдалося знизити момент, що крутить, на 20% і істотно зменшити знос бурових доліт.

Наночастинки графена також призвели до зміни морфології та властивостей поверхні металу, утворюючи фрикційний бар'єр, що самовідновлюється, (рис. 2.2). Цей бар'єр здатний збирати "дрібний порошок" із поверхні металу, запобігаючи його зашламуванню. Це дозволяє буровому інструменту вільно розбурювати нові пласти без перешкод.



Рисунок 2.2 - Зношування бурових долот при використанні: а-буровий розчин на водній основі з ефіром; б-буровий розчин на водній основі з графеном

Результати показують, що використання наночастинок графену може значно покращити ефективність та довговічність бурового процесу, а також знизити витрати на заміну та обслуговування бурового інструменту.

Використання наночастинок графену у бурових розчинах дозволяє досягти високої довговічності роботи та вимагає низького дозування. Це робить їх оптимальною добавкою, яка перевершує інші рідкі та тверді мастильні матеріали, які можуть використовуватися в бурових процесах.

У польових випробуваннях спостерігалася хороша змащувальна здатність бурового розчину з наночастинками графену при високих температурах до 176 °С. Це важливо, оскільки буріння нафтових і газових свердловин часто пов'язані з екстремальними умовами, включаючи високі температури [10].

У доповнення до наночастинок графену, також додавався наноккомпозит з урахуванням ефіру бората. Це свідчить про можливість використання комбінацій наноматеріалів для додаткового поліпшення змащувальних та антифрикційних властивостей бурових розчинів.

Використання наночастинок графену і інших наноматеріалів в бурових процесах є перспективний напрямок і може принести значні переваги у зниженні тертя, зносу бурових інструментів та підвищенні ефективності буріння у складних умовах.

Лабораторні випробування показали значне зниження моменту, що

крутить. при додаванні нанокompозиту в буровий розчин. Концентрація 5% за масою нанокompозиту призвела до зниження крутного моменту до 80% в одному буровому розчині та більш ніж на 50% в іншому буровому розчині з різною щільністю. Ці результати свідчать про потенціал використання нанокompозитів для зниження тертя та покращення ефективності бурових процесів.

Польові випробування підтвердили ефективність зниження моменту, що крутить, в реальних умовах свердловини при температурі 176 °С. Зниження моменту, що крутить, на 44% вказує на значне поліпшення в роботі бурового інструменту і зниження енерговитрат при бурінні.

Необхідно відзначити, що хоча результати польових випробувань є перспективними, додаткові дослідження потрібні для вивчення застосування ширшого асортименту наночастинок і нанокompозитів як добавки, що знижують тертя, до бурових розчинів. Це дозволить краще зрозуміти і оптимізувати їх властивості, а також оцінити їх впливом геть різні параметри бурового процесу [29].

Загальний висновок полягає в тому, що використання наночастинок та нанокompозитів в якості знижуючих тертя добавок до буровим розчинам має потенціал для поліпшення ефективності та продуктивності бурових операцій, але потребує подальших досліджень та розробок.

Глинисті мінерали, такі як хлорит, іліт, монтморилоніт, смектит і каолініт, є поширеними компонентами сланцевих пластів. Вони мають багат шарову структуру і складаються з силікатів алюмінію, заліза і магнію. Частинки глинистих мінералів часто мають пластинчасту форму, але також можуть зустрічатися в вигляді подовжених пластин, трубчастих чи волокнистих структур.

Класифікація глин ґрунтується на їхній кристалічній структурі, властивостях набухання, катіонообмінної здатності та інших особливостях, які можна вивчити за допомогою електронної мікроскопії. Глинисті мінерали можуть відрізнятися за своїми фізичними та хімічними властивостями, що впливає на їх взаємодія з буровими розчинами і на властивості породи [73, 74].

Глинисті структури сланцевих пластів можуть представляти виклики при бурінні свердловин на нафту і газ, так як вони мають високу абсорбцію, набухання і пластичність. Це може призвести до проблем, таких як заклинювання інструменту, погана прохідність бурового розчину, засмічення свердловини та інші негативні наслідки. Тому розуміння та управління вмістом глинистих мінералів у буровому розчині є важливим аспектом при бурінні свердловин [15].

Бурові розчини на водній основі відіграють важливу роль в активації кристалічних та осмотичних механізмів набухання глин. Кристалічний набухання відбувається в результаті гідратації поверхні глинистих мінералів, де молекулярні шари води адсорбуються базальними поверхнями кристалів. Це вплив води торкається як зовнішні, і внутрішні кристалічні шари, викликаючи їх розширення.

Осмотичне набухання глин виникає через різницю концентрацій катіонів між кристалічними шарами та об'ємною пластовою рідиною.

Оскільки концентрація катіонів в об'ємній пластовій рідині зазвичай нижча, ніж між кристалічними шарами, відбувається втягування води у внутрішні проміжки між шарами глини, що призводить до збільшення загального обсягу глинистих кристалів [16].

Стабільні бурові розчини відіграють важливу роль у запобіганні пошкодженню ствола свердловини і набухання глинистих пластів. Вони здатні зберігати свій склад та контролювати концентрацію катіонів в пластовій рідині, що допомагає запобігти негативним наслідкам, пов'язаним з набуханням глин [17].

У джерелі були проведено випробування, які підтвердили, що багатостінні вуглецеві нанотрубки з поверхнево-ініційованою радикальною полімеризацією перенесення атомів здатні ефективно закупорювати пори в колекторах з низькою проникністю, таких як сланцеві пласти. Навіть при низькій концентрації, 0,3% за масою, ефективність закупорки становила близько 50,96%, і вона зберігала стійкість при 170 °C протягом 24 годин.

Кольматанти, підготовлені з використанням стабільних бурових розчинів на водній основі, можуть ефективно запобігати проникненню рідин у сланцеві пласти. Це значний стимул для переходу від бурових розчинів на нафтовій основі до бурових розчинів на водній основі.

Це має велике значення, оскільки небажане проникнення рідин у сланці може призвести до погіршення продуктивності свердловин, забиття пласта та інших негативних наслідків. Тому перехід до бурових розчинів на водній основі з використанням кольматантів може бути більш ефективним та економічно вигідним підходом під час роботи зі сланцевими пластами.

Крім того, у досліджах, представлених у джерелі [18], поверхнево-ініційована радикальна полімеризація перенесення атомів забезпечує ефективне електростатичний і стеричне відштовхування багатостінних вуглецевих нанотрубок для підтримки їхньої стабільності в екстремальних умовах. На рисунку 12 можна бачити, що після диспергування модифікованих багатостінних вуглецевих нанотрубок у дистильованій воді протягом 30 хвилин при високих і високих температурах тисках нанотрубки залишалися стабільними. Також проводилися випробування на фільтрацію в умовах високої температури та високого тиску, які показали, що багатостінні вуглецеві нанотрубки з поверхнево-ініційованою радикальною полімеризацією перенесення атомів ефективно блокують міжпорові канали. Під високим тиском нанотрубки здатні проникати в пори чи тріщини меншого розміру. Якщо розмір нанотрубок перевищує розміри пор, завдяки своїй здатності до зрощування нанотрубки мають тенденцію накопичуватися, блокуючи більші пори (рис. 2.3).

У разі коли тиск рідини в колоні бурового розчину перевищує тиск пластового флюїду, відбувається поглинання бурового розчину пластом. Чим більше різниця в тиск, тим більше можливі втрати бурового розчину, особливо якщо пласт, що розкривається, володіє високою проникністю, пористістю і/або тріщинуватістю.

Феномен поглинання бурового розчину пластом залежить не тільки від перепаду тиску, пористості та проникності пласта, але також від кількості та

складу самого бурового розчину. У зв'язку з цим доцільним розділити фактори, що впливають на поглинання бурового розчину пластом, на геологічні та технологічні. Геологічними факторами є: тип пласта, що розкривається, його потужність і глибина залягання, міцність гірських порід на гідророзрив, пластовий тиск і властивості пластового флюїду (флюїдів), а також деякі інші супутні ускладнення, такі як обвалення стінок стовбура свердловини, приплив нафти і газу, водопрояви і т.д.

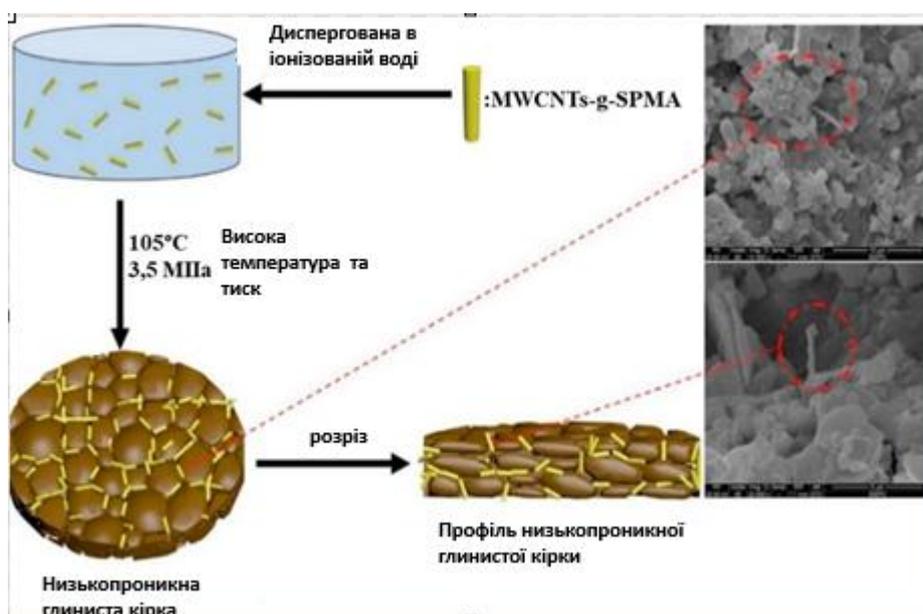


Рисунок 2.3 - Вплив вуглецевих нанотрубок на закупорювання міжпорових каналів

Технологічні фактори включають: кількість і якість технологічних рідин, що циркулюють у стовбурі свердловини, метод буріння (наприклад, на депресії/репресії), швидкість СПО і т. д. До даних факторів також відносяться клас і стан використовуваного технічного обладнання, а також управління і організація програми буріння. Більшість матеріалів, що застосовуються для зниження поглинання буровим розчином, зазвичай використовуються в реактивному режимі після виникнення проблеми. Ці матеріали не є стандартними добавками до бурових розчинів, які застосовуються на ранніх етапах буріння для запобігання поглинанню. Однак, у разі виникнення проблеми з поглинанням,

можна використовувати спеціальні реагенти та добавки, розроблені для усунення цієї проблеми та відновлення ефективності бурового процесу [12].

Дослідження показують, що використання наночастинок та нанополімерів може бути ефективним способом зниження ризику поглинання бурового розчину під час бурових робіт. Однак, у разі високопористих, проникних зон, тріщинуватих та кавернозних пластів, ефективне застосування наночастинок може бути утруднено через їх дуже мінімальних розмірів. У таких умовах може знадобитися розробка спеціальних методів і технологій, які дозволять ефективно застосовувати наночастинок для гідроізоляції стовбура свердловини та запобігання поглинанню розчину. У силу своїх розмірів наночастинок можуть більш ефективно застосовуватися для закупорювання пор та/або міжпорових сполук менших розмірів, то є в літологічних умовах з мікропористістю і мікротріщинуватістю, характерних, зокрема, для сланців. Важливою характеристикою деяких наночастинок є їх здатність модифікувати властивості матеріалів, що закупорюють, виготовлених у вигляді порошків або гранул.

Зокрема, в джерелі [11], запропонована зшита гелева нанокомпозитна таблетка для боротьби зі значними втратами розчину. Таблетка складається з чотирьох основних компонентів: гідратогенної в'язкої полімерної основи, агента, що зшиває, набухають зшитих зерен і колоїдних частинок. Використання таблеток, що формують гель, для герметизації зони з потенційним поглинанням бурового розчину в стовбурі свердловини є одним із підходів до запобігання цього явища. Ці таблетки можуть бути спеціально розроблені для створення герметизуючого гелю, який заповнює проникні або тріщинуваті зони, запобігаючи поглинанню бурового розчину.

Дослідження також пропонують використовувати наночастки, спеціально розроблені для інгібування поглинання бурових розчинів на нафтовій основі. Ці наночастки можуть бути додані в буровий розчин, щоб запобігти його поглинання пластом. Дослідження показують, що такі наночастинки мають високий потенціал і можуть бути ефективними у запобіганні поглинанню бурового розчину.

Згідно з джерелом [14], використання наночастинок  $\text{CuO}$ /поліакриламід у приводить до суттєвого зниження водовіддачі та формування більш гладкої та менш пористої глинистої кірки за умов  $25\text{ }^\circ\text{C}$  та  $0,7\text{ МПа}$ . При збільшенні концентрації наночастинок з 1 до 10 г, теплопровідність збільшується на 161 до 697%. Присутність нанокompозиту знижує водовіддачу, оскільки тверді частинки успішно утримуються та видаляються з розчину шляхом поперечного потоку [34].

На рисунку 2.4 (а) представлена схематична ілюстрація бурових робіт та фільтрації розчину в пласт через низькоякісні та високоякісні глинисті кірки, що утворюються на стінках свердловини. Для зміцнення стінок та зниження втрати води також використовуються низькопористі пластини, що прилипають до стінок свердловини. На рисунку 2.4 (б) представлена мікрофотографія глинистої кірки, сформованої буровим розчином на водній основі (Еталонний зразок без мінералізації) з високою пористістю. На рисунку 13 (с) показано глинисту кірку, сформовану буровим розчином на водній основі з додаванням 5 г нанокompозиту (без мінералізації). Між малюнками 13 (б) та 13 (с) спостерігається значна різниця, обумовлена формуванням більш тонкої глинистої кірки при використанні нанокompозиту.

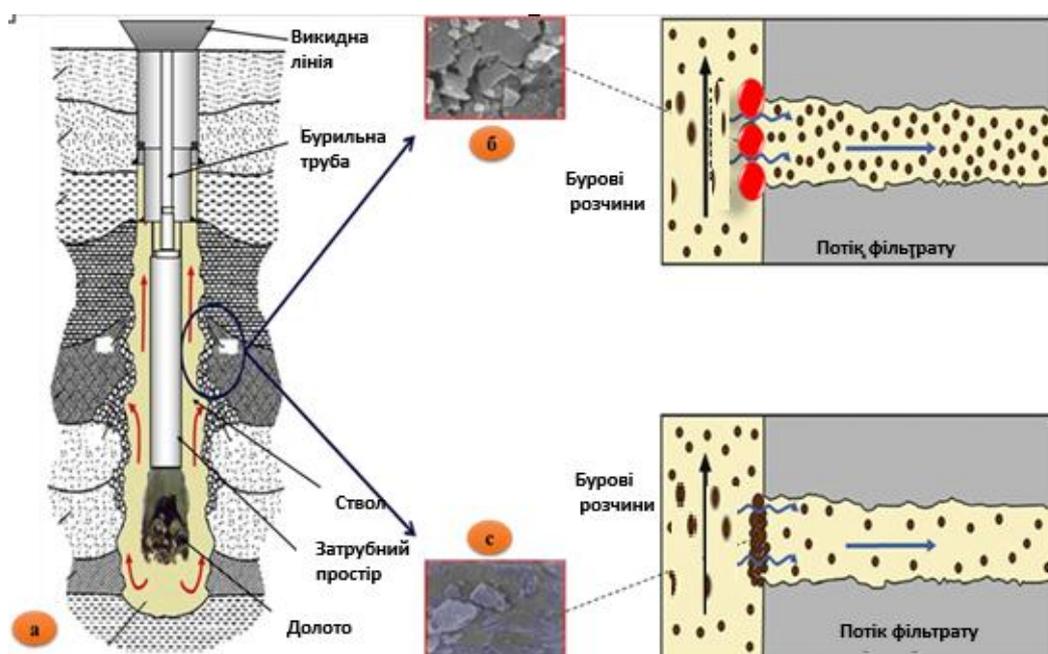


Рисунок 2.4 - Ілюстрація бурових робіт і фільтрації бурового розчину

## 2.2 Дослідження впливу колоїдних систем з наночастинками на фільтраційні характеристики тріщин

Згідно з джерелом [16], було проведено дослідження впливу наночастинок двоокису кремнію на фільтраційні властивості тріщин ГРП. Такий метод, заснований на використанні колоїдних систем з наночастинками двоокису кремнію, може бути застосований у різних сценаріях, включаючи ліквідацію свердловин при ГНВП та запобігання поглинанню бурових розчинів.

На етапі підготовки матеріалів та технологічних рідин для проведення експериментів були створені лабораторні зразки двох типів колоїдних систем: емульсійна система з наночастинками двоокису кремнію (ЕСН) та емульсійно-суспензійна система з наночастинками двоокису кремнію (ЕСС) [16].

Емульсійна система з наночастинками двоокису кремнію (ЕСН) використовується в технологіях інтенсифікації видобутку нафти та підвищення нафтовіддачі як водообмежувальний агент. Вона допомагає контролювати потоки води у свердловині та запобігати небажаному перемішуванню нафтової та водної фаз.

Емульсійно-суспензійна система з наночастинками двоокису кремнію (ЕСС) застосовується в процесах будівництва і підземного ремонту нафтових та газових свердловин як блокуюча пачка. Вона утворює перешкоду або ускладнює проникнення рідин у певні зони свердловини, що допомагає забезпечити контроль та керування процесами видобутку та експлуатації.

Такі колоїдні системи з наночастинками двоокису кремнію є інноваційними матеріалами, які мають потенціал для покращення ефективності та безпеки операцій у нафтогазовій промисловості. Однак, їх практичне застосування потребує подальших досліджень, випробувань та оптимізації для забезпечення оптимальних результатів на родовищах.

В експериментах джерела [16] було проведено визначення залишкової провідності моделей тріщин ГРП Югомашевського та Абдулівського нафтогазових родовищ для дослідження водообмежувальних властивостей ЕСП.

Поровий тиск, який використовувався в цих експериментах, становив 3,45 МПа.

Залишкова провідність є мірою здатності тріщин пропускати рідину або газ після проведення певних технологічних впливів, таких як використання певних матеріалів або методів. В даному випадку досліджувалася залишкова провідність моделей тріщин з використанням ЕСТ для оцінки її водообмежувальних властивостей у контексті інтенсифікації видобутку нафти та збільшення нафтовіддачі пластів. Умови проведення експериментів та концентрація наночастинок в системах ЕСП-1 і ЕСП-2 наведено в таблицях 2.1 та 2.2.

На етапі підготовки матеріалів та технологічних рідин до проведення експериментів проводили приготування наступних лабораторних зразків колоїдних систем: емульсійна система з наночастинками двоокису кремнію (ЕСН), що застосовується як водообмежувальний агента в технологіях інтенсифікації видобутку нафти та збільшення нафтовіддачі; емульсійно-суспензійна система з наночастинками двоокису кремнію (ЕСС), що застосовується як блокуюча пачка в процесах будівництва та підземного ремонту нафтових та газових свердловин. Фотографії тріщин до використання ЕСП представлені рисунку 2.5.

Таблиця 2.1 – Зміст наночастинок двоокису кремнію та води у складах лабораторних зразків колоїдних систем

Найменування зразка	Зміст наночастинок двоокису кремнію, % про.	Зміст моделі рідини, % про.
ЕСП -1	0,5	81,5
ЕСН -2	1,0	71
ЕСС -1	0,5	89,5
ЕСС- 2	1,5	85,5

Таблиця 2.2 - Оцінка впливу ЕСТ на фільтраційні характеристики моделей тріщин

Найменування зразка	Тиск у тріщині, МПа	Провідність мД · м		Проникність, Дарсі		Зниження проникності, раз
		до	після	до	після	
ЕСП -1	8	76738	3331	1131	49	23
ЕСН -2	8	86307	4809	1365	77	18



Рисунок 2.5 - Фотографії моделей тріщин після застосування ЕСП-1 і ЕСН -2

Результати експериментів щодо дослідження впливу водоограничуючого агента ЕСН на фільтраційні характеристики моделей тріщин ГРП наведені в таблиці 2.2 та на рисунку 2.6.

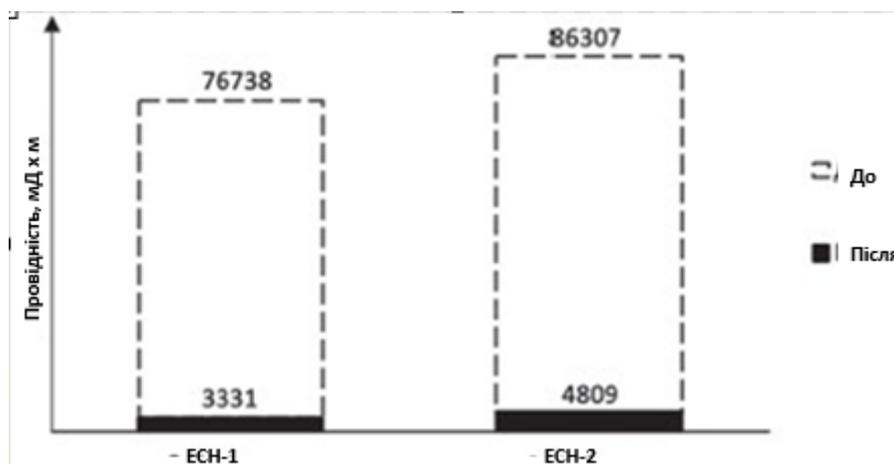


Рисунок 2.6 - Оцінка впливу ЕСП на провідність моделей тріщин



У результаті проведених фільтраційних експериментів в джерелі була проведена оцінка та дослідження блокуючих властивостей колоїдних систем, які представлені емульсійними та емульсійно-суспензійними системами з змістом твердих нанорозмірних частинок до 1,5% про.

Ці експерименти дозволили визначити ефективність та ефективні концентрації наночастинок у системах для досягнення необхідних блокуючих властивостей. Блокуючі властивості колоїдних систем можуть бути важливими в технологіях будівництва і ремонту нафтових та газових свердловин, де потрібно запобігти проникненню рідин чи газів у певні зони чи тріщини.

Дані результати фільтраційних експериментів свідчать про потенційно високу технологічну ефективність розроблених систем ЕСП та ЕСС. Ці системи можуть бути ефективно застосовані у різних процесах розробки родовищ, таких як інтенсифікація видобутку нафти, збільшення нафтовіддачі, будівництво та підземний ремонт нафтових та газових свердловин.

Переваги застосування систем ЕСН та ЕСС у цих процесах включають можливість створення ефективного водообмежуючого середовища, блокування тріщин та запобігання поглинанню бурових розчинів пластом. Висока технологічна ефективність даних систем може сприяти підвищенню ефективності видобутку нафти, збільшення обсягів видобутку та зниження витрат на будівництво та ремонт свердловин.

Однак, важливо зазначити, що результати фільтраційних експериментів проводилися в контрольованих лабораторних умовах, і перед тим, як широко впроваджувати дані системи, подальші дослідження та випробування можуть бути необхідні для підтвердження їх ефективності та надійності на практиці.

Залежно від мети застосування систем, розв'язуваних задач та пластових умов оптимальна концентрація наночастинок для ЕСП може перебувати в інтервалі від 0,5 до 1,0% про, а для ЕСС в інтервалі від 0,5 до 1,5% про. Однак оптимальні концентрації як твердої, так і рідких фаз даних систем повинні бути уточнені за результатами дослідно-промислових випробувань та промислового масштабування нових систем.

## **2.3 Основні висновки експериментального застосування наночастинок**

Справді, використання наночастинок у бурових розчинах може призвести до появи режимів течії, не характерних для каналів великого діаметра. У мікроканалах розміром близько 100 мкм можливі різноманітні явища та ефекти, що стають суттєвими на таких масштабах. Широкий спектр застосування мікроканалів зумовлює активні дослідження у цій галузі. Вчені та інженери вивчають гідродинаміку, теплообмін, масоперенесення, поведінку наночастинок та інші фізико-хімічні процеси, пов'язані з мікротечіями. Це дозволяє створювати ефективніші та точніші методи і пристрої, а також розширювати межі застосування мікроканальних технологій.

Застосування нанотехнологій може покращити адитивні властивості та експлуатаційну поведінку розчинів шляхом підбору характеристик частинок відповідно до технічних, екологічних та виробничих вимог.

Очікується, що відбір та розробка нетоксичних, екологічно безпечних і біорозкладних бурових розчинів на основі наночастинок відповідатимуть сучасним вимогам буріння в глибоководних і чутливих екосистемах. У статті розглянуто основні переваги використання нанодобавок у складі «розумних» флюїдів, призначених для буріння, завершення, стимулювання та видобутку нафтогазових ресурсів.

Наночастинки у буровому розчині сприяють покращенню та стабілізації його реологічних властивостей, що підвищує ефективність очищення стовбура свердловини й утримання шламу. Бурові розчини, модифіковані нанотехнологіями, дозволяють вирішувати проблеми, пов'язані з прихватами труб, втратою розчину, пошкодженням пласта та формуванням глинистої кірки.

Однак погане диспергування наночастинок у вибійних умовах при зміні рН, солоності чи температури базової рідини може спричинити нестабільність стовбура свердловини та пошкодження пласта. Іншою проблемою є агломерація частинок: позитивно заряджені частинки схильні до злипання в кислому

середовищі, а негативно заряджені – у лужному.

Ефект застосування різних типів наночастинок на реологічні властивості бурового розчину наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Результати експериментальних застосувань різних типів наночастинок

№	Тип полімерних наночастинок	Дисперсійне середовище	Конц., % мас.	Результати
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO, TiO <sub>2</sub>	РВО	1	Збільшення пластичної в'язкості (114%), СНР (55%) та ДНР (45%)
2	MgO	РВО+мод. крохмалем	0,5	Збільшення ПВ (45%), СНР (67%), ДНР (231%)
3	Гібрид багатостінних трубок та TiO <sub>2</sub>	РВО	0,02-0,38	Збільшення ПВ (58-114%), зниження коефіцієнта тертя (30-50%), але не вплинуло на водовіддачу
4	Гідрофільний гільсоніт	РВО	0,5	Збільшення ПВ на 9,5%
5	TiO <sub>2</sub>	РВО+ПАЦ+ГЕЦ+ксанта н	0,05	Підвищення термостійкості та реологічних характеристик
6	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	БР на полімерній основі	3	Підвищення ПВ (15%), СНР (3%), ДНР (12,5%)
7	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	РВО	3	Підвищує міцність гелю на 3%
8	HGN	РВО		Зниження крутного моменту до 15%, покращує змащувальні властивості і ДНР
9	Графен	РВО; РВО; РУВ	- 3 - 5 - 5	– Зниження крутного моменту на 20%, запобігання зашламовуванню, покращені змащувальні характеристики при підвищених температурах; – Зниження крутного моменту до 80%; – Зниження крутного моменту на 50%
10	Графен+кольматант	РВО	0,3	Підвищує ефективність закупорки (50% за 24ч. при 170 ° С)
11	Зшита нанокompозитна гелева таблетка	РВО	-	Вкрай ефективна герметизація зони з можливим поглинанням
12	SiO <sub>2</sub>	ЕСС РВО; ЕСП РВО	0,5-1 ; 0,5-1	Значне зниження проникності: ЕСП-до 23 разів; ЕСС - до 237 раз, потенційно можна використовувати в складі кольматуючих пачок
13	ZnO	РВО з бентонітом	3	Підвищення щільності на 10% і ПВ на 20%

## 2.4 Висновки до розділу 2

1 Практичні дослідження підтверджують, що введення наночастинок суттєво покращує реологічні властивості бурових розчинів. Додавання наночастинок MgO у концентрації 0.5% мас. збільшує пластичну в'язкість на 45%, а міцність гелю - на 67%, тоді як наночастинок гідрофільного гільсоніту (HGN) знижують крутний момент на 13-15% і ризик диференціального прихвату на 61.5%. Наночастинок графену в концентрації 3% мас. демонструють особливу ефективність, знижуючи крутний момент на 20% і знос бурових доліт за рахунок формування фрикційного бар'єру, що самовідновлюється.

2 Експериментальні дані свідчать, що наночастинок ефективно стабілізують бурові розчини та знижують фільтраційні втрати. Багатостінні вуглецеві нанотрубки концентрації 0.3% мас. забезпечують ефективність закупорювання пор 50.96% навіть при 170°C, а нанокмпозит CuO/поліакриламід знижує водовіддачу і формує менш пористу глинисту кірку.

3 Експериментальні дослідження підтверджують високу ефективність колоїдних систем з наночастинками SiO<sub>2</sub> для контролю фільтрації в тріщинних колекторах. Система ЕСС-2 з концентрацією наночастинок 1.5% об. демонструє найкращі результати, знижуючи проникність тріщин у 237 разів - з 389 Д до 2 Д, при тиску 19.9 МПа. Емульсійна система ЕСН також показує значну ефективність, знижуючи проникність у 18-23 рази, що робить їх перспективними для вирішення проблем поглинання бурових розчинів та контролю водопритоків.

4 Узагальнення експериментальних даних підтверджує, що різні типи наночастинок забезпечують специфічне покращення властивостей бурових розчинів: наночастинок MgO збільшують міцність гелю на 67%, гібридні наноструктури знижують коефіцієнт тертя на 30-50%, а графен зменшує крутний момент на 20-80%. Найбільш ефективні концентрації знаходяться в діапазоні 0.5-1.5% мас., при цьому комбіновані системи (наприклад, графен з кольматантом) демонструють синергетичний ефект, забезпечуючи ефективність закупорювання пор 50% при 170°C протягом 24 годин.

## **РОЗДІЛ 3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ У НАПРЯМІ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ**

### **3.1 Удосконалення технологій виробництва наночастинок для бурових розчинів**

Удосконалення технологій виробництва наночастинок для бурових розчинів є ключовим аспектом розвитку нафтогазової галузі. Наночастинки відіграють важливу роль в оптимізації бурових процесів, підвищенні ефективності і надійності буріння свердловин, а також зниженні впливу на навколишнє середовище. Незважаючи на вже досягнуті результати в цій галузі, існує постійна потреба у подальшому вдосконаленні технологій виробництва наночастинок для покращення їх якості та застосовності у нафтогазовій промисловості.

Одним із головних напрямів удосконалення технологій виробництва наночастинок є розробка нових методів синтезу. Традиційні методи, такі як хімічне осадження або фізичні методи, мають свої обмеження, такі як складність контролю розміру і форми частинок, а також можливість утворення агломератів. Тому активно досліджуються і впроваджуються нові методи синтезу, такі як методи із застосуванням плазми, ультразвукового розпилення, мікроемulsій та інші. Ці методи дозволяють отримувати наночастинки з вузьким розподілом розмірів, однорідною формою і підвищеною стабільністю (табл. 3.1).

Крім того, вдосконалення технологій виробництва наночастинок також включає покращення контролю за їх властивостями та характеристиками. Наприклад, важливим аспектом є контроль розміру частинок, оскільки він впливає на їхню реактивність, поверхневі властивості та ефективність при використанні в бурових розчинах. Розробка методів, що дозволяють точно контролювати розмір та розподіл розмірів наночастинок, є активною областю досліджень. Також важливим аспектом є підвищення стабільності та дисперсії

наночастинок, щоб забезпечити їх рівномірний розподіл у розчині та запобігти агломерації.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика методів синтезу наночастинок для бурових розчинів

Метод синтезу	Розмір частинок, нм	Однорідність	Складність процесу	Вартість виробництва	Область застосування
Хімічне осадження	50-200	Середня	Низька	Низька	Масове виробництво
Золь-гель метод	10-100	Висока	Середня	Середня	Спеціалізовані розчини
Плазмовий синтез	5-50	Дуже висока	Висока	Висока	Високоякісні наночастинки
Ультразвукове розпилення	20-150	Висока	Середня	Середня	Промислове виробництво
Мікроемульсійний метод	5-80	Дуже висока	Висока	Висока	Наукові дослідження
Механохімічний синтез	30-200	Середня	Низька	Низька	Базові застосування

Ще одним важливим аспектом удосконалення технологій виробництва наночастинок для бурових розчинів є дослідження та впровадження нових матеріалів та складів. Розробка нових матеріалів з певними властивостями, таких як підвищена реактивність, стійкість до високих температур та тиску, а також селективність по відношенню до певних компонентів свердловинного флюїду, є активною областю досліджень. Використання нових матеріалів може призвести до більш ефективного використання наночастинок та покращення характеристик бурових розчинів (табл. 3.2).

Важливим фактором у вдосконаленні технологій виробництва наночастинок для бурових розчинів є їх масштабованість та комерціалізація. Переклад досягнень наукових досліджень у промислове виробництво потребує розробки та оптимізації процесів синтезу, масштабування виробництва та забезпечення консистентної якості продукції. Це включає розробку ефективних

і економічно вигідних методів виробництва, а також контроль якості та стандартизацію продукції.

Таблиця 3.2 – Класифікація наночастинок за типом матеріалу та їх функціональні властивості

Тип наночастинок	Хімічний склад	Розмір, нм	Основна функція в буровому розчині	Робоча температура, °С	Концентрація, %
Оксиди металів	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub>	10-50	Контроль фільтрації, зміцнення глинистої кірки	До 200	0,5-2,0
Вуглецеві наноматеріали	Графен, нанотрубки	5-30	Покращення реологічних властивостей	До 250	0,1-0,5
Наночастинки металів	Fe, Cu, Zn	20-80	Каталітична активність, бактерицидні властивості	До 150	0,3-1,0
Глинисті наночастинки	Бентоніт, каолініт	30-100	Стабілізація розчину, контроль в'язкості	До 180	1,0-3,0
Полімерні наночастинки	Полімери різних типів	50-200	Інкапсуляція, контрольоване вивільнення добавок	До 120	0,5-1,5

Бурові долота, труби нафтового сортаменту, елементи обладнання промислів повинні протистояти колосальним навантаженням, тому потреба нафтогазової промисловості у міцних та довговічних матеріалах украй висока. Застосування матеріалів із заданою наноструктурою дозволяє виготовляти більш легке, довговічне та міцне обладнання. Нанотехнологія також може допомогти в розробці нових методів вимірювань. Крихітні за розмірами датчики можна розмістити на будь-якому обладнанні, в тому числі підземному. Тим самим можна різко підвищити кількість і якість інформації про продуктивний пласт [38].

У висновку, вдосконалення технологій виробництва наночастинок для бурових розчинів є важливим завданням, що стоїть перед нафтогазовою галуззю. Продовження досліджень у цій галузі та впровадження нових методів синтезу, контролю властивостей і розробки нових матеріалів дозволить підвищити ефективність та надійність буріння свердловин, а також знизити вплив на навколишнє середовище. Це сприяє подальшому розвитку нафтогазової промисловості та забезпеченню сталого та ефективного використання ресурсів.

### **3.2 Економічні та екологічні переваги використання наночастинок**

Використання наночастинок у бурових розчинах надає ряд економічних та екологічних переваг, які є важливими для сталого розвитку нафтогазової галузі.

Скорочення обсягу відходів. Застосування наночастинок дозволяє оптимізувати склад та властивості бурових розчинів, що може зменшити обсяг відходів, які генеруються у процесі буріння. Наночастинки мають високу активність і ефективність, тому потрібна менша кількість добавок для досягнення бажаних результатів. Це призводить до скорочення використання хімічних речовин і, відповідно, зменшення обсягу відходів, які потрібно обробляти та утилізувати.

Зниження забруднення води та ґрунту. Наночастинки можуть бути використані для покращення фільтрації та очищення бурових розчинів, що сприяє зниженню забруднення води і ґрунту. Вони можуть допомогти видалити шкідливі домішки та забруднювачі, такі як важкі метали та нафтопродукти, з бурових розчинів, що сприяє більш ефективній обробці та рециклінгу використаної води [46, 39].

Зменшення впливу на довкілля. Застосування наночастинок дозволяє знизити вплив бурових операцій на довкілля. Завдяки більш ефективному використанню розчинів та зменшенню кількості добавок, що споживаються в процесі буріння, скорочується потенційне забруднення ґрунту, водних ресурсів та повітря. Крім того, покращення ефективності буріння з допомогою

наночастинок може призвести до скорочення часу, що витрачається на буріння, що знижує загальний вплив на довкілля (рис. 3.1).

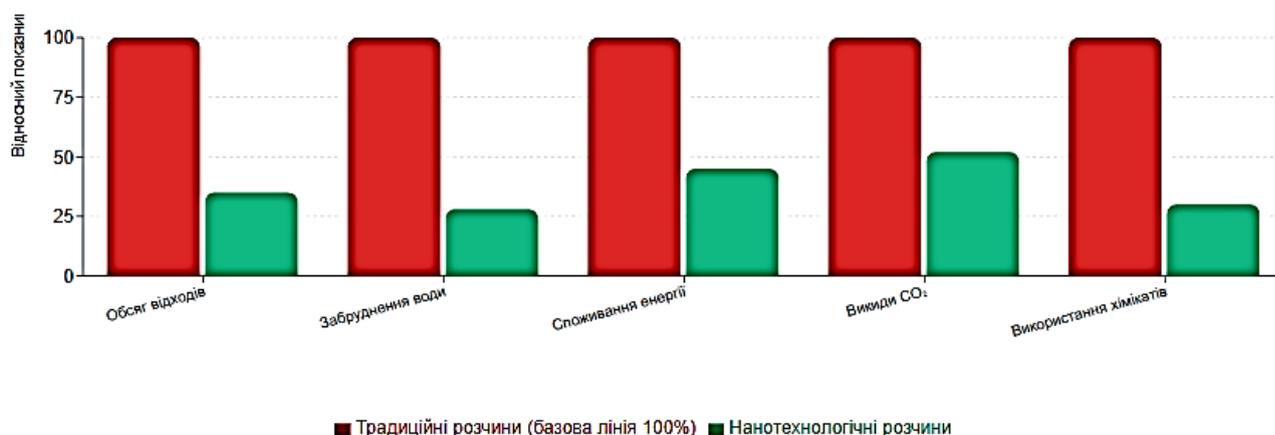


Рисунок 3.1 – Порівняння екологічних показників традиційних та нанотехнологічних бурових розчинів

Поліпшення енергоефективності. Застосування наночастинок також сприяє покращенню енергоефективності процесу буріння. Наприклад, наночастинки можуть використовуватися для зниження тертя та зносу бурових інструментів, що збільшує їх термін служби та знижує потребу в заміні. Це веде до скорочення споживання енергії та ресурсів, а також зниження викидів парникових газів та інших шкідливих речовин.

Підвищення ефективності вилучення ресурсів. Використання наночастинок у бурових розчинах може сприяти підвищенню ефективності вилучення нафти і газу. Вони можуть покращити проникнення розчинів у пористу структуру гірських порід, збільшити проникність та полегшити витіснення ресурсів. Це дозволяє досягти більш повного вилучення нафти і газу, що скорочує необхідність додаткових свердловин і зменшує вплив на довкілля.

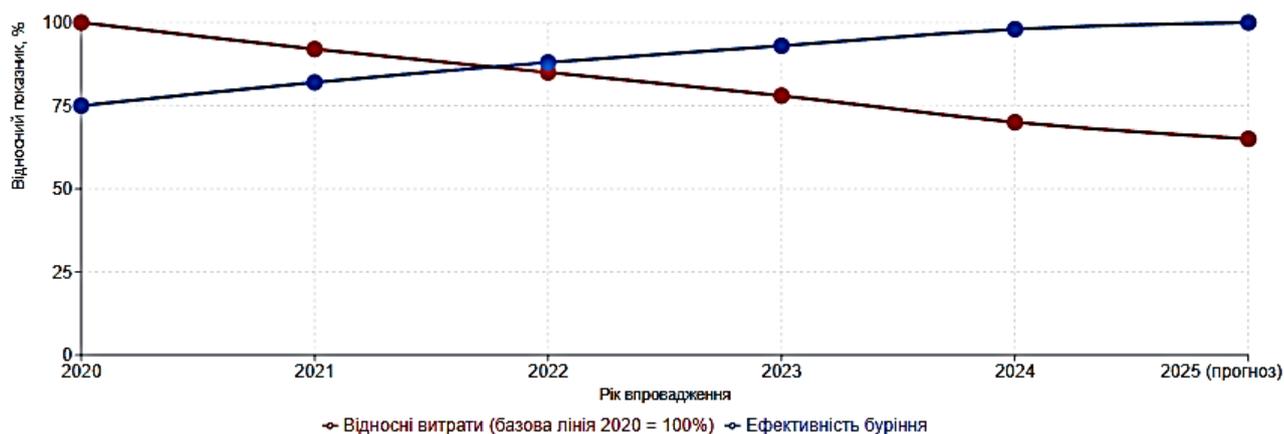


Рисунок 3.2 – Динаміка зниження витрат та підвищення ефективності при впровадженні нанотехнологій

Використання наночастинок у бурових розчинах має значні економічні переваги, які є важливими для нафтогазової галузі.

Покращена продуктивність свердловин. Застосування наночастинок у бурових розчинах може значно підвищити продуктивність свердловин. Наночастинки мають здатність покращувати властивості розчинів, такі як в'язкість, фільтраційні властивості та щільність. Це дозволяє досягти кращого контролю над потоком рідини та більш ефективного видалення відкладень і промивання свердловини. Поліпшена продуктивність свердловин призводить до підвищення обсягу видобутку нафти та газу, що веде до збільшення доходів.

Скорочення часу буріння. Застосування наночастинок також може значно скоротити час, що витрачається на буріння свердловин. Завдяки своїм унікальним властивостям, наночастинки здатні знизити тертя і знос бурових інструментів, що дозволяє збільшити термін їх служби. Це скорочує необхідність у заміні інструментів та простоїв, що веде до скорочення часу буріння та зниження витрат.

Зниження витрат на реагенти і добавки. Застосування наночастинок може знизити витрати на реагенти та добавки для бурових розчинів. Наночастинки мають високу активність і ефективність, тому потрібна менша кількість добавок для досягнення бажаних властивостей розчину. Це дозволяє скоротити витрати

на купівлю та транспортування реагентів, а також спрощує процес підготовки і змішування розчину на місці буріння.

Поліпшений контроль за процесом буріння. Використання наночастинок у бурових розчинах надає можливість більш точного та контрольованого процесу буріння. Наночастинки можуть бути спеціально спроектовані для досягнення певних властивостей, таких як регулювання щільності, зниження фільтрації та покращення змащувальних властивостей. Це дозволяє інженерам та операторам точніше керувати параметрами бурового процесу, що веде до покращення контрольованості та підвищення ефективності [9, 17].

Розширення можливостей буріння. Використання наночастинок розширює можливості буріння у складних геологічних умовах. Наночастинки можуть допомогти подолати проблеми, пов'язані із щільністю ґрунтів, перекриттям пластів та іншими складностями. Це дозволяє проводити більш ефективне та успішне буріння у регіонах, де раніше виникали складності та обмеження.

Загалом, використання наночастинок у бурових розчинах забезпечує значні економічні переваги, включаючи підвищення продуктивності свердловин, скорочення часу буріння, зниження витрат на реагенти та добавки, покращену контрольованість процесу буріння та розширення можливостей буріння. Ці фактори сприяють покращенню економічної ефективності і конкурентоспроможності нафтогазової галузі. Також використання наночастинок у бурових розчинах пропонує значні екологічні переваги, включаючи скорочення обсягу відходів, зниження забруднення води та ґрунту, зменшення впливу на навколишнє середовище, підвищення енергоефективності та підвищення ефективності вилучення ресурсів. Ці фактори роблять використання наночастинок у бурових розчинах привабливим варіантом для сталого розвитку нафтогазової галузі (рис. 3.3).

За допомогою добавок наночастинок можна у широких діапазонах регулювати основні технологічні та фізико-хімічні властивості бурових розчинів, приготованих на вуглеводневій основі. Причому для зміни параметрів великих концентрацій наночастинок не потрібно, отже, модифікація бурових

розчинів на вуглеводневій основі відбуватиметься без значної зміни їх щільності. Це дуже важливо при бурінні гірських порід, схильних до поглинань і гідророзривів, і може значно підвищити ефективність буріння у складних гірничо-геологічних умовах.

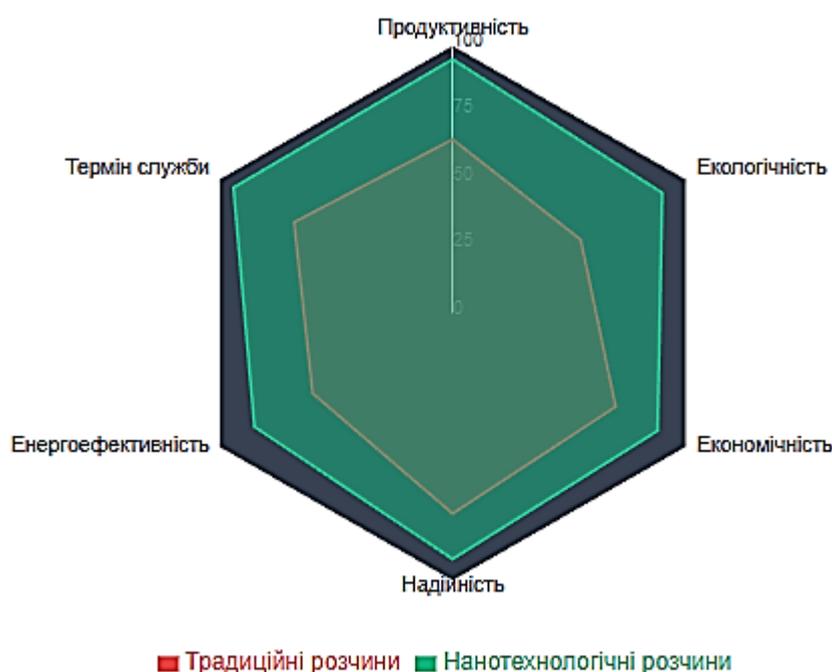


Рисунок 3.3 – Комплексне порівняння характеристик традиційних та нанотехнологічних бурових розчинів

### 3.3 Перспективи впровадження технологій застосування наночастинок

Перспективи використання наночастинок в оптимізації бурових розчинів становлять значний потенціал для покращення ефективності та енергоефективності процесу буріння свердловин. Наночастинки мають унікальні властивості і характеристики, які можуть принести значні переваги в різних аспектах буріння, включаючи підвищення продуктивності, зниження витрат і поліпшення екологічної стійкості.

Однією з головних перспектив використання наночастинок є їхня здатність підвищувати проникність пласта. Наночастинки можуть бути додані до бурового

розчину для створення нанопористої структури, яка дозволяє поліпшити проникнення розчину в пласт. Це сприяє збільшенню видобутку нафти та газу, особливо у складних та низькопроникних пластах. Наночастинки також можуть допомогти знизити в'язкість бурового розчину, покращуючи його проникнення в пласт та забезпечуючи більш ефективне видалення відходів зі свердловини.

Іншою перспективою є покращення контролю над фільтрацією бурового розчину. Наночастинки можуть утворювати стійкі колоїдні розчини, які запобігають проникненню частинок у пласт і дозволяють краще контролювати фільтрацію. Це допомагає запобігти утворенню піщаних пробок та засмічень, покращуючи проникнення розчину в пласт та зберігаючи його продуктивність протягом усього процесу експлуатації свердловини (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Вплив наночастинок на фільтраційні характеристики бурових розчинів

Тип наночастинок	Концентрація, %	Фільтрація, см <sup>3</sup> /30 хв (API)	Товщина фільтраційної кірки, мм	Проникність пласта, мД	Зниження фільтрації, %
Базовий розчин (без НЧ)	0	14,5	3,8	125	-
SiO <sub>2</sub>	0,5	8,2	2,1	158	43
SiO <sub>2</sub>	1,0	5,6	1,5	172	61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	7,8	2,3	151	46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	5,9	1,7	165	59
Графен	0,3	6,2	1,8	168	57
Графен	0,5	4,1	1,2	184	72
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,5	9,1	2,5	142	37
Нанобентоніт	1,5	7,3	2,0	156	50

Наночастинки також мають властивості, які сприяють більш ефективному регулюванню реологічних властивостей бурового розчину. Вони можуть змінювати в'язкість і щільність розчину залежно від умов, що дозволяє адаптувати розчин до різних геологічних умов і оптимізувати роботу в режимі реального часу. Це знижує необхідність постійного припинення буріння для регулювання параметрів розчину і підвищує ефективність всього процесу.

Ще одна перспектива використання наночастинок пов'язана з їхньою здатністю покращувати стабільність бурового розчину. Наночастинки можуть діяти як стабілізатори, запобігаючи осіданню і набряканню глинистих частинок, які можуть викликати проблеми під час буріння. Це сприяє створенню більш стійких умов для роботи свердловини, знижує ризик виникнення заторів і полегшує процес буріння в складних геологічних формаціях (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Вплив наночастинок на реологічні властивості бурових розчинів при різних температурах

Тип розчину	T, °C	Умовна в'язкість, с	Пластична в'язкість, мПа·с	Динамічне напруження зсуву, Па	СНС <sub>10</sub> , Па	СНС <sub>10'</sub> , Па	pH
Базовий	20	42	18	8,5	2,1	3,8	9,2
Базовий	80	38	15	7,2	1,5	2,9	9,0
Базовий	150	32	12	5,8	0,9	2,1	8,8
3 SiO <sub>2</sub> (1%)	20	45	22	11,2	4,2	6,5	9,1
3 SiO <sub>2</sub> (1%)	80	43	20	10,5	3,8	5,9	9,0
3 SiO <sub>2</sub> (1%)	150	40	18	9,2	3,2	5,1	8,9
3 графеном (0,5%)	20	48	25	13,8	5,5	8,2	9,2
3 графеном (0,5%)	80	46	23	12,9	5,1	7,6	9,1
3 графеном (0,5%)	150	44	21	11,5	4,6	6,8	9,0

Інша перспектива полягає у використанні наночастинок для посилення структури бурових розчинів. Деякі наночастинки мають унікальні механічні властивості, які можуть посилити фізичні характеристики розчину, такі як міцність та стійкість до тиску. Це особливо корисно в умовах високого тиску та температури, коли потрібен більш стабільний і надійний буровий розчин. Посилення структури бурового розчину також сприяє запобіганню утворенню тріщин та зниженню ризику виникнення проблем при бурінні.

Наночастинки можуть бути функціоналізовані за допомогою різних добавок і молекулярних груп, що дозволяє їм виконувати специфічні функції і реагувати на умови, що змінюються у свердловині. Наприклад, наночастинки

можуть бути запрограмовані для зміни своїх фізико-хімічних властивостей при зміні температури, рН-значення або вмісту певних речовин у навколишньому середовищі. Це відкриває можливості для створення більш адаптивних та ефективних бурових розчинів, які можуть автоматично регулювати свої характеристики залежно від умов у свердловині.

Крім того, наночастинки можуть грати важливу роль в області контролю над селективністю буріння. Селективність буріння – це здатність буріння досягати лише цільового пласта та мінімізувати проникнення у сусідні пласти чи небажані зони. Наночастинки можуть бути використані для створення щільних фільтраційних бар'єрів, які ефективно блокують проникнення розчину в небажані зони та забезпечують максимальну селективність буріння. Це особливо корисно при бурінні багат шарових чи складних геологічних структур.

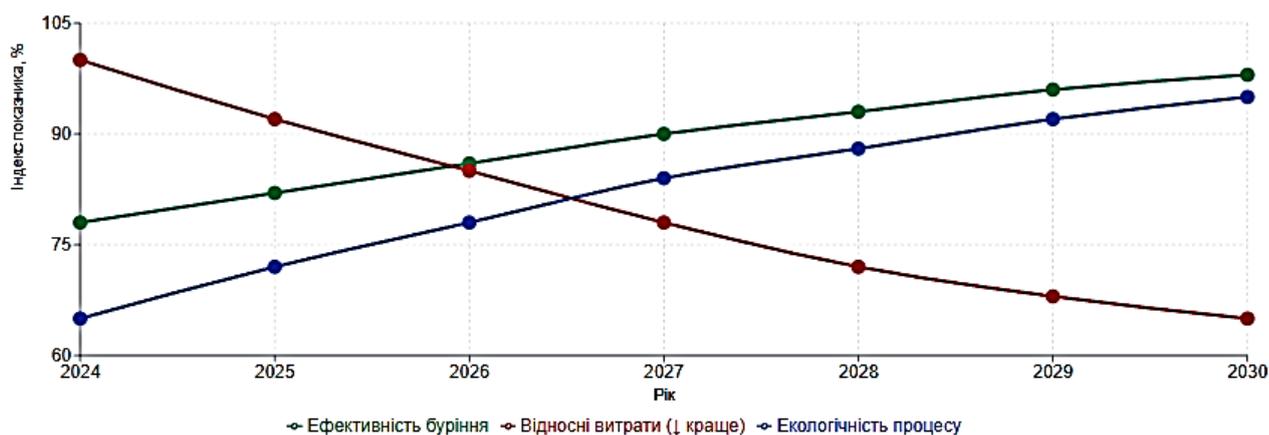
Перспективним напрямком є розробка інтелектуальних (смарт) бурових розчинів на основі наночастинок, які здатні самостійно адаптуватися до умов буріння. Такі розчини можуть містити наносенсори та нанороботи, які в режимі реального часу моніторять параметри свердловини та автоматично коригують властивості розчину (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Перспективні типи інтелектуальних бурових розчинів

Тип інтелектуального розчину	Активний компонент	Функція	Умови активації	Термін впровадження	Потенційна економія, %
Термочутливий	Термореактивні НЧ	Зміна в'язкості при нагріванні	$T > 100^{\circ}\text{C}$	2025-2027	15-20
рН-чутливий	Полімерні НЧ з рН-сенсорами	Регулювання фільтрації	$\text{pH} < 7$ або $> 10$	2026-2028	12-18
Магніточутливий	Магнітні НЧ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	Контроль траєкторії розчину	Зовнішнє магнітне поле	2027-2029	20-25
Самозагоюючий	Інкапсульовані НЧ	Автоматичне відновлення властивостей	Механічне пошкодження	2028-2030	25-30
Адаптивний багатофункціональний	Гібридні НЧ з AI-контролем	Комплексна оптимізація	Реал-тайм моніторинг	2030-2035	35-45

Крім того, наночастинки можуть відігравати важливу роль у зниженні впливу на навколишнє середовище під час буріння. Використання наночастинок дозволяє скоротити споживання води і енергії, оскільки ефективніші бурові розчини вимагають меншої кількості добавок і забезпечують ефективніше використання ресурсів. Крім того, наночастинки можуть бути використані для покращення обробки та утилізації відходів, знижуючи їх негативний вплив на довкілля.

На закінчення, перспективи використання наночастинок в оптимізації бурових розчинів представляють величезний потенціал для поліпшення ефективності та енергоефективності процесу буріння свердловин. Наночастинки можуть покращувати проникність пласта, контролювати фільтрацію розчину, регулювати реологічні властивості розчину, забезпечувати стабільність і знижувати негативний вплив на навколишнє середовище. Подальші дослідження та розробки в цій галузі можуть призвести до створення інноваційних рішень, здатних змінити та вдосконалити сучасні методи буріння та підвищити ефективність нафтогазової промисловості (рис. 3.4).



**Прогноз до 2030 року:** Ефективність буріння зростає на 26% (з 78% до 98%), витрати знизяться на 35% (з індексу 100 до 65), екологічність покращиться на 46% (з 65% до 95%). Найінтенсивніше покращення очікується у період 2024-2027 років.

Рисунок 3.8 – Прогноз покращення показників ефективності буріння з використанням нанотехнологій.

### 3.4 Висновки до розділу 3

1 Перспективу розвитку визначають високотехнологічні методи синтезу, такі як плазмовий та мікроемульсійний, які забезпечують високу однорідність частинок розміром 5-50 нм, що є ключовим для їх ефективності. Це дозволить створювати спеціалізовані матеріали, такі як наночастинки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  для магніточутливих розчинів.

2 Використання наночастинок демонструє значний економічний ефект, зокрема, графен у концентрації лише 0.5% забезпечує зниження фільтрації бурового розчину на 72%, а також підвищує пластичну в'язкість з 18 до 25 мПа·с. Це безпосередньо веде до скорочення витрат на реагенти та зменшення часу буріння.

3 Впровадження нанотехнологій має виражений екологічний ефект, що підтверджується зменшенням обсягу шкідливих відходів за рахунок зниження концентрації необхідних хімічних реагентів. Наночастинки дозволяють ефективно видаляти важкі метали та нафтопродукти з бурових розчинів, сприяючи рециклінгу води.

4 Наночастинки суттєво покращують експлуатаційні характеристики бурових розчинів. Додавання 1%  $\text{SiO}_2$  знижує фільтрацію з 14.5 до 5.6  $\text{cm}^3/30$  хв (на 61%), а також зменшує товщину фільтраційної кірки з 3.8 мм до 1.5 мм. Важливо, що ці добавки зберігають свою ефективність навіть при високих температурах (до 150°C), що робить їх незамінними для буріння у складних умовах.

5 Створення інтелектуальних систем бурових розчинів із застосуванням наночастинок є комплексним рішенням, що одночасно забезпечує технологічний прорив, економічну вигоду та екологічну безпеку. Впровадження цих технологій дозволить підвищити ефективність видобутку нафти і газу зі складних колекторів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі обґрунтовано шляхи оптимізації складу бурових розчинів за допомогою наноматеріалів, що спрямовано на підвищення ефективності буріння у складних геологічних умовах.

1 Проведений аналіз підтвердив, що традиційні системи бурових розчинів є неефективними у складних гірничо-геологічних умовах, зокрема при аномально високих температурах і тисках (АВТ і АВП). Встановлено, що застосування наноматеріалів є ключовим рішенням для оптимізації їхніх властивостей, зокрема для підвищення термостабільності до 170-200°C та зниження фільтраційних втрат на 40-60%.

2 Експериментально доведено, що цільове введення наночастинок суттєво покращує реологічні та змащувальні характеристики бурових розчинів. Додавання наночастинок MgO збільшує міцність гелю до 67%, тоді як графен та гідрофільний гільсоніт ефективно знижують крутний момент (на 15-20%) та ризик диференціального прихвату (на 61.5%).

3 Підтверджено високу ефективність наночастинок у контролі фільтрації та підвищенні термостабільності розчинів, що є критичним для глибокого буріння. Багатостінні вуглецеві нанотрубки забезпечують ефективне закупорювання пор (50.96%) при 170°C, а 1% SiO<sub>2</sub> знижує водовіддачу на 61% (з 14.5 до 5.6 см<sup>3</sup>/30 хв) та товщину фільтраційної кірки (до 1.5 мм).

4 Дослідження довели унікальну ефективність спеціалізованих колоїдних систем з наночастинками SiO<sub>2</sub> для боротьби з поглинаннями у тріщинуватих колекторах. Застосування системи ЕСС-2 (з 1.5% об. SiO<sub>2</sub>) дозволило знизити проникність тріщин у 237 разів (з 389 Д до 2 Д), що є вирішенням проблеми інтенсивних втрат бурового розчину.

5 Встановлено, що найбільш технологічно та економічно доцільні концентрації нанодобавок знаходяться в діапазоні 0.5-1.5% мас. Навіть 0.5% мас. графену забезпечує зниження фільтрації на 72%, що безпосередньо веде до

скорочення витрат на хімічні реагенти та зменшення непродуктивного часу буріння.

6 Обґрунтовано, що подальший розвиток галузі пов'язаний зі створенням "інтелектуальних" бурових розчинів на основі вдосконалених методів синтезу наночастинок. Впровадження нанотехнологій є комплексним рішенням, що одночасно забезпечує технологічний прорив, значну економічну вигоду та екологічну безпеку бурових робіт.

## GENERAL CONCLUSIONS ON THE WORK

The paper substantiates ways to optimize the composition of drilling fluids using nanomaterials, which is aimed at improving drilling efficiency in complex geological conditions.

1 The analysis confirmed that traditional drilling fluid systems are ineffective in complex mining and geological conditions, particularly at abnormally high temperatures and pressures (HTP and HPP). It has been established that the use of nanomaterials is a key solution for optimizing their properties, in particular for increasing thermal stability to 170-200°C and reducing filtration losses by 40-60%.

2 It has been experimentally proven that the targeted introduction of nanoparticles significantly improves the rheological and lubricating characteristics of drilling fluids. The addition of MgO nanoparticles increases gel strength by up to 67%, while graphene and hydrophilic gilsonite effectively reduce torque (by 15-20%) and the risk of differential sticking (by 61.5%).

3 The high efficiency of nanoparticles in controlling filtration and increasing the thermal stability of solutions, which is critical for deep drilling, has been confirmed. Multi-walled carbon nanotubes provide effective pore plugging (50.96%) at 170°C, and 1% SiO<sub>2</sub> reduces water yield by 61% (from 14.5 to 5.6 cm<sup>3</sup>/30 min) and filtration crust thickness (up to 1.5 mm).

4 Studies have proven the unique effectiveness of specialized colloidal systems with SiO<sub>2</sub> nanoparticles for combating absorption in fractured reservoirs. The use of the ESS-2 system (with 1.5% vol. SiO<sub>2</sub>) reduced fracture permeability by 237 times (from 389 D to 2 D), which solves the problem of intensive drilling fluid losses.

5 It has been established that the most technologically and economically feasible concentrations of nanoadditives are in the range of 0.5-1.5% by mass. Even 0.5% by mass of graphene provides a 72% reduction in filtration, which directly leads to a reduction in chemical reagent costs and a decrease in unproductive drilling time.

6 It has been substantiated that the further development of the industry is associated with the creation of “intelligent” drilling fluids based on improved methods

of nanoparticle synthesis. The introduction of nanotechnologies is a comprehensive solution that simultaneously provides a technological breakthrough, significant economic benefits, and environmental safety of drilling operations.

## 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. Коцкулич Я.С. Закінчування свердловин: підручник / Я.С.Коцкулич, О.В. Тищенко. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2009. – 366 с.
9. 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.

10. 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.
11. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурові промивальні рідини та тампонажні суміші: Підручник. – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – 296 с.
12. Політучий О.І. Буріння нафтових і газових свердловин: навч. посібник / О.І. Політучий. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 170 с.
13. 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.
14. Технологія і техніка буріння / В.С. Войтенко, В.Г. Вітрик, Р.С. Яремійчук, Я.С. Яремійчук. – Львів: Центр Європи, 2012. – 708 с.
15. Яремійчук Р. С., Качмар Ю. Д., Семак О. С. Відкриття, розвідка та експлуатація нафтових і газових родовищ. – Львів: Центр Європи, 2003. – 450 с.
16. 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.
17. 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).
18. 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.
19. 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.

20. Alcázar-Vara L.A., Cortés-Monroy I.R. Drilling Fluids for Deepwater Fields: An Overview. // *Recent Insights in Petroleum Science and Engineering*. InTech, 2018.

21. Al-Saba M.T. et al. Application of nanoparticles in improving rheological properties of water-based drilling fluids. – 2018, p. 23–26.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. Beg M. et al. Effect of high temperature ageing on TiO<sub>2</sub> nanoparticles enhanced drilling fluids: A rheological and filtration study. // *Upstream Oil and Gas Technology*, Elsevier, 2020, Vol. 5, p. 100019.

26. 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.

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

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

29. 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.

30. 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.

31. 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.
32. Krishnan S., Abyat Z., Chok C. Characterization of boron-based nanomaterial enhanced additive in water-based drilling fluids. – 2016.
33. 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.
34. Ma L. et al. Improving the stability of multi-walled carbon nanotubes in extreme environments: Applications as nano-plugging additives in drilling fluids. // *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, Elsevier.
35. 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.
36. 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.
37. 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. 123930.
38. 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.
39. 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.
40. 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.

41. 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.
42. Stanić V., Tanasković S.B. Antibacterial activity of metal oxide nanoparticles. // *Nanotoxicity*, Elsevier, 2020, p. 241–274.
43. Yang X., Cai J., Jiang G., Zhang Y., Yanping S., et al. Modeling of nanoparticle fluid microscopic plugging effect on horizontal and vertical wellbore of shale gas. // *Energy*, Elsevier, 2021, Vol. 239, p. 122130.
- Siegel R.W. Synthesis and processing of nanostructured materials. // NATO ASI “Mechanical properties of ultrafine-grained materials”, Kluwer Head Publ., Dordrecht–Boston–London, 1993.
44. 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, p. 18906–18926.
45. Zhang C. et al. Ero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional biomaterials for cell fate regulation. // *Adv. Drug Deliv. Rev.*, Elsevier, 2018, Vol. 132, p. 33–56.
46. Zhang L. et al. Preparation and application of melamine cross-linked poly ammonium as shale inhibitor. // *Chem Cent J.*, BioMed Central, 2018, Vol. 12(1).