

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

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

Гарант освітньої програми
Харченко М.О.

«22» 01 2026 року

Завідувач кафедри буріння та геології
Винников Ю.Л.

«22» 01 2026 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Удосконалення техніки та технології кулькострумінного буріння свердловин

Пояснювальна записка

Керівник

к.т.н., доцент

кафедри буріння та геології

Харченко М.О.

посада, наук. ступінь, ПІБ

підпис, дата

Виконавець роботи

студент група 601-НБ

Лактіонов Іван 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

Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри буріння та геології
Винников Ю.Л.

« 3 » 09 20 25 року

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

Лактіонов Іван Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення техніки та технології кулькострумного буріння свердловин

2. Керівник роботи доц. кафедри буріння та геології, доц., к.т.н. Харченко М.О.

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

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

3. Строк подання студентом роботи 23.01.2026р.

4. Вихідні дані до роботи

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

2. Проєкти на влаштування свердловин (за необхідності).

3. Геологічні звіти за профілем роботи (за необхідності)

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

Анотація

Вступ

1. Аналітичний огляд літературних джерел та сучасного стану досліджуваної проблеми

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

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

Загальні висновки по роботі

Список використаних джерел

Додатки (за необхідності)

6. Перелік графічного матеріалу

Презентація із основними результатами кваліфікаційної роботи

7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання приймає
1	Л. М. Яков	Закорюк А. М.	
2	Л. М. Яков	Мокеш О. В.	
3	Л. М. Яков	Мокеш О. В.	

8. Дата видачі завдання 3.09.2015р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Етапи підготовки	Термін виконання
1	Аналіз літературних джерел та сучасного стану проблеми	13.10.15 - 02.11.15
2	Формування мети, задач, обґрунтування об'єкта і предмета дослідження	03.11.15 - 16.12.15
3	Виконання основної частини роботи (розрахунки / експерименти / аналіз)	17.12.15 - 28.01.16
4	Узагальнення результатів, формування висновків	29.12.15 - 05.01.16
5	Оформлення та узгодження кваліфікаційної роботи	06.01.16 - 12.01.16
6	Попередній захист кваліфікаційної роботи	13.01.16 - 15.01.16
7	Захист кваліфікаційної роботи	19.01.16 - 23.01.16

Студент


(підпис)

Лактіонов І.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Харченко М.О.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ANOTATION	4
ВСТУП.....	5
INTRODUCTION.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Історія розвитку та становлення кулькоструминного способу буріння свердловин	Ошибка! Закладка не определена.
1.1 Історія розвитку та становлення кулькоструминного способу буріння свердловин	10
1.2 Огляд конструкцій кулькоструминно-ежекторних бурових снарядів.....	15
1.3 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження.....	19
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ КУЛЬКОСТРУМИННОГО БУРІННЯ	21
2.1. Аналіз факторів, що визначають ефективність буріння	21
2.2 Розробка уловлювально-підживлювального пристрою	24
2.3 Розробка вибійного кулькоживильника.....	27
2.4 Розробка складного затримувального пристрою.....	30
2.5 Розробка технології підтримки відстані між снарядом та вибоєм.....	33
2.6 Висновки по розділу 2	36
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КУЛЬКОСТРУМИННОГО БУРІННЯ	38
3.1 Лабораторний стенд для проведення досліджень	38
3.2 Методика проведення експериментальних досліджень	44
3.3 Дослідження впливу технологічних параметрів на ефективність кулькоструминного буріння	48
3.4 Дослідження впливу геометричних параметрів бурового снаряда на ефективність кулькоструминного буріння	57

3.5	Аналіз результатів експериментальних досліджень. Висновки та рекомендації.....	68
3.6	Висновки до розділу 3	75
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
	GENERAL CONCLUSIONS ON THE WORK	79
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

АНОТАЦІЯ

Лактіонов І.С. Удосконалення техніки та технології кулькоструминного буріння свердловин. Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава; Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – 2026.

Роботу присвячено удосконаленню техніки та технології кулькоструминного буріння свердловин – перспективного методу руйнування порід, який поєднує гідродинамічну дію струменя рідини та кінетичну енергію сталевих куль. Актуальність роботи зумовлена потребою підвищення механічної швидкості буріння, продовження ресурсу бурового інструменту та покращення рейсових показників у складних гірських породах.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан розвитку кулькоструминного буріння, історію формування цього напрямку та оглянуто конструктивні схеми кулькоструминно-ежекторних бурових снарядів..

Другий розділ містить теоретичні дослідження факторів, що визначають ефективність кулькоструминного способу буріння. Запропоновано й обґрунтовано ряд технічних рішень: удосконалений уловлювально-підживлювальний пристрій, конструкцію вибійного кулькоживильника, складний затримувальний механізм та технологію підтримання оптимальної відстані між снарядом і вибоєм.

У третьому розділі описано лабораторний стенд, розроблену методику експериментів та результати досліджень впливу технологічних та геометричних параметрів струминного апарату на об'єм руйнування породи. На основі отриманих даних сформовано практичні рекомендації щодо вибору конструктивних та режимних параметрів.

Ключові слова: свердловина, куля, ежекція, буровий снаряд, геометрія струминного апарату, дослідження, інтенсивність руйнування порід.

ANOTATION

Laktionov I.S. Improvement of the Technique and Technology of Ball-Jet Drilling of Wells. Master's Qualification Thesis, specialty 185 Oil and Gas Engineering and Technologies. – Poltava: National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, 2026.

This Master's thesis is devoted to improving the technique and technology of ball-jet drilling – a promising rock-destroying method that combines the hydrodynamic action of a fluid jet with the kinetic energy of steel balls. The relevance of the work is determined by the need to increase mechanical drilling speed, extend the service life of downhole tools, and improve run performance in hard and complex formations.

The first chapter analyzes the current state and historical development of ball-jet drilling, as well as reviews the main design schemes of ball-jet ejector drilling tools.

The second chapter presents theoretical research on the factors affecting the efficiency of ball-jet drilling. A number of technical solutions are proposed and substantiated, including an improved catcher-feeder device, a bottomhole ball feeder, an advanced retention mechanism, and a method of maintaining the optimal distance between the tool and the bottomhole.

The third chapter describes the laboratory test bench, the developed experimental methodology, and the results of studying the influence of technological and geometric parameters of the jet apparatus on the rock destruction volume. Based on the obtained data, practical recommendations were formulated regarding the selection of structural and operational parameters.

Keywords: wellbore, ball, ejection, drilling tool, jet apparatus geometry, research, rock destruction intensity.

ВСТУП

Актуальність теми. Сфера буріння в Україні традиційно має стратегічне значення, оскільки забезпечує видобуток власних вуглеводнів та енергетичну безпеку держави. Розвиток свердловин буриться як на старих, виснажених родовищах, так і на складних за геологічними умовами глибоких горизонтах Дніпровсько-Донецької западини. У таких умовах постає потреба у технологіях, що забезпечують високу продуктивність та зниження витрат на буріння.

Кулькоструминне буріння розглядається як перспективний напрям підвищення механічної швидкості руйнування гірських порід, особливо у складних геолого-технічних умовах, де традиційні способи буріння демонструють низьку ефективність. Поєднання гідродинамічної дії високошвидкісного струменя та кінетичної енергії сталевих куль дозволяє забезпечити інтенсивне руйнування породи без значних осьових навантажень на бурильну колону та долото. Це відкриває можливість збільшення тривалості рейсу, зниження аварійності та підвищення ресурсу бурового інструменту.

Попри наявність значної кількості досліджень, промислове впровадження кулькоструминного методу залишається обмеженим через недостатню вивченість впливу технологічних і геометричних параметрів на ефективність процесу. Існуючі конструкції бурових снарядів не забезпечують стабільної циркуляції куль та оптимальної взаємодії з вибоєм. Також відсутня універсальна методика вибору основних параметрів струминного апарату.

Тому дослідження, спрямовані на удосконалення техніки кулькоструминного буріння, узагальнення експериментальних даних і розробку рекомендацій щодо вибору оптимальних режимів та конструктивних рішень, є актуальними.

Метою роботи є підвищення ефективності кулькоструминного буріння шляхом обґрунтування оптимальних технологічних режимів та удосконалення конструкції бурового снаряда.

Основні завдання дослідження:

– Проаналізувати сучасний стан розвитку кулькоструминного буріння та розглянути існуючі конструкції кулькоструминно-ежекторних бурових снарядів.

– Систематизувати основні фактори, що впливають на ефективність кулькоструминного руйнування породи, та визначити ключові напрями удосконалення конструкції снарядів.

– Опрацювати та узагальнити експериментальні дані, отримані у лабораторних дослідженнях, для визначення впливу технологічних і геометричних параметрів на об'єм руйнування породи.

– Здійснити порівняльний аналіз варіантів конструктивних рішень та обґрунтувати їх ефективність.

– На основі аналітичної обробки та узагальнення експериментальних результатів сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних режимних і конструктивних параметрів кулькоструминного буріння.

Об'єктом дослідження є процес руйнування гірських порід під дією кулькоструминного бурового снаряда.

Предметом дослідження є вплив технологічних та геометричних параметрів кулькоструминного снаряда на ефективність руйнування породи.

Наукова новизна роботи – отримано подальшого розвитку науково обґрунтований алгоритм вибору оптимальних режимів кулькоструминного буріння.

Практична цінність роботи – запропоновані рекомендації можуть бути використані для попереднього налаштування та проектування кулькоструминно-ежекторних снарядів, що дозволяє підвищити швидкість буріння та зменшити знос елементів інструменту.

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

87 сторінках, у тому числі 84 сторінках основного тексту, 37 рисунків, 28 таблиць, 50 списку використаних джерел.

INTRODUCTION

Relevance of the topic. The drilling sector in Ukraine traditionally holds strategic importance, as it ensures the extraction of domestic hydrocarbons and strengthens the country's energy security. Well construction is carried out both on depleted mature fields and on complex deep horizons of the Dnieper–Donets Basin. Under such conditions, there is a growing demand for technologies capable of providing high productivity while reducing drilling costs.

Ball-jet drilling is considered a promising method for increasing the mechanical rate of rock destruction, especially in complex geological and technical conditions where traditional rotary techniques show limited efficiency. The combination of the hydrodynamic impact of a high-velocity fluid jet and the kinetic energy of steel balls enables intensive rock destruction without significant axial loads on the drill string and bit. This opens opportunities for extending bit run duration, reducing failure rates, and increasing tool life.

Despite numerous studies, industrial implementation of the ball-jet method remains limited due to insufficient understanding of how technological and geometric parameters affect drilling efficiency. Existing downhole tools do not ensure stable ball circulation or optimal interaction with the borehole bottom. Furthermore, no universal methodology for selecting the main parameters of a ball-jet device has been established.

Therefore, research aimed at improving the equipment and technology of ball-jet drilling, generalizing experimental data, and developing recommendations for selecting optimal operating regimes and structural solutions is relevant and practically significant for enhancing drilling efficiency in hard formations.

The aim of the work is to increase the efficiency of ball-jet drilling by substantiating optimal technological regimes and improving the design of the drilling tool.

The main research objectives are:

– To analyse the current state of ball-jet drilling development and review existing designs of ball-jet ejector drilling tools.

– To systematize the main factors influencing the efficiency of ball-jet rock destruction and determine key directions for improving tool design.

– To process and generalize experimental data obtained from laboratory studies in order to evaluate the influence of technological and geometric parameters on the volume of rock destruction.

– To conduct a comparative analysis of structural design options and substantiate their efficiency.

– To develop recommendations for selecting optimal technological and structural parameters of ball-jet drilling based on analytical processing and generalization of experimental results.

The object of the study is the process of rock destruction under the action of a ball-jet drilling tool.

The subject of the study is the influence of technological and geometric parameters of a ball-jet tool on the efficiency of rock destruction.

Scientific novelty of the work lies in the formulation of a scientifically justified algorithm for selecting optimal regimes of ball-jet drilling.

Practical significance of the work is that the proposed recommendations can be used for preliminary adjustment and design of ball-jet ejector drilling tools, enabling an increase in drilling rates and a reduction in tool wear.

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

Structure of the work. The Master's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references. The total volume is 87 pages, including 84 pages of main text, 37 figures, 28 tables, and 50 references.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Історія розвитку та становлення кулькоструминного способу буріння свердловин

Кулькоструминний спосіб буріння вперше був запропонований у 1955 році вченими американської нафтової компанії Carter Oil Company. Результати цих досліджень висвітлено у роботах І.Е. Ескеля, Ф.Г. Дейлі, Л.У. Леджервуда [15]. Деякі дані наводяться у роботах А.У. Маккрея та Ф.У. Колі [36]. Метою досліджень була розробка ефективнішого способу буріння нафтових свердловин порівняно з існуючими на той час методами механічного обертального буріння.

У результаті проведення лабораторних досліджень авторами [35, 81] було отримано такі результати:

1. досліджено процеси передачі енергії від рідини до куль та від куль до гірської породи;
2. проведено дослідження впливу геометричних розмірів на характеристики струминного насоса як основної частини гравітаційно-інжекційного бурового снаряда;
3. досліджено вплив витрати рідини, відстані між снарядом та вибоєм, маси порції куль та їх розміру, типу промивної рідини на ефективність кулькоструминного буріння.

На основі результатів лабораторних досліджень було сконструйовано два кулькоструминні снаряди діаметром 228,6 мм. Снаряди мали змінні камери змішування діаметром 89 та 102 мм і набір сопел діаметром від 15,9 до 23,8 мм.

У ході промислових випробувань було пробурено 16,2 м у мрамурі, вапняку та рожевому кварциті із застосуванням води як промивної рідини. У таблиці 1.1 представлені умови проведення випробувань.

Таблиця 1.1 – Умови проведення промислових випробувань

Параметр	Значення
Діаметр снаряда, мм	228,6
Крутний момент, кгс·м	46,4
Осьове навантаження, кгс	736
Частота обертання, об/хв	20
Внутрішній діаметр сопла, мм	22,1
Внутрішній діаметр камери змішування, мм	89
Коефіцієнт ежекції	3,6
Тиск на стояку, МПа	5,05–5,33
Перепад тиску в соплі, МПа	3,9–4,18
Витрата води, л/хв	1970
Діаметр куль, мм	31,8
Маса куль, кг	63,4–86,2

Механічна швидкість буріння під час проходки мармуру склала 2,3 м/год при діаметрі свердловини 292,1 мм, вапняку – 1,2 м/год при діаметрі свердловини 254 мм і рожевого кварциту – 0,14 м/год при діаметрі свердловини 241 мм.

За результатами здійснених робіт було зроблено висновок про можливість «здійснювати руйнування гірських порід із помітною швидкістю, що показує реальність принципів буріння ударами куль. Подальші роботи можуть бути виконані для визначення їх перспективності в умовах промислового виробництва». Однак уже у 1961 році Л.У. Леджервуд, який є одним із учасників проведених досліджень, писав: «Імпульсне кулькове буріння не має практичного застосування. На досягнутому рівні за його допомогою можна руйнувати породи, але з економічного погляду цей процес значно менш вигідний, ніж звичайне обертальне буріння». Деякі вітчизняні дослідники [13], імовірно ґрунтуючись на висновках Л.У. Леджервуда, також характеризували названий ними «ударно-дробовий спосіб буріння» як малоперспективний.

Незважаючи на наведені висновки, з 1963 року в Південно-Казахстанському геологічному управлінні почалися подальші дослідження даного способу буріння, названого кулькоруйнівним (при цьому

породоруйнівний інструмент називався «кулькоруйнівним апаратом»). Аналізуючи результати американських учених, керівник досліджень А.Б. Уваков вказував на їхні не зовсім об'єктивні висновки.

«Американці під час проведення експериментів наголошували на визначенні фізичної суті роботи кулькоструминних апаратів, водночас питанням руйнування гірських порід приділялося не виправдано мало уваги. Унаслідок цього вони зробили очевидну помилку, намагаючись бурити різні за міцністю гірські породи при однаковій швидкості вильоту куль з апарату, що дорівнює 22,8 м/с» [11].

Дослідниками [29] були вирішені наступні питання:

1. запропоновано аналітичні залежності, що характеризують процес руйнування гірських порід при кулькоструминному бурінні;
2. проаналізовано основні фактори, що визначають ефективність кулькоструминного буріння;
3. запропоновано методику розрахунку основних геометричних параметрів снаряда для кулькоруйнівного буріння;
4. запропоновано методику розрахунку основних геометричних параметрів кулькоструминного апарату;
5. розроблено та випробувано у виробничих умовах конструкції кулькоруйнівних апаратів;
6. запропоновано технологію зміни траєкторії свердловини за допомогою використання кулькоструминного бурового снаряда.

Дослідниками встановлено, що під час здійснення буріння кулькоструминним способом для кожної гірської породи потрібна певна швидкість вильоту куль (від 40 до 180 м/с), при якій забезпечується найефективніше руйнування. Механічна швидкість буріння кулькоструминним способом у режимі втомного руйнування гірських порід зі зростанням їх твердості зменшується, а в режимі оптимального руйнування – збільшується. Дана залежність є дуже важливою, оскільки підкреслює доцільність застосування способу буріння міцних гірських порід. При оптимальній

швидкості вильоту кулі вся її кінетична енергія витрачається на об'ємне руйнування гірської породи, і відскок кулі буде мінімальним. Таким чином, мінімізується знос кулькоструминного снаряда. Швидкість проходки при цьому може досягати до 20 м/год у породах VII–XI категорій буримості.

Подальші дослідження кулькоструминного буріння здійснювалися у 90-х роках минулого століття. Результати цих досліджень полягають у наступному:

1. розроблено конструкцію снаряда для кулькоструминного буріння, що має центральну опору та кілька камер змішування і сопел, розташованих по периферії;

2. визначено оптимальні геометричні параметри розробленого кулькоструминного снаряда та технологічні параметри, що забезпечують найбільшу ефективність руйнування гірської породи;

3. запропоновано методику розрахунку параметрів конструкції розробленого кулькоструминного снаряда та технологічних параметрів, що забезпечують найбільшу ефективність руйнування гірської породи.

Проведені випробування показали підвищення величини проходки на долото на 44% та механічної швидкості буріння на 21% порівняно з шарошковими долотами [23]. Буріння кулькоструминним способом здійснювалося в інтервалі свердловини від 500 до 1100 м у породах середньої міцності. Параметри режиму буріння: частота обертання снаряда – 90 об/хв, густина бурового розчину – 1060 кг/м³, осьове навантаження – 10 кН, витрата рідини для промивання – 30 л/с.

Таким чином, можна виділити низку переваг кулькоструминного буріння перед механічним обертальним:

- простота і низька вартість виготовлення кулькоструминного снаряда;
- відсутність необхідності у значному осьовому навантаженні та обертанні снаряда;
- потенційна можливість збільшення тривалості рейсу за рахунок здійснення підживлення куль без додаткових спуско-підйомних операцій;

– збільшення механічної швидкості буріння у твердих гірських породах.

Дані переваги показують принципову можливість буріння кулькоструминним способом та економічну доцільність у певних гірничо-геологічних умовах.

Однак промислове впровадження кулькоструминного способу буріння стримують проблеми, до яких можна віднести:

– низьке значення ККД кулькоструминного буріння, у зв'язку з чим для ефективного руйнування міцних гірських порід необхідне використання потужної насосної техніки;

– відсутність експериментально отриманої інформації про енергоємність руйнування гірських порід кулькоструминним способом;

– недоцільність буріння у сильно тріщинуватих, а також пластичних гірських породах;

– складність підтримання необхідної відстані між снарядом і вибоєм, а також діаметра свердловини;

– труднощі вибору конструкції кулькоструминного апарату для конкретних геологічних умов буріння;

– відсутність єдиної методики розрахунку геометричних параметрів кулькоструминних снарядів та технологічних параметрів режиму буріння.

Зупинимося на термінології цього способу буріння. У США даний спосіб буріння називали «імпульсне кулькове буріння» [35], у Радянському Союзі – «шароструйне буріння» [29], «ударно-дробове буріння» [28], в Україні – «абразивно-механічне ударне буріння» [21, 22].

Терміни «імпульсне кулькове буріння», «абразивно-механічне ударне буріння» є занадто громіздкими, термін «ударно-дробове буріння» вказує на буріння дробом, а не кулями, тому їх застосування не є коректним. На думку автора, найбільш вдалим та найпоширенішим терміном є «кулькоструминне буріння».

Буровий снаряд для реалізації даного способу в США називався «кульковий імпульсний бур зі струминним насосом» [22], «гідромоніторний кульковий імпульсний бур» [35], у СРСР та в Україні – «кулькоструминний апарат», «кулькоструминний снаряд».

Терміни, що характеризують буровий снаряд при кулькоструминному бурінні та використовувалися в США, є громіздкими. Терміни «кулькоруйнівний апарат», «кулькоструминний снаряд», безумовно, є більш вдалими, проте вони не відображають сутність способу, в якому безперервна циркуляція куль у привибійній зоні здійснюється за рахунок процесу ежекції. У зв'язку з вищесказаним у подальшому викладі використовуватиметься термін «кулькоструминно-ежекторний буровий снаряд».

1.2 Огляд конструкцій кулькоструминно-ежекторних бурових снарядів

Способи вирішення проблеми формування периферійної частини вибою свердловини пропонувалися різними дослідниками. Використовувався наступний метод: розраховувалася середня механічна швидкість проходки в певних гірських породах, потім через кожен рівний проміжок часу кулькоструминний апарат опускався на певну величину.

Інші способи вирішення проблеми підтримання необхідної відстані між снарядом і вибоєм були запропоновані в патентних та інших матеріалах:

- використання спеціального пристрою для вимірювання відстані від зрізу струминного апарату до вибою свердловини, виконаного на основі механічного щупа [13] та лічильника кількості куль, що проходять через камеру змішування [10];
- жорстке закріплення струминного апарату щодо механічного озброєння, що руйнує периферійну або центральну частини вибою свердловини;
- різні конструктивні особливості, що ґрунтуються на зміні гідродинамічних умов у привибійній зоні при зміні відстані між снарядом і вибоєм [20];

- використання в конструкції снаряда опорного елемента, що перекочується по вибою, або спеціальних опор.

- Пошук та аналіз патентних матеріалів дозволив виділити низку можливих способів вирішення проблеми забезпечення оптимальної траєкторії руху куль:

- встановлення магніту в нижню частину корпусу струминного апарату, що дозволяє відхиляти кулі, які вилітають із дифузора, до периферії свердловини для швидшого їх підйому;

- різке зменшення площі перерізу снаряда над впускними вікнами, що дозволяє значно знизити швидкість висхідного потоку та направити кулі в камеру змішування для подальшого всмоктування [14];

- утримання куль, що піднімаються висхідним потоком, за допомогою затримувального пристрою, вмонтованого конструктивно в корпус снаряда [4, 9, 12];

- підйом куль за допомогою пари під час використання газоподібних робочих агентів [10, 12].

При використанні механічного озброєння для руйнування периферійної частини вибою свердловини можливе його заклинювання, яке можна ліквідувати або попередити за рахунок можливості відхилення камери змішування під час створення певного значення осьового навантаження [6]. Оскільки на великих глибинах є складність підтримання циліндричної форми свердловини, то компоновання бурильної колони може бути забезпечене калібратором для опрацювання стінок свердловини [4, 24].

У конструкції снаряда, що використовувався американськими дослідниками (рис. 1.1), застосовувалися спеціальні опорні лапи 7. Снаряд розвантажувався на вибій, спираючись на лапи. Таким чином вирішувалася проблема підтримання необхідної відстані між снарядом і вибоєм свердловини під час буріння. Важливою особливістю даного снаряда є утворення «хмари резервних куль» 8 лише на рівні сопла 2.

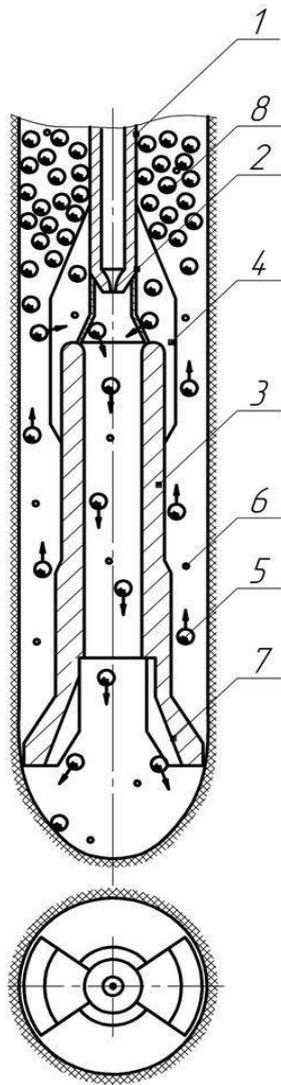


Рисунок 1.1 – «Гравітаційно-інжекційний» буровий снаряд:

1 – колона бурильних труб; 2 – сопло; 3 – камера змішування; 4 – ребра; 5 – породоруйнівні кулі; 6 – шлам вибуреної породи; 7 – лапи; 8 – «хмара резервних куль»

До недоліків конструкції, яку використовували американські дослідники, варто віднести:

- інтенсивний знос опорних лап;
- необхідність обертання снаряда;
- зниження швидкості проходки через перекриття частини вибою;
- необхідність підтримання фіксованої витрати рідини.

У роботі [24] вказується на малу кількість куль у камері змішування (не більше 140 шт/с). У зв'язку з цим був запропонований снаряд із соплом 6 і

камерою змішування 9 кільцевої форми, при цьому центральна частина вибою свердловини руйнується за допомогою опори 8, що закінчується твердосплавними зубцями 11 (рис. 1.2). Така конструкція забезпечує підтримання оптимальної відстані між снарядом і вибоєм у процесі буріння.

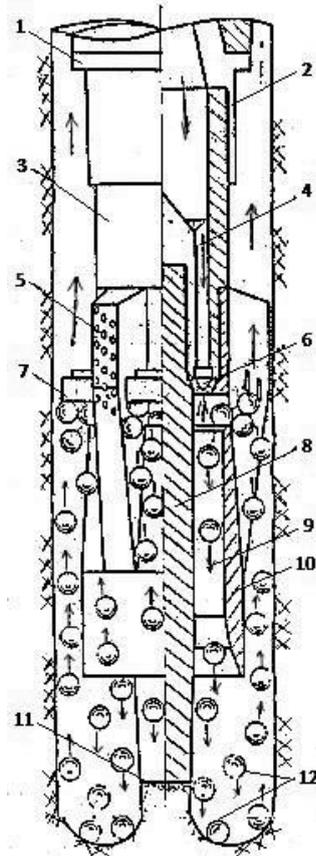


Рисунок 1.2 – Кулькоструминно-ежекторний буровий снаряд із соплом та камерою змішування кільцевої форми:

1 – калібратор; 2 – переключач; 3 – приєднувальна голівка; 4 – підвідні канали для рідини; 5 – калібрувальні-центрувальні ребра; 6 – кільцеве сопло; 7 – затримувальний пристрій; 8 – опора снаряда; 9 – кільцева камера змішування; 10 – корпус снаряда; 11 – твердосплавні зубці; 12 – кулі

Низка авторів вважає ефективною конструкцію кулькоструминно-ежекторного бурового снаряда (КШЕБС), в основі якої лежить струменевий апарат із соплом і камерою змішування циліндричної форми з їх послідовним осьовим розташуванням, при цьому периферійна частина вибою руйнується

механічним озброєнням лопатевого та дробового типів. Однак дані конструкції мають недоліки, пов'язані з комбінованим руйнуванням вибою свердловини: знос механічного озброєння снаряда, необхідність в обертанні та осьовому навантаженні, складність управління процесом буріння.

Аналіз існуючих конструкцій кулькоструминно-ежекторних бурових снарядів показує, що основними напрямками їх удосконалення є: оптимізація геометричних параметрів струминного апарату, забезпечення стабільної відстані між снарядом і вибоєм, підвищення ефективності циркуляції куль у привибійній зоні, зменшення зносу конструктивних елементів снаряда.

1.3 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження

1. Аналіз історії розвитку кулькоструминного способу буріння свердловин показав, що даний метод був запропонований у 1955 році американськими дослідниками компанії Carter Oil Company і пройшов тривалий шлях від початкових експериментів до промислових випробувань. Подальші дослідження радянських та українських учених довели його перспективність для буріння міцних гірських порід VII–XI категорій буримості з можливістю досягнення швидкості проходки до 20 м/год.

2. Встановлено, що ефективність кулькоструминного буріння суттєво залежить від швидкості вильоту куль, яка для кожної гірської породи повинна знаходитися в оптимальному діапазоні від 40 до 180 м/с. При оптимальній швидкості вильоту механічна швидкість буріння у твердих породах збільшується, на відміну від режиму втомного руйнування.

3. Огляд існуючих конструкцій кулькоструминно-ежекторних бурових снарядів виявив основні проблеми їх практичного застосування: складність підтримання оптимальної відстані між снарядом і вибоєм, забезпечення ефективної циркуляції куль у привибійній зоні, знос конструктивних елементів. Американська конструкція з опорними лапами та вітчизняна конструкція з

кільцевим соплом мають свої переваги та недоліки, що потребує подальшого удосконалення конструктивних рішень.

4. Основними перевагами кулькоструминного буріння перед традиційним обертальним є: простота і низька вартість виготовлення снаряда, відсутність необхідності у значному осьовому навантаженні, можливість збільшення тривалості рейсу без додаткових спуско-підйомних операцій.

5. Існуючі конструкції бурових снарядів не забезпечують комплексного вирішення проблем підтримання стабільної відстані до вибою, оптимальної траєкторії руху куль та мінімізації зносу елементів. Це вказує на необхідність розробки нових технічних рішень та удосконалення методик розрахунку геометричних і технологічних параметрів кулькоструминного буріння.

Метою роботи є підвищення ефективності кулькоструминного буріння шляхом обґрунтування оптимальних технологічних режимів та удосконалення конструкції бурового снаряда.

Основні завдання дослідження:

– Проаналізувати сучасний стан розвитку кулькоструминного буріння та розглянути існуючі конструкції кулькоструминно-ежекторних бурових снарядів.

– Систематизувати основні фактори, що впливають на ефективність кулькоструминного руйнування породи, та визначити ключові напрями удосконалення конструкції снарядів.

– Опрацювати та узагальнити експериментальні дані, отримані у лабораторних дослідженнях, для визначення впливу технологічних і геометричних параметрів на об'єм руйнування породи.

– Здійснити порівняльний аналіз варіантів конструктивних рішень та обґрунтувати їх ефективність.

– На основі аналітичної обробки та узагальнення експериментальних результатів сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних режимних і конструктивних параметрів кулькоструминного буріння.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ КУЛЬКОСТРУМИННОГО БУРІННЯ

2.1. Аналіз факторів, що визначають ефективність буріння

Механічна швидкість буріння кулькоструминним способом визначається великою кількістю факторів, які можна класифікувати за чотирма основними групами: властивості гірських порід, геометричні параметри свердловини, геометричні параметри бурового снаряда та технологічні параметри режимів буріння. Розроблена класифікація факторів представлена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 - Класифікація факторів, визначальних ефективність кулькоструминного буріння

Властивості гірських порід є визначальними при оцінці ефективності кулькоструминного буріння. До основних характеристик породи, що впливають на процес руйнування, належать:

- динамічна твердість – опір породи проникненню в неї кулі під дією ударного навантаження;
- модуль пружності – характеристика, що визначає здатність породи до пружної деформації при ударі;
- коефіцієнт Пуассона – параметр, що характеризує поперечну деформацію породи при осьовому навантаженні.

Ці властивості визначають енергоємність руйнування конкретної гірської породи та оптимальні параметри ударної взаємодії куль з вибоєм.

Геометричні параметри свердловини включають:

- діаметр свердловини – визначає кількість куль, що можуть одночасно брати участь у руйнуванні вибою, та впливає на швидкість висхідного потоку;
- глибина свердловини – впливає на гідростатичний тиск у привибійній зоні та умови циркуляції бурового розчину.

Геометричні параметри бурового снаряда є ключовими для оптимізації процесу буріння:

- діаметр сопла – визначає швидкість струменя рідини та, відповідно, швидкість вильоту куль із камери змішування;
- діаметр камери змішування – впливає на ефективність передачі енергії від струменя рідини до куль та на коефіцієнт ежекції;
- зовнішній діаметр бурового снаряда – визначає кільцевий простір між снарядом і стінками свердловини, що впливає на швидкість висхідного потоку та умови циркуляції куль;
- відстань між соплом і верхнім зрізом вікон – характеризує зону змішування активного та пасивного потоків;
- висота технологічних вікон – визначає умови входу куль у камеру змішування;

- довжина камери змішування – впливає на ефективність передачі енергії від рідини до куль;
- кут розкриття дифузора – визначає характер гальмування потоку та перетворення кінетичної енергії в потенціальну;
- кут конусності та пропускна здатність затримувального пристрою – забезпечують утримання куль у привибійній зоні та створення «хмари резервних куль».

Технологічні параметри режиму буріння безпосередньо визначають ефективність руйнування:

- діаметр куль – впливає на кінетичну енергію окремої кулі та характер руйнування породи (крихке або пластичне деформування);
- маса порції куль – визначає кількість куль у привибійній зоні та інтенсивність руйнування вибою;
- матеріал і властивості куль – характеризують міцність куль, їх знос та ефективність передачі енергії породі;
- відстань між долотом і вибоєм – критично важливий параметр, що визначає швидкість вильоту куль та ефективність їх удару по породі;
- витрата бурового розчину – визначає швидкість струменя в соплі, коефіцієнт ежекції та інтенсивність виносу шламу;
- тип і властивості бурового розчину – впливають на в'язкість, густину середовища та умови передачі енергії;
- періодичність розхитування бурового снаряда – може застосовуватися для підтримання оптимальної відстані до вибою.

Усі перелічені фактори взаємопов'язані та комплексно впливають на ефективність кулькоструминного буріння. Зміна одного параметра може призвести до необхідності корекції інших для забезпечення оптимальних умов руйнування породи.

Завдання оптимізації процесу кулькоструминного буріння можна вирішити шляхом знаходження оптимальних геометричних параметрів снаряда та технологічних параметрів режиму буріння. Для цього необхідно

експериментально дослідити вплив найбільш значущих факторів на механічну швидкість буріння та енергоємність процесу руйнування гірських порід.

2.2 Розробка уловлювально-підживлювального пристрою

При значній тривалості рейсу необхідно враховувати фактор зносу куль під час буріння, тому стає необхідною їх періодична заміна. Експериментальні дослідження показують, що знос куль відбувається нерівномірно: найбільш інтенсивно в перші години роботи, коли відбувається згладжування мікронерівностей поверхні, а потім стабілізується на певному рівні.

Висока трудомісткість, низька надійність та значні втрати часу на спуско-підйомні операції при виконанні операцій із заміни зношених куль новими вимагають розробки технічних засобів, що забезпечують підвищення рейсової швидкості буріння. Так, можлива розробка пристрою, здатного поряд із заміною зношених куль новими опускати кулі на вибій і піднімати їх із вибою свердловини разом з буровим снарядом без виконання повного циклу спуско-підйомних операцій. Виходячи з цільового призначення пропонованого пристрою, назвемо його уловлювально-підживлювальним пристроєм (УПП).

Принципова конструкція пропонованого пристрою представлена на рисунку 2.2. Пристрій являє собою модульну конструкцію, що складається із складаного затримувального пристрою, знімних кулькоуловлювача і кулькоживильника, які, у свою чергу, з'єднуються з кулькоструминним апаратом.

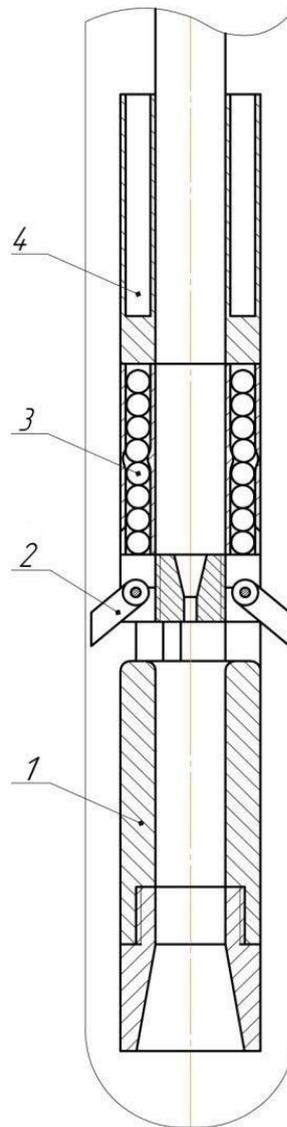


Рисунок 2.2 – Схема компонування низу бурильної колони з уловлювально-підживлювальним пристроєм: 1 – буровий снаряд; 2 – затримувальний пристрій; 3 – вібійний кулькоживильник; 4 – вібійний кулькоуловлювач

Перевагами модульної конструкції є:

- можливість взаємозамінності елементів залежно від діаметра свердловини та умов буріння;
- можливість багаторазового складання/розбирання та зміни місця розташування окремих модулів у компонуванні бурильної колони;
- зручність при транспортуванні, зберіганні та монтажі;
- можливість оперативного ремонту та заміни окремих вузлів без демонтажу всієї системи;

- адаптивність до різних конструкцій кулькоструминних снарядів.

Принцип роботи УПП полягає у виконанні наступної послідовності технологічних операцій:

1. Спуск представленого компонування низу бурильної колони до вибою свердловини (при цьому затримувальний пристрій знаходиться в транспортному положенні, а його елементи притиснуті до корпусу снаряда).

2. Вплив на вибійний кулькоживильник з метою подачі на вибій першої порції куль. Це здійснюється шляхом механічного або гідравлічного впливу на запірний механізм ємності з кулями.

3. Вплив на затримувальний пристрій (ЗП), переведення його в робоче положення. При цьому розкриваються пелюстки або інші елементи, що перекривають шлях кулям у затрубний простір.

4. Процес буріння до появи ознак надмірного зносу куль. Ознаками можуть бути: зниження механічної швидкості буріння, зменшення перепаду тиску на снаряді, зміна характеру вібрацій.

5. Вплив на ЗП, переведення його в транспортне положення (при цьому пелюстки ЗП перекривають технологічні вікна бурового снаряда, блокуючи вихід куль у затрубний простір).

6. Увімкнення бурового насоса з поступовим збільшенням витрати промивної рідини, підйом куль до вибійного кулькоуловлювача, їх уловлювання та фіксація в спеціальній ємності.

7. Вплив на вибійний кулькоживильник, що призводить до висипання другої порції куль на вибій. Маса нової порції куль може бути відрегульована залежно від умов буріння.

8. Вплив на ЗП, переведення його в робоче положення з розкриттям технологічних вікон для циркуляції куль.

9. Увімкнення насоса в штатному режимі, відновлення процесу буріння з новими кулями.

Зважаючи на те, що запропонована схема складається з елементів, що не мають на даний момент технічної реалізації (пристрій для підживлення куль,

складаний затримувальний пристрій), необхідно здійснити розробку їх можливих конструкцій окремо. Кожен з цих елементів повинен забезпечувати надійну роботу в умовах високих динамічних навантажень, абразивного зносу та змінного гідравлічного тиску в свердловині.

Застосування уловлювально-підживлювального пристрою дозволить:

- збільшити тривалість рейсу в 2–3 рази за рахунок можливості заміни куль без підйому снаряда на поверхню;
- зменшити непродуктивні витрати часу на спуско-підйомні операції;
- підвищити рейсову швидкість буріння на 15–25%;
- знизити собівартість буріння за рахунок скорочення допоміжних операцій;
- забезпечити більш рівномірний режим руйнування породи за рахунок своєчасної заміни зношених куль.

2.3 Розробка вибійного кулькоживильника

На першому етапі конструкторських робіт розроблялася конструкція вибійного кулькоживильника. Запропонований вибійний кулькоживильник представлений на рисунку 2.3. Даний пристрій призначений для забезпечення можливості подачі нової порції куль на вибій свердловини без виконання спуско-підйомних операцій, що дозволяє суттєво підвищити ефективність буріння та скоротити непродуктивні витрати часу.

Конструкція кулькоживильника складається з корпусу 1, який з'єднується з колоною бурильних труб 2 та кулькоструминно-ежекторним буровим снарядом (КШЕБС) 3. У середині корпусу розташований рухомий елемент 4, що може переміщуватися в осьовому напрямку. Рухомий елемент утримується в крайньому верхньому положенні за допомогою пружини 9, яка забезпечує необхідне зусилля для герметизації центрального каналу 7 у нормальному режимі роботи. У верхній частині рухомого елемента виконане сидло 5 для посадки запірної клапана 6. Відсік для розміщення куль 10 виконаний у вигляді

кільцевої порожнини навколо центрального каналу корпусу, що дозволяє максимально використати наявний простір для зберігання куль.

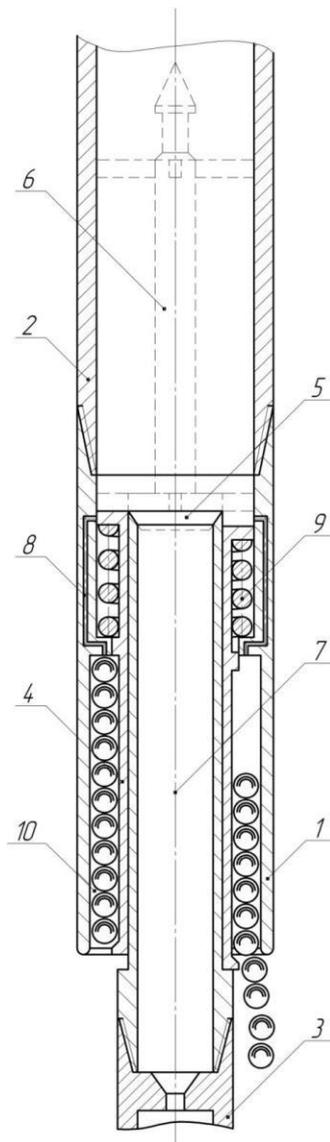


Рисунок 2.3 – Вибійний кулькоживильник:

1 – корпус; 2 – колона бурильних труб; 3 – КШЕБС; 4 – рухомий елемент; 5 – сідло; 6 – запірний клапан; 7 – центральний канал; 8 – перепускний канал; 9 – пружина; 10 – відсік для розміщення куль

Принцип роботи кулькоживильника полягає в наступному. Перед спуском кулькоживильника у свердловину у відсік для розміщення куль 10 засипається розрахована порція куль, маса якої визначається конкретними умовами буріння та характеристиками гірських порід. У процесі буріння через центральний канал

корпусу 7 прокачують буровий розчин, який забезпечує циркуляцію в системі та виконує функції промивання свердловини. Рухомий елемент 4 утримується в крайньому верхньому положенні пружиною 9, при цьому перепускний канал 8 перекритий, а кулі надійно утримуються у відсіку.

Для здійснення підживлення куль без зупинки циркуляції бурового розчину з гирла свердловини в колону бурильних труб 2 скидають запірний клапан 6. Клапан під дією сили тяжіння та потоку бурового розчину опускається вниз по колоні труб і сідає в сідло 5, перекриваючи центральний канал 7. За рахунок зростання тиску бурового розчину над рухомим елементом пружина 9 буде стискатися, і рухомий елемент 4 переміститься в крайнє нижнє положення. При цьому відкривається перепускний канал 8, що з'єднує центральний канал із відсіком для розміщення куль.

Завдяки впливу сил гравітації та тиску бурового розчину, підведеного через перепускний канал 8, кулі висипаються з відсіку для їх розміщення 10 у затрубний простір свердловини. Швидкість висипання куль регулюється діаметром перепускного каналу та перепадом тиску в системі. Після повного висипання куль зупиняється циркуляція бурового розчину, тиск у центральному каналі вирівнюється, при цьому рухомий елемент 4 під дією пружини 9 повертається у вихідне положення, перекриваючи перепускний канал 8.

Запірний клапан 6 вилучається з колони бурильних труб 2 за допомогою овершота, що спускається на канаті. Після вилучення клапана відновлюється прохідність центрального каналу. Далі вмикається буровий насос, циркуляція бурового розчину відновлюється в штатному режимі, і процес буріння продовжується з новою порцією куль на вибої.

Основними перевагами запропонованої конструкції вибійного кулькоживильника є простота конструкції, надійність роботи в умовах високих тисків та температур, можливість багаторазового використання без демонтажу з бурильної колони. Пристрій не має складних рухомих механізмів, що підвищує його надійність та знижує ймовірність відмов. Використання пружинного

механізму забезпечує автоматичне повернення рухомого елемента у вихідне положення після завершення операції підживлення куль.

Ємність відсіку для розміщення куль може бути розрахована виходячи з очікуваної тривалості рейсу, інтенсивності зносу куль та геометричних обмежень конструкції. Для типових умов буріння рекомендується забезпечувати можливість 2-3 циклів підживлення куль без підйому снаряда на поверхню, що дозволяє збільшити загальну тривалість рейсу в кілька разів порівняно з традиційною технологією.

2.4 Розробка складного затримувального пристрою

Було розроблено затримувальний пристрій (ЗП) наступного виду (рис. 2.4). Даний пристрій призначений для керованого утримання куль у привибійній зоні свердловини під час процесу буріння та забезпечення можливості їх вилучення у разі необхідності заміни зношених куль новими.

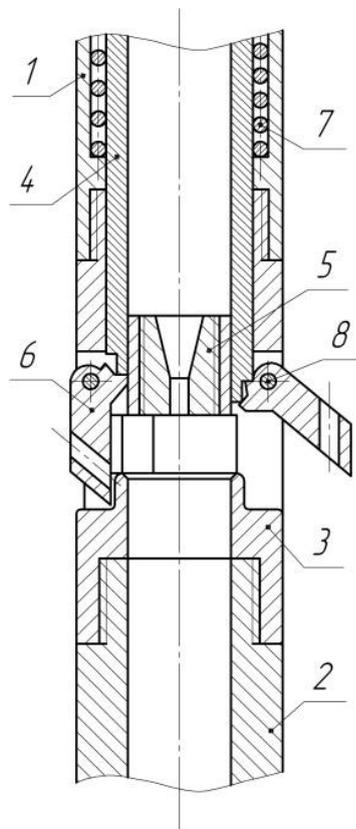


Рисунок 2.4 – ЗП із пелюстками важільного типу, що складаються:

У транспортному положенні пелюстка 6 знаходиться 1 – корпус; 2 – корпус камери змішування; 3 – корпус ЗП; 4 – пружний поршень; 5 – сопло; 6 – пелюстка ЗП; 7 – пружина; 8 – вісь в заглибленні корпусу ЗП 3, що забезпечує компактність конструкції під час спуско-підйомних операцій. На пружний поршень 4 впливає попередньо скинутий запірний клапан, який перекриває центральний канал бурильної колони. Поршень під впливом тиску промивної рідини переміщується в нижнє (робоче) положення. При цьому нижня частина поршня 4 (штовхач) впливає на рухому пелюстку 6 затримувального пристрою 3. Пелюстка розкривається навколо осі 8, і при збігу фіксувального засобу з канавкою наводиться у робоче положення, перекриваючи технологічні вікна бурового снаряда.

Проте даний тип пристрою має наступні недоліки, виявлені під час аналізу конструкції:

- стоншення стінки в місці паза для пелюстки, що внаслідок зношування може призвести до руйнування корпусу та втрати працездатності пристрою;
- ненадійність і трудомісткість складання пелюсток такого типу, що ускладнює ремонт та обслуговування;
- відсутність способу зняття з фіксованого положення без пошкодження фіксувального засобу, що знижує ресурс використання;
- засмічення рухомих елементів та пазів корпусу шламом, у яких у транспортному положенні розташовуються пелюстки, що може призвести до заклинювання механізму.

Також слід зазначити, що у цьому варіанті при опусканні поршня пелюстки ЗП розкриваються. Однак технологічно зручнішим було б їх складання при впливі поршня. Це зумовлено тим, що основним робочим положенням ЗП є «розкриті» (коли кулі вільно циркулюють у привибійній зоні), а закриватися пелюстки повинні лише за необхідності вилучення та підживлення куль. Таке рішення дозволяє зменшити кількість операцій керування пристроєм та спростити технологічний процес.

У зв'язку з цим було вирішено змінити напрямок руху пелюсток при опусканні поршня шляхом додавання проміжних елементів передачі руху. На рисунку 2.5 наведено ЗП шестерневого типу, механізм якого розроблений за аналогією з багаступінчастим механічним розширювачем [10].

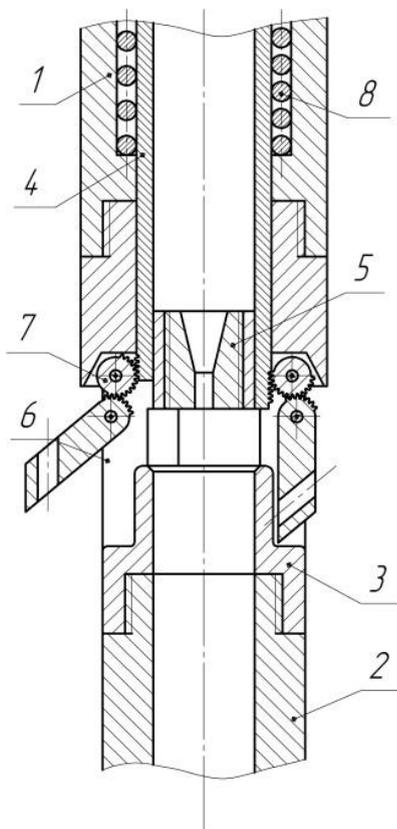


Рисунок 2.5 – ЗП із пелюстками, що складаються, шестерневого типу: 1 – корпус; 2 – корпус камери змішування; 3 – корпус ЗП; 4 – пружний поршень; 5 – сопло; 6 – пелюстка; 7 – проміжне колесо; 8 – пружина; 9 – вісь

Принцип дії даної конструкції полягає в наступному. Шток поршня 4 впливає на проміжне колесо 7, яке служить для зміни напрямку обертання пелюстки 6. При опусканні штока проміжне колесо обертається в одному напрямку, передаючи крутний момент на зубчасту передачу пелюстки, яка обертається в протилежному напрямку. Таким чином, пелюстки складаються всередину корпусу, перекриваючи технологічні вікна та блокуючи вихід куль у затрубний простір. При підйомі штока відбувається зворотний процес, і пелюстки розкриваються, відновлюючи циркуляцію куль.

Можливі варіанти виконання штока із зубчастими рейками та з черв'яком. Причому черв'ячна передача має ефект самогальмування і є незворотною: якщо прикласти момент до веденої ланки (черв'ячного колеса), через сили тертя в черв'ячній парі передача працювати не буде. Таким чином, забезпечується надійна фіксація ЗП у робочому положенні без необхідності використання додаткових фіксаторів. У випадку із зубчастими рейками фіксація теж здійсненна за рахунок тертя в зубчастій передачі та пружини, але з меншим ступенем надійності порівняно з черв'ячною передачею.

Основними перевагами запропонованої конструкції ЗП шестерневого типу є: підвищена надійність механізму завдяки відсутності глибоких пазів у корпусі, можливість самогальмування при використанні черв'ячної передачі, зручність технологічного процесу через складання пелюсток при впливі штока, зменшення ризику засмічення механізму шламом. Конструкція забезпечує можливість багаторазового циклування без значного зносу елементів та дозволяє ефективно керувати процесом циркуляції куль у привибійній зоні свердловини.

Розрахунок геометричних параметрів зубчастих передач здійснюється виходячи з необхідного кута повороту пелюсток, діаметра свердловини та конструктивних обмежень корпусу затримувального пристрою. Передаточне відношення механізму підбирається таким чином, щоб забезпечити повне закриття технологічних вікон при опусканні поршня на розрахункову відстань.

2.5 Розробка технології підтримки відстані між снарядом та вибоєм

Однією з найважливіших проблем при кулькоструминному бурінні є завдання підтримання необхідної відстані між снарядом та вибоєм свердловини. Від величини цієї відстані залежить швидкість вильоту куль із камери змішування, а отже, і ефективність руйнування гірської породи. При занадто малій відстані кулі не встигають набрати оптимальної швидкості, а при занадто великій – втрачають значну частину кінетичної енергії на подолання опору рідини.

Американські дослідники вирішували цю проблему за допомогою використання опорних елементів, на які розвантажувався буровий снаряд. Цей спосіб призводить до інтенсивної деформації бурового снаряда та куль під дією осового навантаження при контакті із вибоєм свердловини. Крім того, опорні елементи схильні до швидкого зносу в умовах абразивного середовища та високих динамічних навантажень, що знижує надійність та тривалість експлуатації снаряда.

Радянські вчені запропонували спосіб, заснований на періодичному розвантаженні бурового снаряда на вибій. У процесі буріння снаряд періодично розвантажувався на вибій і піднімався на необхідну величину. Цю технологію теж не можна вважати оптимальною, оскільки вона ускладнює технологію буріння та вимагає постійного контролю з боку бурильника. Крім того, існує ймовірність надмірного розвантаження снаряда на вибій, що може призвести до його деформації або пошкодження окремих елементів конструкції.

Під час проведення експериментальних досліджень автором встановлено, що інтенсивність циркуляції куль у камері змішування залежить від відстані між снарядом і вибоєм. При оптимальній відстані спостерігається максимальна кількість куль, що всмоктуються через впускні вікна. Таким чином, потрібну відстань можна контролювати за допомогою фіксації поточного значення інтенсивності циркуляції куль. На підставі цього спостереження автором запропоновано схему підтримання оптимальної відстані, представлену на рисунку 2.6.

Спосіб здійснюється наступним чином. На вибій свердловини засипають порцію куль 6, спускають буровий снаряд, насосом подається промивна рідина. Робоча рідина, що підводиться до апарату, прискорюється в соплі 3 і на виході з нього вливається з великою швидкістю в камеру змішування 4. При цьому в просторі між соплом 3 і камерою змішування 4 утворюється зона розрідження завдяки ежекційному ефекту. Завдяки розрідженню відбувається всмоктування робочої рідини із завислими кулями 6 із затрубного простору через впускні вікна в корпусі камери змішування.

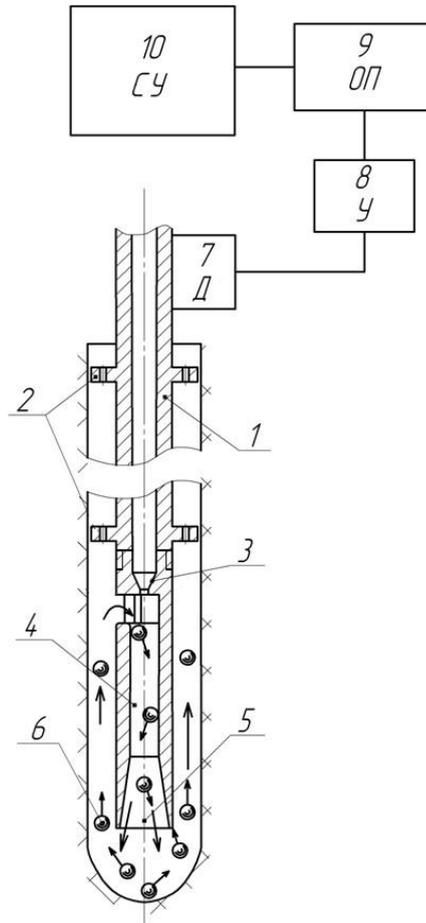


Рисунок 2.6 – Схема підтримання відстані між снарядом та вибоєм за допомогою датчика пружних коливань:

1 – колона бурильних труб; 2 – центратори; 3 – сопло; 4 – камера змішування; 5 – дифузор; 6 – породоруйнівні кулі; 7 – датчик пружних коливань; 8 – підсилювач; 9 – осцилографічна приставка; 10 – система управління

Потім двофазна суміш проходить через камеру змішування 4 і дифузор 5 і ударяється об гірську породу, здійснюючи її руйнування. У процесі циркуляції в привибійній зоні свердловини кулі постійно взаємодіють із буровим снарядом, внаслідок чого в колоні бурильних труб формуються поздовжні хвилі деформації. Ці хвилі виникають внаслідок відскоку куль від вибою свердловини та їх ударів об елементи бурового снаряда. Амплітуда та частота цих коливань залежать від інтенсивності циркуляції куль, яка, у свою чергу, визначається відстанню між снарядом і вибоєм.

Пружні коливання, що формуються, передаються по колоні бурильних труб 1 на гирло свердловини, де реєструються датчиком акустичних коливань 7. Сигнал від датчика посилюється за допомогою підсилювача 8 і за допомогою осцилографічної приставки 9 направляється в систему управління 10. Завдання системи управління полягає в тому, щоб передавати керуючий вплив на лебідку та буровий інструмент виходячи з отриманого сигналу. При зменшенні амплітуди коливань нижче порогового значення система подає команду на опускання бурильної колони, при перевищенні верхнього порогу – на підйом.

Таким чином, визначення в процесі буріння значення амплітуди акустичних сигналів дозволяє оперативно підтримувати потрібну відстань між снарядом та вибоєм в автоматичному режимі. Дана технологія має низку переваг: відсутність необхідності в опорних елементах, що зношуються; можливість автоматичного регулювання відстані без участі бурильника; підвищення ефективності буріння за рахунок постійного підтримання оптимальних умов роботи снаряда; зменшення ризику деформації снаряда через виключення прямого контакту з вибоєм.

Для практичної реалізації даної технології необхідно провести калібрування системи для конкретних умов буріння, визначити порогові значення амплітуди коливань, що відповідають оптимальній відстані, та забезпечити надійну роботу датчиків в умовах вібрацій та завад від роботи бурового обладнання.

2.6 Висновки до розділу 2

1 Систематизовано фактори, що визначають ефективність кулькоструминного буріння, за чотирма основними групами: властивості гірських порід, геометричні параметри свердловини, геометричні параметри бурового снаряда та технологічні параметри режиму буріння. Встановлено, що для оптимізації процесу буріння необхідно експериментально дослідити вплив найбільш значущих факторів, зокрема геометричних параметрів снаряда та

технологічних параметрів режиму буріння.

2 Використання уловлювально-підживлювального пристрою (УПП) може дозволити здійснювати заміну зношених куль без виконання повного циклу спуско-підйомних операцій, що є перспективним напрямком для підвищення рейсової швидкості буріння.

3 Проаналізовано два варіанти конструкції складного затримувального пристрою: важільного типу та шестерневого типу. Виявлено основні недоліки конструкції важільного типу (стоншення стінок корпусу, засмічення шламом, трудність складання) та запропоновано конструкцію шестерневого типу з використанням проміжного колеса для зміни напрямку руху пелюсток, що забезпечує їх складання при опусканні штока відповідно до технологічних вимог.

4 Технологія підтримання оптимальної відстані між снарядом та вибоєм на основі реєстрації пружних коливань у бурильній колоні за допомогою датчика акустичних коливань на гирлі свердловини – дозволяє виключити необхідність використання опорних елементів та забезпечити можливість автоматичного регулювання відстані на основі аналізу амплітуди сигналів, що формуються внаслідок взаємодії куль з вибоєм і снарядом.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КУЛЬКОСТРУМИННОГО БУРІННЯ

3.1 Лабораторний стенд для проведення досліджень

З метою експериментального вивчення процесів кулькоструминного буріння, а також для кількісної оцінки впливу основних технологічних і геометричних параметрів на інтенсивність руйнування гірських порід, було розроблено та виготовлено спеціалізований лабораторний стенд у масштабованому виконанні. Конструкція стенду забезпечує можливість відтворення основних гідродинамічних і механічних умов, характерних для реального буріння свердловин, у контрольованих лабораторних умовах.

Під час проектування лабораторного стенду були сформульовані та реалізовані такі основні вимоги:

- забезпечення замкненого циклу циркуляції робочої рідини з метою імітації процесів промивання свердловини;
- наявність системи очищення робочої рідини від продуктів руйнування породи (шламу) для запобігання пошкодженню насосного обладнання;
- можливість надійного закріплення зразків гірських порід з оперативною їх заміною;
- забезпечення умов для візуального контролю та відеофіксації процесів всмоктування і циркуляції куль у привибійній зоні;
- реалізація плавного регулювання витрати робочої рідини в широкому діапазоні значень;
- можливість точного задання та зміни відстані між буровим снарядом і зразком породи з одночасним плавним опусканням інструменту в модель свердловини в процесі її поглиблення;
- надійне центрування бурового снаряда з метою виключення ексцентриситету та спотворення результатів досліджень.

Принципова схема лабораторного стенду наведена на рисунку 3.1.

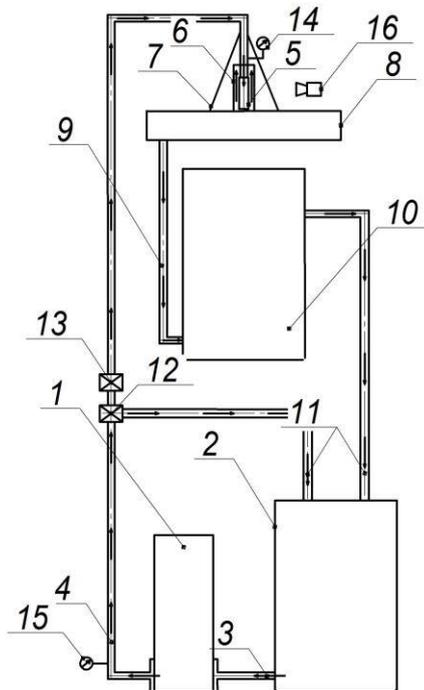


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного стенду:

1 – насос; 2 – зливна ємність; 3 – всмоктувальна магістраль; 4 – нагнітальна магістраль; 5 – кулькоструминно-ежекторний буровий снаряд; 6 – стакан; 7 – механізм подачі снаряда; 8 – піддон; 9 – зливна магістраль; 10 – відстійник; 11 – зворотна магістраль; 12 – триходовий кран; 13 – витратомір; 14, 15 – манометри; 16 – відеокамера

Лабораторний стенд виконано у вигляді замкненої гідравлічної системи циркуляції промивної рідини. Робоча рідина насосом 1 подається через нагнітальну магістраль 4 до кулькоструминно-ежекторного бурового снаряда 5, положення якого в осьовому напрямку регулюється за допомогою механізму подачі 7. Рідина, відбита від вибою разом із продуктами руйнування породи, піднімається по стакану 6, що виконує функцію моделі свердловини та забезпечує можливість спостереження за процесами руху куль і виносу шламу.

Після виходу зі стакана потік робочої рідини зі шламом надходить у піддон 8, звідки по зливній магістралі 9 спрямовується у відстійник 10. У відстійнику відбувається осадження твердих частинок під дією сил тяжіння. Очищена рідина

самопливом через зворотну магістраль 11 повертається у зливну ємність 2, після чого знову закачується насосом, забезпечуючи безперервний режим роботи стенду.

Регулювання витрати робочої рідини, яка контролюється витратоміром 13, здійснюється за допомогою триходового крана 12, встановленого на напірній магістралі. Частина потоку може бути спрямована безпосередньо у зливну ємність, минаючи буровий снаряд, що дозволяє змінювати витрату в широкому діапазоні без коригування режиму роботи насоса. Для контролю гідравлічних параметрів у напірній магістралі після насоса та перед снарядом встановлено манометри 14 і 15, різниця показань яких дає змогу оцінювати втрати тиску та гідравлічний опір системи. Над стаканом змонтовано відеокамеру 16 для реєстрації процесів циркуляції куль і характеру руйнування зразка.

Загальний вигляд лабораторного стенду наведено на рисунку 3.2.

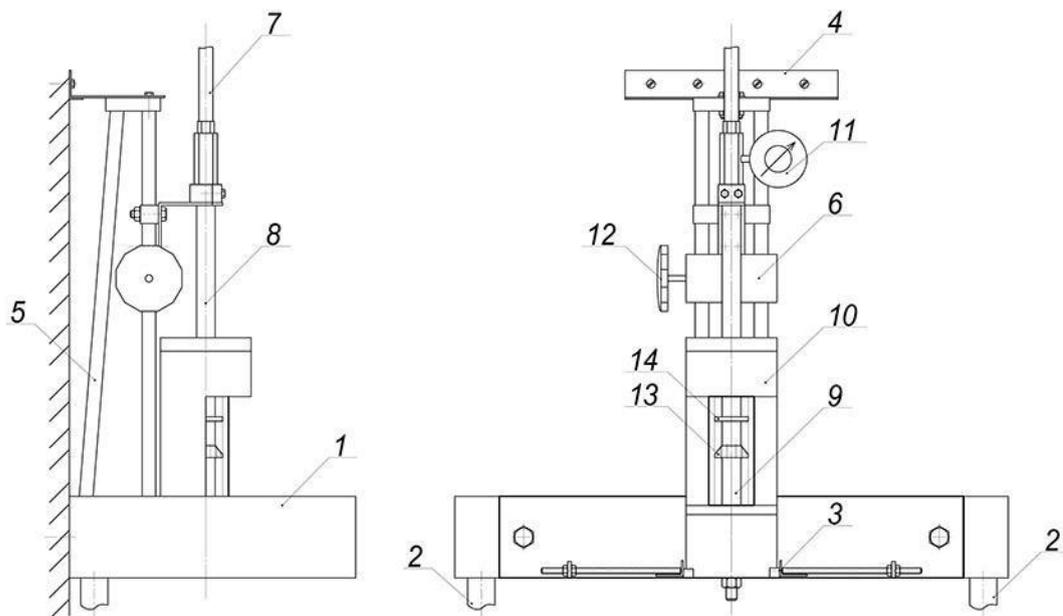


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд лабораторного стенду:

1 – піддон; 2 – зливна магістраль; 3 – затискач стакана; 4 – кронштейн; 5 – вертикальна стійка; 6 – механізм подачі; 7 – напірна магістраль; 8 – перехідник; 9 – кулькоструминно-ежекторний буровий снаряд; 10 – стакан; 11 – манометр; 12 – маховик; 13 – затримувальний пристрій; 14 – центратор.

На піддоні 1 встановлюється стакан 10, який фіксується затискачем 3, що забезпечує надійність кріплення та герметичність з'єднання. Стакан призначений для розміщення зразка гірської породи та проведення візуального спостереження за процесами руху куль у привибійній зоні. До піддона жорстко закріплена вертикальна стійка 5, у верхній частині якої змонтовано кронштейн 4 для встановлення механізму подачі бурового снаряда.

Для забезпечення точної установки відстані між снарядом і зразком породи, а також для реалізації плавного опускання інструменту в процесі руйнування зразка, на стійці змонтовано механізм подачі 6, керування яким здійснюється за допомогою маховика 12. Конструкція механізму дозволяє переміщувати снаряд із дискретністю до 1 мм, що є необхідним для дослідження впливу міжосьової відстані на ефективність руйнування. Подача робочої рідини здійснюється через напірну магістраль 7 та перехідник 8, а контроль тиску безпосередньо перед снарядом здійснюється манометром 11.

Кулькоструминно-ежекторний буровий снаряд 9 оснащений затримувальним пристроєм 13 конічної форми, який забезпечує примусове спрямування куль у технологічні вікна камери змішування та формування так званої «хмари резервних куль» у привибійній зоні. Центратор 14 забезпечує співвісне положення снаряда в стакані та виключає можливість ексцентричного розташування, що могло б негативно вплинути на достовірність експериментальних результатів. Відпрацьована рідина з продуктами руйнування відводиться по зливній магістралі до системи очищення.

Конструкція стакана для встановлення зразків гірських порід і візуального спостереження за рухом куль наведена на рисунку 3.3.

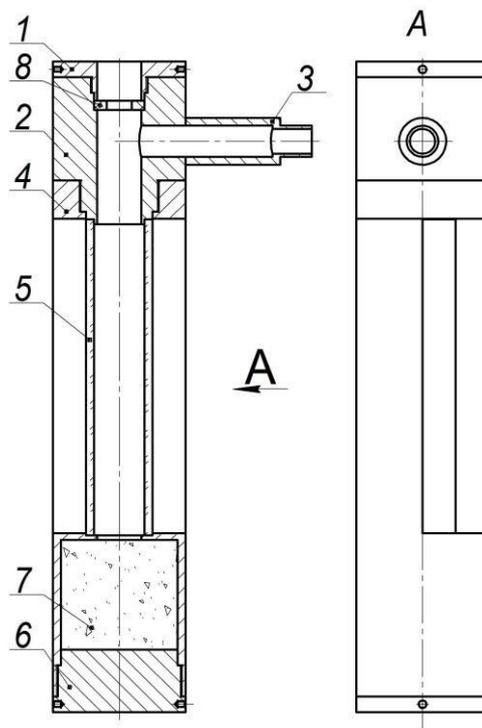


Рисунок 3.3 – Стакан для розміщення зразка гірської породи:

1 – натискна гайка; 2 – верхній циліндр; 3 – відведення рідини; 4 – середній циліндр; 5 – прозора труба; 6 – нижній циліндр; 7 – зразок породи; 8 – манжета.

Стакан має багатокomпонентну конструкцію, що забезпечує можливість надійної фіксації зразків різної висоти та герметичність системи. Зразок гірської породи 7 встановлюється у середній циліндр 4 і підтискається нижнім циліндром 6, що гарантує стабільність його положення під час експерименту. Для спостереження за процесами циркуляції куль у конструкції передбачено оглядове вікно та встановлення прозорої труби 5, яка притискається верхнім циліндром 2. Така конструкція дозволяє візуально контролювати траєкторію руху куль, швидкість їх підйому та особливості взаємодії з елементами снаряда. У верхній частині стакана виконано відведення рідини 3 та передбачено посадкове місце для манжети 8, яка фіксується натискною гайкою 1 та забезпечує герметичне з'єднання з напірною магістраллю.

Для дослідження впливу геометричних параметрів бурового снаряда на ефективність кулькоструминного буріння його конструкцію виконано

модульною (рисунок 3.4), що дозволяє змінювати окремі елементи без повного демонтажу стенду.

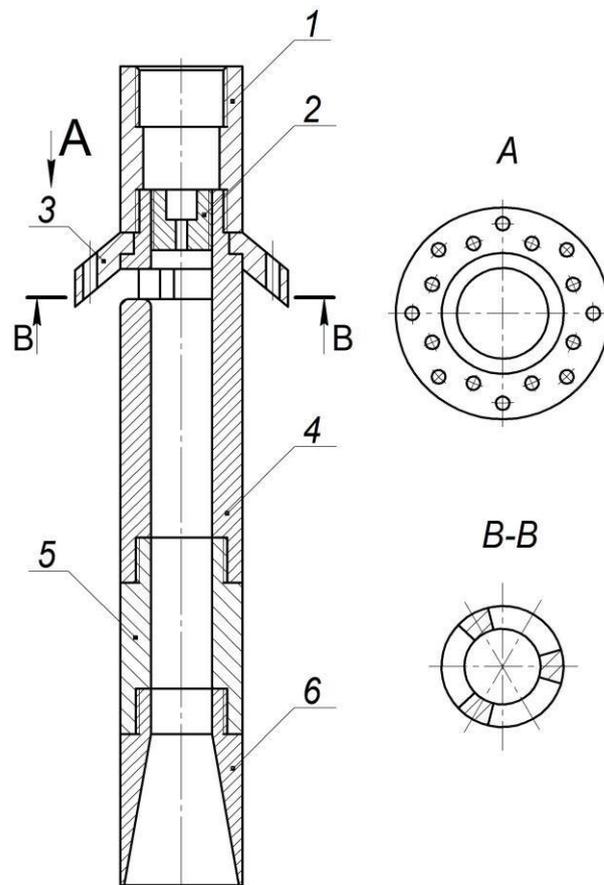


Рисунок 3.4 – Конструкція кулькоструминно-ежекторного бурового снаряда:

1 – перехідник; 2 – змінне сопло; 3 – затримувальний пристрій; 4 – камера всмоктування; 5 – камера змішування; 6 – дифузор.

Буровий снаряд складається з перехідника, що з'єднує його з нагнітальною магістраллю, змінного сопла, затримувального пристрою, камери всмоктування, змінної камери змішування та дифузора. Для проведення експериментів виготовлено комплект сопел діаметром від 3 до 8 мм і камер змішування діаметром від 10 до 20 мм, що дозволило дослідити вплив зазначених параметрів на гідродинамічні характеристики струминного апарата та інтенсивність руйнування гірських порід.

Таким чином, розроблений лабораторний стенд забезпечує можливість проведення комплексних досліджень кулькоструминного буріння з варіюванням

як технологічних параметрів (витрата рідини, відстань між снарядом і вибоєм, маса та діаметр куль), так і геометричних параметрів бурового снаряда. Використання прозорих елементів конструкції у поєднанні з відеореєстрацією процесів дозволяє отримати додаткову інформацію про механізм руйнування породи та особливості циркуляції куль, що має важливе значення для поглибленого розуміння фізичної суті досліджуваного процесу.

3.2 Методика проведення експериментальних досліджень

З метою отримання достовірних і відтворюваних результатів авторами була розроблена спеціальна методика експериментальних досліджень, що передбачає поетапне та регламентоване виконання комплексу операцій.

На початковому етапі напірну магістраль за допомогою різьбових з'єднань приєднували до бурового снаряда. Для запобігання витокам робочої рідини та забезпечення герметичності з'єднань використовували фторопластову ущільнювальну стрічку (ФУМ). Після складання вузлів здійснювали перевірку їх герметичності шляхом подачі рідини під робочим тиском із подальшим візуальним контролем на відсутність протікань.

Наступним етапом виконувалося складання стакана для розміщення зразка породи. Зразок матеріалу, що підлягав руйнуванню, встановлювали в нижній циліндр стакана на опорні диски, після чого він фіксувався шляхом підтискання середнім циліндром під час згвинчування елементів конструкції. Усі початкові параметри експерименту заносилися до «журналу проведення експериментів», у якому фіксували тип і характеристики зразка, діаметр та масу куль, геометричні параметри бурового снаряда, задану витрату робочої рідини та тривалість процесу буріння.

Необхідну масу куль визначеного діаметра зважували на електронних вагах з точністю $\pm 0,1$ г, що забезпечувало високу повторюваність експериментальних умов. Після цього кулі обережно засипали в стакан на

поверхню зразка, уникаючи їх ударів об матеріал для виключення передчасного пошкодження вибою до початку експерименту.

Далі буровий снаряд за допомогою маховика механізму подачі опускали в стакан, який фіксували на піддоні за допомогою затискачів. Положення снаряда відносно модельного вибою встановлювали з використанням шкали на стійці з точністю до ± 1 мм, задаючи необхідну відстань між снарядом і зразком.

Після підготовки установки натисканням кнопки «Пуск» вмикали насос. Із моменту появи струменя рідини зі снаряда запускали секундомір для фіксації тривалості буріння. Упродовж заданого часу здійснювався процес руйнування зразка з періодичним візуальним спостереженням за характером циркуляції куль і механізмом руйнування породи. За потреби виконувалася відеофіксація процесу для подальшого аналізу. Після завершення експерименту насос вимикали кнопкою «Стоп» та фіксували час закінчення буріння.

Після цього буровий снаряд піднімали за допомогою механізму подачі, знімали затискачі та демонтували стакан. Кулі виймали зі стакана, очищували від залишків шламу та вологи сухою ганчіркою й складали в промарковану ємність для зберігання. Далі роз'єднували середній і нижній циліндри стакана, вилучали зразок матеріалу, що зазнав руйнування, та наносили на нього ідентифікаційний номер відповідно до записів у журналі експериментів.

Визначення геометричних параметрів сформованої свердловини в керамічній плитці (рис. 3.5) здійснювали методом зліпка з використанням пластичного матеріалу. Для цього в зону руйнування вдавлювали пластилін, який відтворював форму свердловини. Надлишковий матеріал зрізали лезом для формування рівної верхньої поверхні зліпка, після чого його обережно вилучали. Вимірювали максимальну висоту зліпка, що відповідала глибині свердловини $h_{св}$, а також верхній діаметр, який дорівнював діаметру свердловини $D_{св}$.

Після вилучення зліпок зважували на аналітичних терезах з точністю до 1 мг. З урахуванням відомої густини пластиліну за масою визначали об'єм зліпка $V_{св}$, що відповідав об'єму сформованої свердловини. За необхідності додатково

розраховували лінійну та об'ємну швидкості руйнування, а також аналізували форму зліпка, яка відображала конфігурацію криволінійного вибою

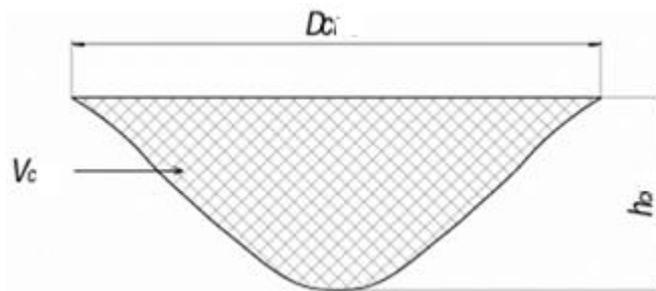


Рисунок 3.5 – Вимірювані геометричні параметри криволінійного вибою

Лінійну швидкість переміщення нижньої точки вибою $V_{\text{лін}}$ та об'ємну швидкість руйнування $V_{\text{об}}$ визначали за співвідношеннями:

$$V_{\text{лін}} = h_{\text{св}}/t \quad (3.1)$$

$$V_{\text{об}} = V_{\text{св}}/t \quad (3.2)$$

де t – час буріння, с;

$h_{\text{св}}$ – глибина свердловини, мм;

$V_{\text{св}}$ – об'єм свердловини, см³.

Для статистичної обробки експериментальних даних використовували формули, наведені в таблиці 3.1, які дозволяли визначити середні значення, дисперсію, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації вимірюваних параметрів.

Буріння свердловин у зразках мармуру здійснювали за методикою, що забезпечувала підтримання постійної оптимальної відстані між буровим снарядом і вибоєм у процесі поглиблення. Після проходження певного інтервалу буровий снаряд короткочасно опускали на вибій, після чого піднімали до заданого положення (рис. 3.6). Процес розхитування виконувався з установленою періодичністю трох, а величину проходки визначали за шкалою на стійці установки.

Таблиця 3.1 – Формули розрахункових параметрів для статистичної обробки експериментальних даних

Розрахунковий параметр	Середнє арифметичне	Дисперсія	Середнє квадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації
Формула	$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$	$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [A_i - \bar{A}]^2$	$\sigma = \sqrt{D}$	$v = \frac{\sigma}{\bar{A}} \cdot 100\%$
де A_i - значення вимірюваного параметра в i -ій серії, n - кількість дослідів				

де A_i – значення вимірюваного параметра в i -й серії дослідів; n – кількість дослідів у серії.

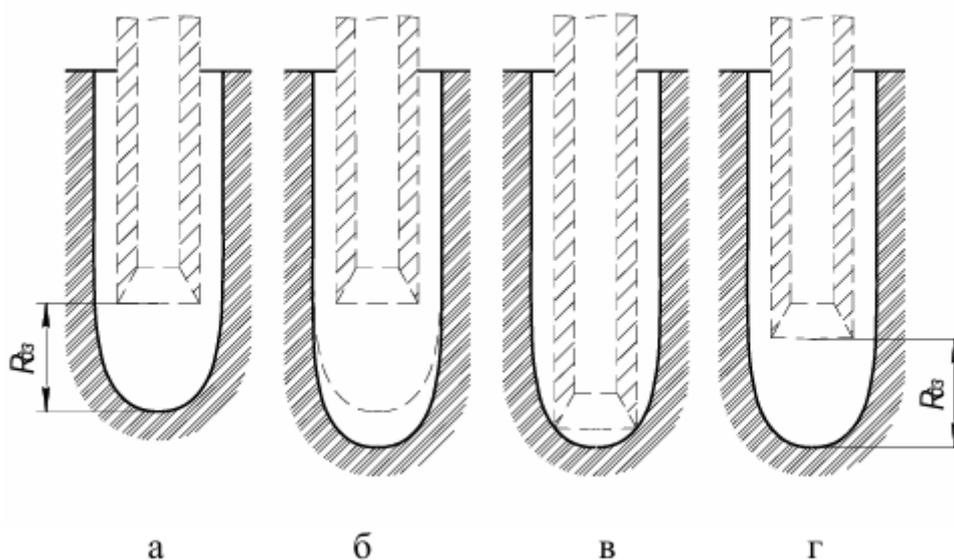


Рисунок 3.6 – Схема підтримання оптимальної відстані між снарядом і вибоєм шляхом розхитування бурового снаряда

Після завершення заданого часу буріння вимірювали геометричні параметри свердловини (рис. 3.7). Для визначення її об'єму свердловину заповнювали водою з мірного циліндра до повного заповнення, при цьому об'єм залитої води відповідав об'єму свердловини. Далі зразок розрізали вздовж осі свердловини на камнерізному верстаті для забезпечення можливості детального вимірювання геометричних параметрів. Визначали діаметр свердловини $D_{св}$, загальну глибину h , а також глибину циліндричної частини $h_{цч}$. Додатково

виконували сканування форми свердловини з метою подальшого аналізу профілю вибою.

Запропонована методика експериментальних досліджень забезпечує високу відтворюваність результатів і дозволяє отримати достовірні дані щодо впливу досліджуваних параметрів на ефективність кулькоструминного буріння. Систематичне документування всіх умов експерименту та застосування методів статистичної обробки даних дають змогу оцінити точність вимірювань і надійність отриманих експериментальних залежностей.

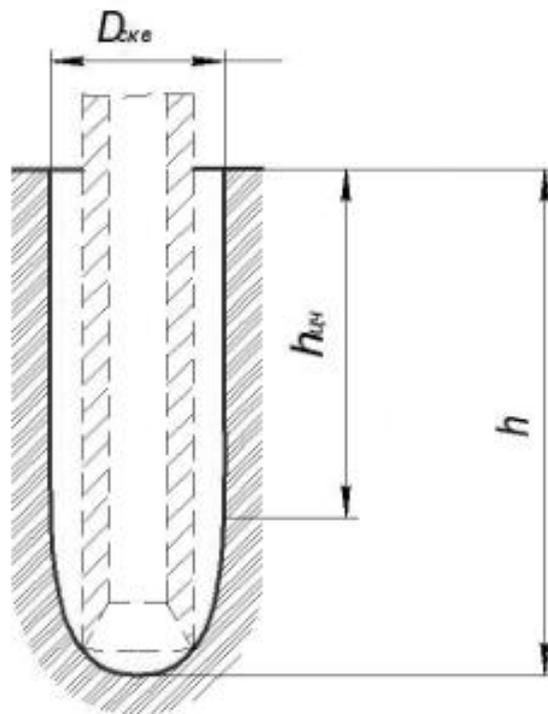


Рисунок 3.7 – Геометричні параметри свердловини:

$D_{св}$ – діаметр свердловини; h – глибина свердловини; $h_{цч}$ – довжина циліндричної частини свердловини

3.3 Дослідження впливу технологічних параметрів на ефективність кулькоструминного буріння

Дослідниками було проведено серію експериментів для визначення впливу основних технологічних параметрів на ефективність кулькоструминного

буріння. Досліджувалися такі параметри: відстань між снарядом і вибоєм, маса порції куль та діаметр куль.

Було проведено дослідження впливу відстані між снарядом і вибоєм на ефективність руйнування при забурюванні свердловини та при бурінні з опусканням бурового снаряда. Вихідні параметри проведення експериментів представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні параметри експериментів з варіювання відстані між снарядом і вибоєм

Параметр	Значення
Діаметр куль $D_{ш}$, мм	3
Маса порції куль $m_{ш}$, г	25
Діаметр сопла d_c , мм	2
Діаметр камери змішування $d_{кз}$, мм	8
Довжина камери змішування $l_{кз}$, мм	82
Кут розкриття дифузора $\alpha_{рд}$, °	10
Час буріння t , хв	2
Витрата рідини на виході із сопла Q , л/хв	6,7
Тиск перед соплом P , МПа	1,0

При забурюванні свердловини у зразках мармуру дослідниками встановлено, що зі збільшенням відстані між снарядом і вибоєм обсяг гірської породи, вибуреної за даний інтервал часу, зменшується (рис. 3.8). Це пояснюється зниженням швидкості вильоту куль із камери змішування внаслідок втрат кінетичної енергії на подолання опору рідини на більшій відстані до вибою.

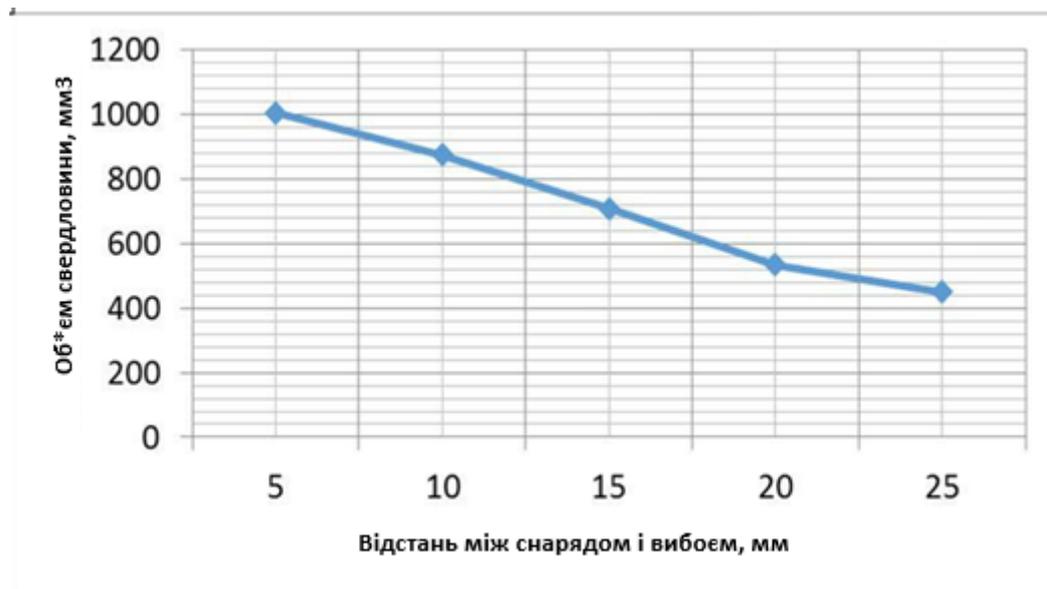


Рисунок 3.8 – Залежність обсягу свердловини від відстані між снарядом і вибоєм при забурюванні свердловини

Зміна форми вибою зі збільшенням відстані між снарядом і вибоєм представлена на рисунку 3.9. Аналіз профілів вибою показує, що при малій відстані (5 мм) формується більш глибока свердловина з чітко вираженою циліндричною частиною. При збільшенні відстані до 25 мм глибина свердловини зменшується, а профіль вибою стає більш пологим.



Рисунок 3.9 – Зміна форми криволінійної частини вибою зі збільшенням відстані між снарядом і вибоєм при забурюванні свердловини

Отримані залежності були підтверджені під час буріння свердловин у зразках мрамору з опусканням бурового снаряда в процесі буріння. Після завершення буріння вимірювалися геометричні параметри свердловин. Отримані результати представлені в таблиці 3.2 та на рисунку 3.10.

Таблиця 3.2 – Результати варіювання відстані між снарядом і вибоєм свердловини

Відстань між снарядом і вибоєм R дз, мм	Геометричні параметри свердловин			
	Об'єм свердловини, мм ³	Діаметр свердловини, мм	Довжина циліндричної частини свердловини, мм	Загальна глибина свердловини, мм
5	31800	25,5	52	69,9
10	29800	26,5	44	61
15	27000	27	36	56,7

Аналіз даних таблиці 3.2 показує, що при збільшенні відстані від 5 до 15 мм обсяг свердловини зменшується на 15%, загальна глибина – на 19%, а довжина циліндричної частини – на 31%. При цьому діаметр свердловини дещо збільшується, що пов'язано з розширенням струменя куль на більшій відстані від снаряда.

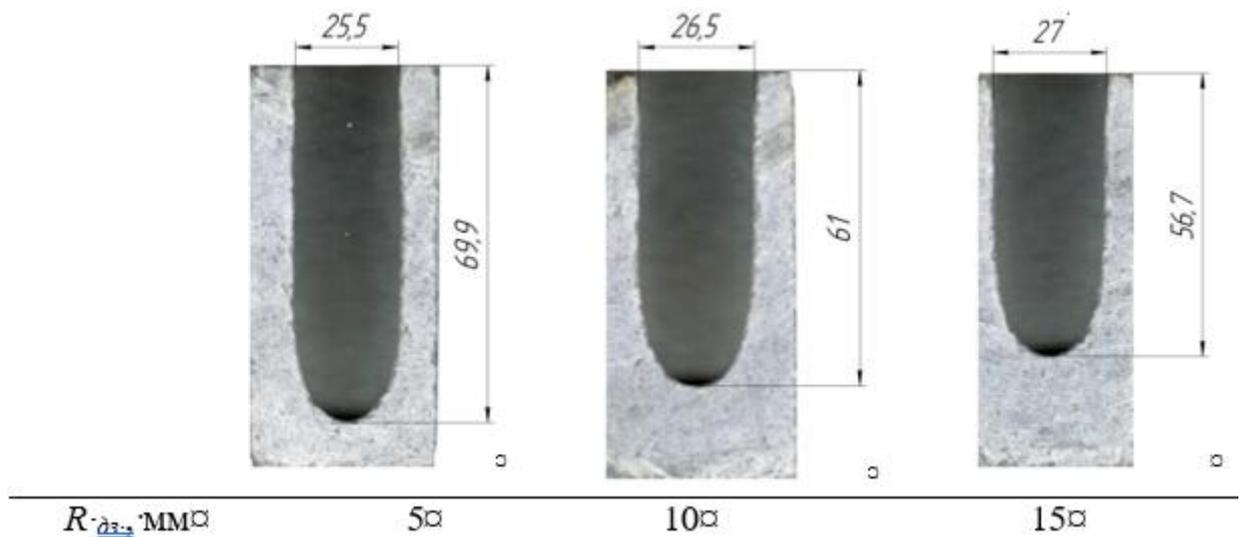


Рисунок 3.10 – Профіль свердловин, пробурених при варіюванні відстані між снарядом і вибоєм свердловини

Високошвидкісна зйомка, проведена дослідниками, дозволила обґрунтувати отримані результати. В області під буровим снарядом спостерігаються скупчення куль, які можуть швидко її покинути і перейти в

затрубний простір. Причому при збільшенні відстані між снарядом і вибоєм кількість таких скупчень більша (рис. 3.11), що призводить до зменшення інтенсивності циркуляції куль у камері змішування.

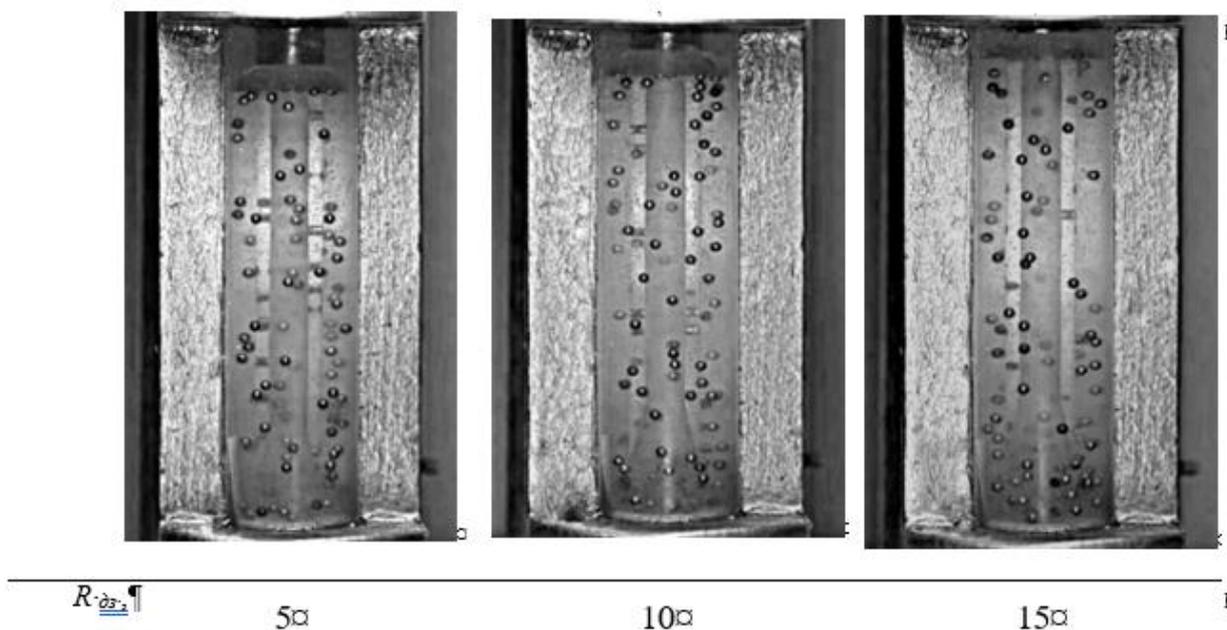


Рисунок 3.11 – Кадри, що ілюструють концентрацію куль у затрубному просторі при варіюванні відстані між снарядом і вибоєм

Взаємодія низхідного та відбитого потоків при малій відстані призводить до того, що кулі, які відскочили від гірської породи, швидше прямують у затрубний простір і всмоктуються через впускні вікна. При великій відстані кулі, що падають вниз, бомбардують кулі, які відскочили від гірської породи, що призводить до їх скупчень під снарядом та зниження ефективності циркуляції.

На наступному етапі дослідниками було проведено дослідження впливу маси порції куль на ефективність руйнування керамічної плитки. Вихідні параметри були збережені згідно з таблицею 3.1. Відстань між снарядом і вибоєм $R_{дз}$ становила 10 мм.

Встановлено, що при збільшенні маси порції куль обсяг породи, вибуреної за даний інтервал часу, спочатку збільшується, досягає максимуму, а потім стрімко падає, що свідчить про наявність оптимального значення маси порції куль для конкретних умов буріння (рис. 3.12). Подальше підвищення маси порції

куль призводить до зниження обсягу вибуреної гірської породи. При надмірному значенні маси порції куль буріння припиняється через заклинювання куль у затрубному просторі.

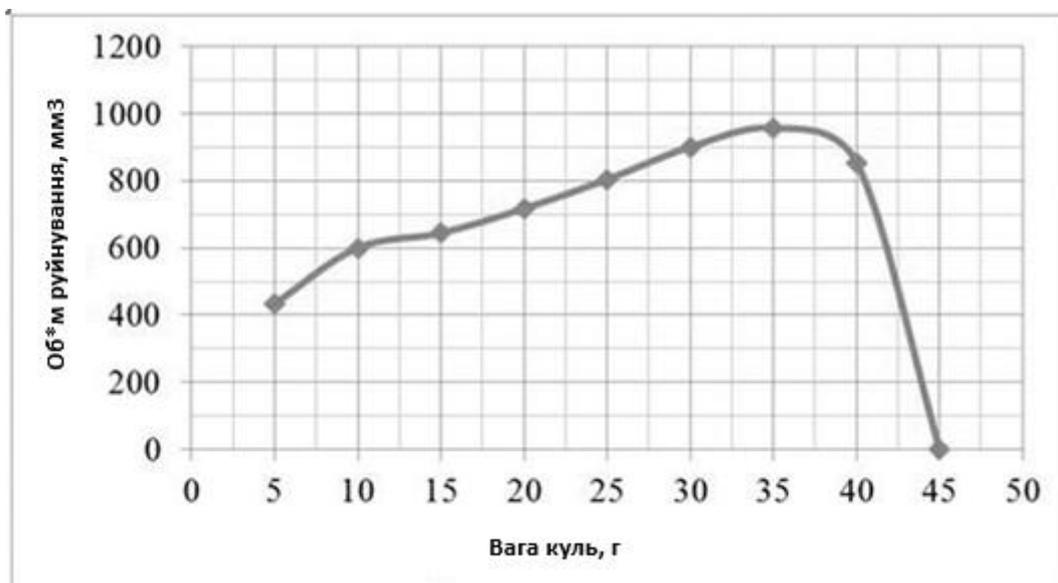


Рисунок 3.12 – Залежність об'єму свердловини від маси порції куль

Аналіз графіка показує, що оптимальна маса порції куль для даних умов становить приблизно 30 г. При масі менше 20 г кількість куль недостатня для ефективного руйнування породи. При масі понад 40 г спостерігається перенасичення привибійної зони кулями, що призводить до їх скупчення та погіршення умов циркуляції.

Дослідження впливу маси порції куль на ефективність руйнування проводилися також при бурінні свердловин у зразках мармуру з опусканням снаряда. Встановлено, що зі збільшенням маси порції куль збільшується діаметр свердловини, її глибина та об'єм (таблиця 3.3). Тобто підтверджуються залежності, отримані при забурюванні свердловин з утворенням криволінійного вибою.

Таблиця 3.3 – Результати варіювання маси порції куль

Маса порції куль $m_{ш}$, г	Об'єм свердловини $V_{св}$, мм ³	Діаметр свердловини $D_{св}$, мм	Довжина циліндричної частини свердловини $h_{цч}$, мм	Загальна глибина свердловини h , мм
10	11900	25,0	20,0	36
20	18000	25,5	30,5	49
30	24000	26,5	42,0	57
40	28500	26,5	48,5	62

Аналіз результатів показує, що при збільшенні маси порції куль від 10 до 40 г обсяг свердловини зростає у 2,4 рази, а глибина – у 1,7 рази. Це свідчить про пряму залежність продуктивності буріння від кількості куль у привибійній зоні в межах до досягнення критичного значення.

Дослідниками була проведена відеореєстрація процесу буріння високошвидкісною камерою. При перевищенні оптимального значення маси порції куль спостерігається їх скупчення перед впускними вікнами під затримувальним пристроєм. При досягненні критичної маси кулі підклинюються під дією притискної сили, що призводить до припинення їх циркуляції та процесу буріння.

Було проведено дослідження впливу діаметра куль на ефективність кулькоструминного буріння при забурюванні свердловини з утворенням криволінійного вибою. У зв'язку з тим, що при використанні куль різних діаметрів оптимальна маса порції куль має різні значення, дослідження проводилися при варіюванні маси порції куль. Вихідними параметрами були: $d_{кз} = 8$ мм, $d_c = 2$ мм, $R_{скс} = 6$ мм, $l_{кз} = 92$ мм, $\alpha_p = 10^\circ$, $R_{дз} = 10$ мм, $Q_c = 6,7$ л/хв, $P_c = 1,1$ МПа, матеріал, що руйнується – керамічна плитка, використовувався конусний затримувальний пристрій.

На рисунку 3.13 представлено графік залежності об'єму свердловини від маси порції куль для куль різного діаметра. При бурінні кулями діаметром 2,5 мм спостерігалися значні їх скупчення в затрубному просторі під затримувальним пристроєм, у зв'язку з чим було прийнято рішення про недоцільність подальшого дослідження з кулями такого діаметра.

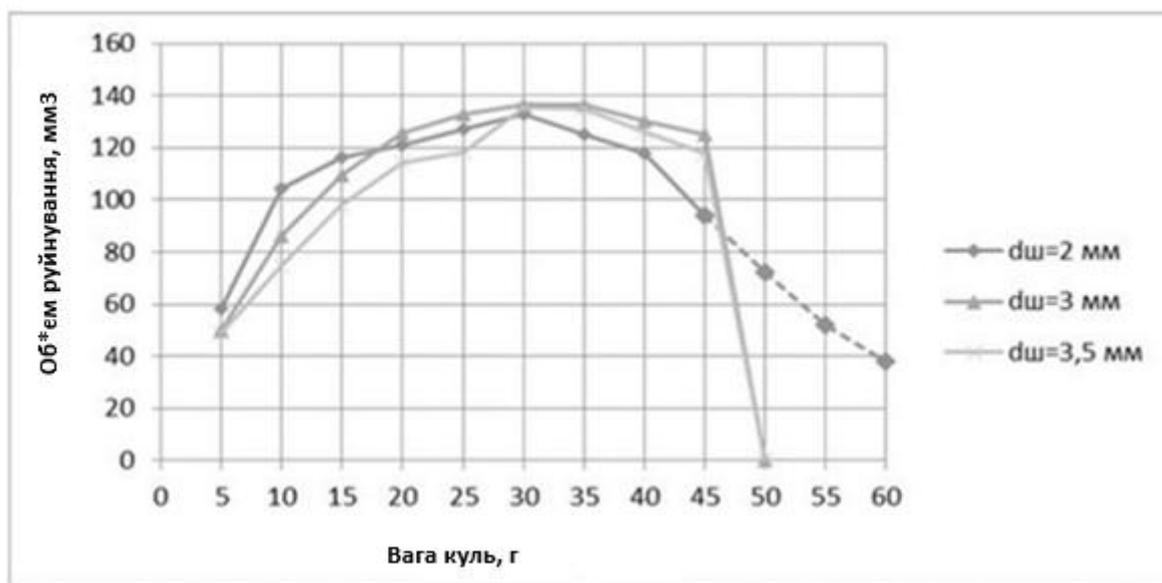


Рисунок 3.13 – Залежність об'єму свердловини від маси порції куль для різних діаметрів куль

Встановлено, що в ряді діаметрів куль 2–3–3,5 мм значення оптимальної маси порції куль має приблизно однакове значення близько 30 г. Діаметр свердловини та її об'єм при оптимальній масі куль у ряді діаметрів 2–3–3,5 мм мають близьку величину, проте спостерігається тенденція до збільшення продуктивності зі зростанням діаметра куль.

Було проведено дослідження впливу діаметра куль на ефективність руйнування мармуру при бурінні свердловин з опусканням снаряда з періодичністю $t_{роз}$. Після закінчення буріння вимірювалися геометричні параметри свердловин (таблиця 3.4) та сканувалася їх форма. Встановлено, що при збільшенні діаметра куль збільшується діаметр свердловини, її глибина та об'єм.

Таблиця 3.4 – Вплив діаметра куль на ефективність кулькоструминного буріння

Діаметр куль $D_{ш}$, мм	Об'єм свердловини $V_{св}$, мм ³	Діаметр свердловини $D_{св}$, мм	Глибина циліндричної частини свердловини $h_{цч}$, мм	Повна глибина свердловини h , мм
2,0	19000	23,0	31,2	49,9
3,0	26600	23,9	41,6	58,7
3,5	29800	25,8	45,8	63,3

Аналіз результатів показує, що при збільшенні діаметра куль від 2,0 до 3,5 мм обсяг свердловини зростає на 57%, а глибина – на 27%. Це свідчить про істотний вплив діаметра куль на ефективність руйнування гірської породи.

Для інтерпретації отриманих результатів дослідниками було проведено високошвидкісну зйомку процесу. Обробка отриманих відеофрагментів дозволила визначити інтенсивність циркуляції та швидкості куль у камері змішування при бурінні кулями різних діаметрів, за якими була розрахована кінетична енергія, якою володіє куля перед зіткненням із вибоєм (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Інтенсивність циркуляції куль та середня швидкість руху куль різного діаметра в камері змішування

Діаметр куль $D_{ш}$, мм	Інтенсивність циркуляції куль $Q_{ш}$, шт/с	Загальна кількість куль, що беруть участь у руйнуванні $N_{ш}$, шт	Середня швидкість руху кулі $V_{ср}$, м/с	Середня кінетична енергія однієї кулі $E_{кін}$ при вильоті з камери змішування, мДж
2,0	1461	304	9,03	2,682
3,0	529	90	7,95	7,023
3,5	252	57	7,48	9,816

Аналіз даних таблиці 3.5 показує, що зі зменшенням діаметра куль інтенсивність їх циркуляції зростає майже в 6 разів (від 252 до 1461 шт/с), але при цьому кінетична енергія окремої кулі зменшується в 3,7 рази. Дослідниками встановлено, що більш важливим фактором для ефективного руйнування є кінетична енергія окремої кулі, ніж їх кількість.

Як видно з отриманих відеофрагментів, зі зменшенням діаметра куль зростає кількість їх зіткнень один з одним і зі снарядом, що призводить до підвищення швидкості їх зношування та зниження ККД кулькоструминного буріння. Кулі меншого діаметра більш схильні до відхилення від оптимальної траєкторії внаслідок взаємних зіткнень, що зменшує ефективність передачі їх кінетичної енергії породі.

3.4 Дослідження впливу геометричних параметрів бурового снаряда на ефективність кулькоструминного буріння

Проведення експериментальних досліджень було складним етапом робіт дослідників у зв'язку з різноманіттям досліджуваних факторів та необхідністю забезпечення відтворюваності результатів. На другому етапі експериментальних досліджень при оптимальних значеннях технологічних параметрів визначалися залежності впливу різних геометричних параметрів кулькоструминно-ежекторного бурового снаряда (рис. 3.14) на ефективність кулькоструминного буріння.

При оптимальних значеннях відстані між снарядом і вибоєм, діаметра та маси порції куль дослідниками було проведено дослідження впливу величини відстані між вихідним перерізом сопла та верхнім зрізом технологічних вікон $R_{\text{сто}}$ на ефективність руйнування керамічної плитки при забурюванні свердловини (рис. 3.15) та мармуру при бурінні свердловин з опусканням бурового снаряда (таблиця 3.16).

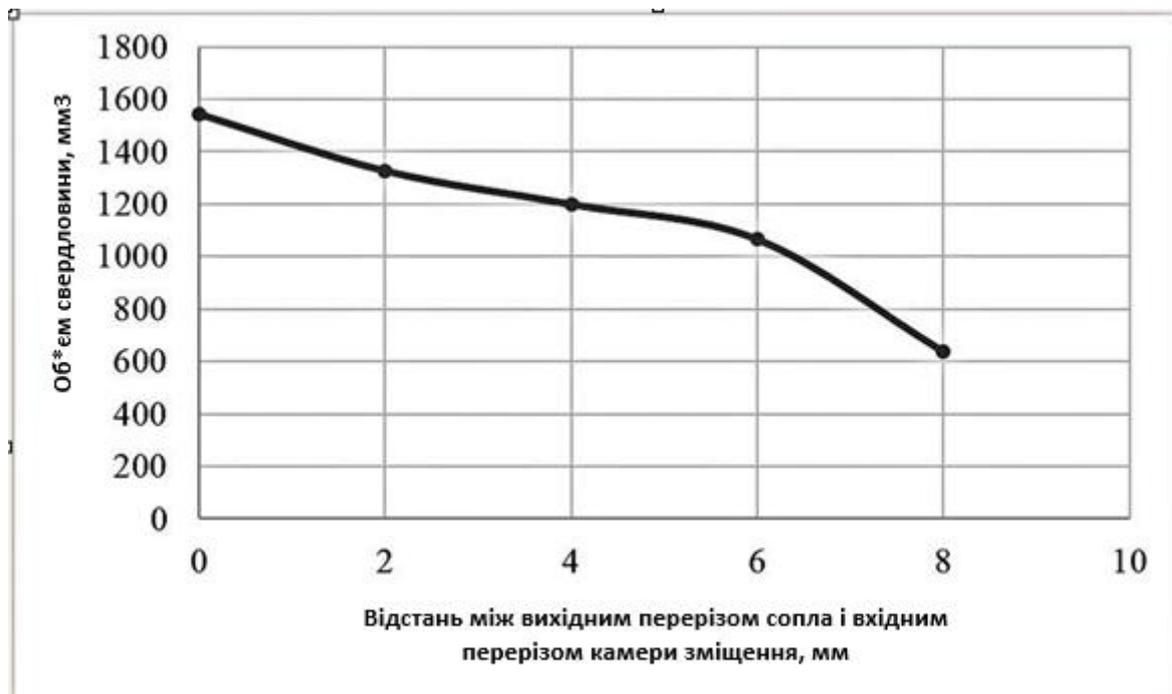


Рисунок 3.15 - Залежність діаметра і обсягу свердловини від відстані між вихідним перерізом сопла та верхнім зрізом технологічних вікон

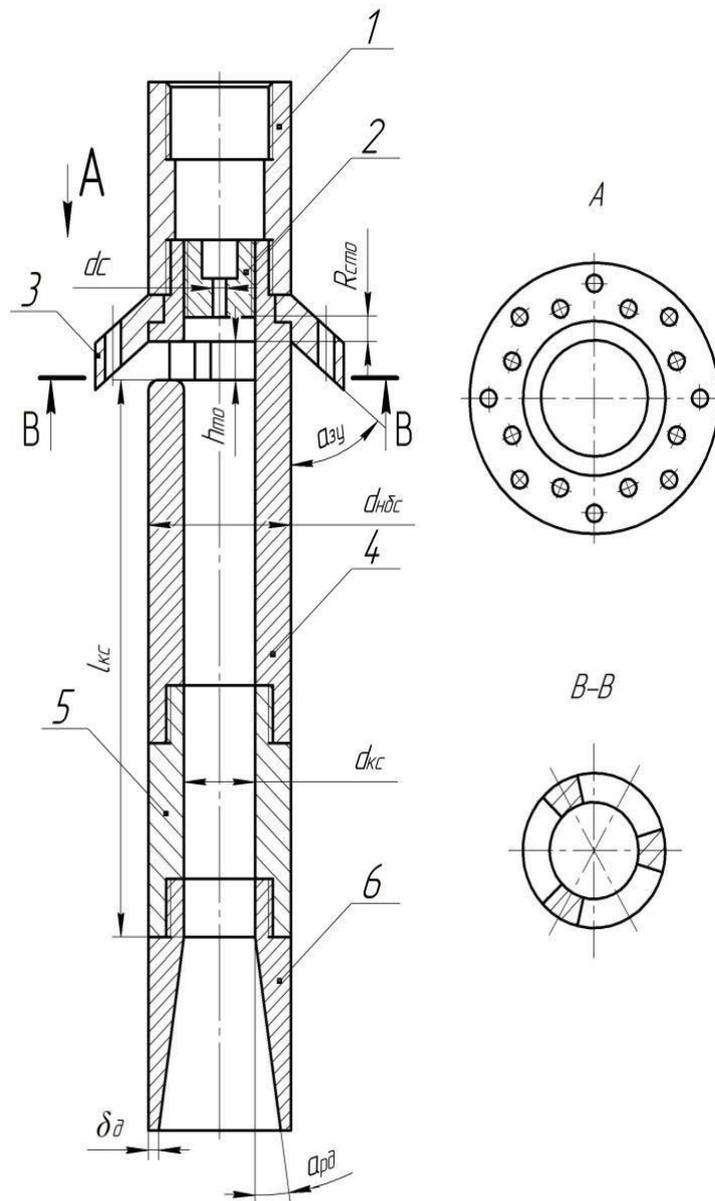


Рисунок 3.14 – Основні геометричні параметри КШЕБС досліджуваної конструкції: 1 – перехідник на нагнітальну магістраль; 2 – сопло; 3 – затримувальний пристрій; 4 – камера всмоктування; 5 – камера змішування; 6 – дифузор; d_c – діаметр сопла; R_{cto} – відстань між вихідним перерізом сопла та верхнім зрізом технологічних вікон; h_{to} – висота технологічних вікон; α_{zu} – кут конусності затримувального пристрою; d_{kc} – діаметр камери змішування; l_{kc} – довжина камери змішування; α_{rd} – кут розкриття дифузора; h_d – товщина стінки дифузора у вихідному перерізі

Зміна форми вибою свердловини при варіюванні досліджуваного параметра показана на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16 – Зміна форми криволінійного вибою при варіюванні відстані між вихідним перерізом сопла та верхнім зрізом технологічних вікон

Вихідні параметри експериментів: діаметр куль $D_{ш} = 3$ мм; маса порції куль $m_{ш} = 25$ г; діаметр сопла $d_c = 2$ мм; діаметр камери змішування $d_{кз} = 8$ мм; довжина камери змішування $l_{кз} = 82$ мм; кут розкриття дифузора $\alpha_{рд} = 10^\circ$; час буріння $t = 2$ хв; витрата рідини на виході із сопла $Q = 6,7$ л/хв; тиск перед соплом $P = 1$ МПа.

Таблиця 3.6 – Вплив відстані між вихідним перерізом сопла і верхнім зрізом технологічних вікон на ефективність кулькоструминного буріння

Відстань між соплом і верхнім зрізом вікон, мм	Об'єм свердловини, мм ³	Діаметр свердловини, мм	Довжина циліндричної частини свердловини, мм	Загальна глибина свердловини, мм
0	30800	25,0	57,2	70,8
3	24100	24,9	46,0	58,0
6	21370	24,8	39,1	51,2

Аналіз даних таблиці 3.6 показує, що збільшення відстані $R_{ст}$ у досліджуваному діапазоні незначно впливає на діаметр свердловини (зменшення лише на 0,8%). Однак об'єм та глибина свердловини при збільшенні $R_{ст}$ помітно зменшуються – на 31% та 28% відповідно.

Для виявлення причин зменшення ефективності кулькоструминного буріння зі збільшенням відстані між вихідним перерізом сопла та верхнім зрізом технологічних вікон за заданих умов дослідниками було проведено

високошвидкісну зйомку процесу. Результати обробки відеофайлів представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Інтенсивність циркуляції та швидкість куль у камері змішування при різних значеннях відстані між соплом і верхнім зрізом технологічних вікон

Відстань між вихідним перерізом сопла і верхнім зрізом технологічних вікон, мм	Інтенсивність циркуляції куль, шт/с	Швидкість куль у камері змішування, м/с
0	1084	8,387
3	1055	7,778
6	1050	6,457

Отримані результати показують, що зі збільшенням відстані при відносно постійному значенні інтенсивності циркуляції куль їх швидкість у камері змішування зменшується на 23%. Це пов'язано зі зміною профілю швидкостей потоку рідини в камері змішування. Під час підйому сопла відносно верхнього зрізу технологічних вікон профіль швидкостей потоку рідини на інтервалі верхнього зрізу технологічних вікон вирівнюється, і струмінь стає більш розосередженим. Таким чином, проходячи через камеру змішування, кулі зазнають меншого прискорення від висхідного потоку рідини.

Дані дослідження проводилися при бурінні свердловин у мармурі з розхитуванням бурового снаряда з кроком $1,25d_{ш} - 1,75d_{ш} - 2,25d_{ш}$. Отримані результати зведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати варіювання висоти технологічних вікон

Висота технологічних вікон, мм	Об'єм свердловини, мм ³	Діаметр свердловини, мм	Довжина циліндричної частини свердловини, мм	Загальна глибина свердловини, мм
4,2	34180	25,4	62,9	74,1
6,1	30800	25,0	57,2	70,8
7,8	28900	25,2	53,3	65,2

Вихідні дані: $d_{нбс} = 16$ мм, $d_{кз} = 8$ мм, $d_{с} = 2$ мм, $\alpha_{зу} = 40^\circ$, $l_{кз} = 40$ мм, $\alpha_{рд} = 10^\circ$, $\delta_{д} = 1$ мм, $d_{ш} = 3,5$ мм, $m_{ш} = 20$ г, $R_{дз} = 5$ мм, $Q_{р} = 6,7$ л/хв, $t_{роз} = 5$ хв, $t = 40$ хв, гірська порода – мармур, промивна рідина – вода.

Аналіз таблиці 3.8 показує, що збільшення висоти вікон у діапазоні, що досліджується, мало впливає на діаметр свердловини, а об'єм і глибина свердловини при збільшенні висоти вікон незначно зменшуються (на 15% та 12% відповідно).

Для інтерпретації отриманих результатів дослідниками було проведено високошвидкісну зйомку процесу буріння. Результати представлені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Інтенсивність циркуляції та швидкість куль у камері змішування при різних значеннях висоти технологічних вікон

Висота технологічних вікон, мм	Інтенсивність циркуляції куль у камері змішування, шт/с	Швидкість куль у камері змішування, м/с
4,2	1188	9,445
6,1	1154	9,226
7,8	1166	8,939

Аналіз відеофрагментів показав, що зі збільшенням висоти технологічних вікон в області під затримувальним пристроєм збільшується кількість куль, що накопичилися. Останнє призводить до зменшення коефіцієнта ежекції снаряда, а отже, до зменшення швидкості куль у камері змішування на 5,4%. Зниженням швидкості куль пояснюється зменшення обсягу та глибини свердловини, що спостерігається в таблиці 3.8.

Для визначення оптимальної довжини камери змішування в ряду довжин $5d_{кз}$; $7,5d_{кз}$; $10d_{кз}$; $12,5d_{кз}$; $15d_{кз}$; $17,5d_{кз}$ попередньо було виявлено значення оптимальних мас порції куль при забурюванні свердловини. Варто відзначити, що оптимальна маса порції куль зі збільшенням довжини камери змішування збільшується, що пов'язано зі зростанням об'єму простору для розміщення куль.

Експериментальні дослідження впливу довжини камери змішування на ефективність руйнування проводилися під час буріння свердловин у зразках

мармуру з розхитуванням снаряда. Отримані результати досліджень представлені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Вплив довжини камери змішування на ефективність
кулькоструминного буріння

Довжина камери змішування, мм	Оптимальна маса порції куль, г	Об'єм свердловини, мм ³	Діаметр свердловини, мм	Довжина циліндричної частини свердловини, мм	Загальна глибина свердловини, мм
40	20	32000	25,6	57,0	70,3
60	25	30800	25,0	57,2	70,8
80	30	29200	24,6	53,3	66,8
100	30	28600	24,2	52,7	66,0
120	35	27600	24,2	51,9	65,5
140	35	24500	23,8	47,0	61,2

Вихідні дані: $d_{\text{нбс}} = 16$ мм, $d_{\text{кз}} = 8$ мм, $d_{\text{с}} = 2$ мм, $\alpha_{\text{зу}} = 40^\circ$, $h_{\text{то}} = 6,1$ мм, $\alpha_{\text{рд}} = 10^\circ$, $\delta_{\text{д}} = 1$ мм, $d_{\text{ш}} = 3,5$ мм, $R_{\text{дз}} = 5$ мм, $Q_{\text{р}} = 6,7$ л/хв, $t_{\text{роз}} = 5$ хв, $t = 40$ хв, гірська порода – мармур, промивна рідина – вода.

Отримані результати дозволили побудувати графік залежності об'єму та глибини свердловини від довжини камери змішування (рис. 3.17). Аналіз графіків показує, що зі збільшенням довжини камери змішування обсяг вибуреної гірської породи знижується на 23%. Максимальна глибина свердловини зафіксована при бурінні буровими снарядами з довжиною камери змішування, що дорівнює 40 і 60 мм.

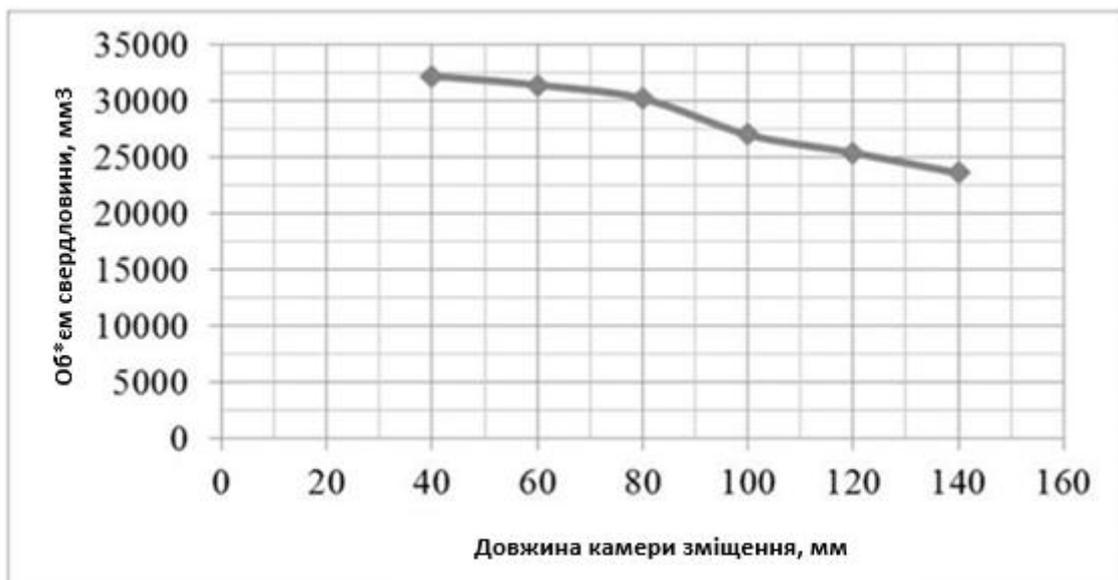


Рисунок 3.17 – Залежність глибини свердловини від довжини камери змішування

Для аналізу вищеописаних результатів дослідниками було проведено високошвидкісну зйомку процесу буріння, результати якої представлені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Інтенсивність циркуляції та швидкість куль у камері змішування при різних значеннях її довжини

Довжина камери змішування, мм	Інтенсивність циркуляції куль у камері змішування, шт/с	Швидкість куль у камері змішування, м/с
40	1084	8,387
60	1020	7,597
80	967	7,361

Аналіз результатів, представлених у таблиці 3.11, вказує на зменшення швидкості куль у камері змішування зі збільшенням її довжини на 12%, що пояснюється більшою кількістю зіткнень куль зі стінками камери. Даний висновок добре узгоджується з результатами американських дослідників, які показали, що збільшення довжини камери змішування призводить до зниження коефіцієнта ежекції. Зниження швидкості куль у камері змішування призводить до зменшення швидкості їх підйому в затрубному просторі, а отже, до зниження інтенсивності циркуляції куль.

Дослідження впливу кута розкриття дифузора на ефективність руйнування мармуру проводилися при бурінні свердловин з опусканням снаряда з періодичністю $t_{роз}$.

Вихідні дані: $d_{нбс} = 16$ мм, $d_{кз} = 8$ мм, $d_c = 2$ мм, $\alpha_{зу} = 40^\circ$, $h_{то} = 4,2$ мм, $l_{кз} = 60$ мм, $\delta_d = 1$ мм, $d_{ш} = 3,5$ мм, $m_{ш} = 20$ г, $R_{дз} = 5$ мм, $Q_p = 6,7$ л/хв, $t_{роз} = 5$ хв, $t = 30$ хв, гірська порода – мрамур, промивна рідина – вода.

Геометричні параметри свердловини представлені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Вплив кута розкриття дифузора на ефективність кулькострумного буріння

Кут розкриття дифузора, °	Об'єм свердловини, мм ³	Діаметр свердловини, мм	Довжина циліндричної частини свердловини, мм	Загальна глибина свердловини, мм
10	28600	25,3	50,4	62,5
20	21370	24,9	38,4	52,0
30	21516	24,0	40,9	53,6
0 (циліндр)	21010	23,7	41,2	54,1

Експериментальні дані свідчать про те, що при куті розкриття дифузора 10° діаметр, глибина та об'єм свердловини мають максимальні значення. Діаметр свердловини зі збільшенням кута розкриття дифузора зменшується на 6,3%.

На наступному етапі дослідниками було проведено відеореєстрацію процесу руху куль у привибійній зоні свердловини при варіюванні кутів розкриття дифузора. Результати високошвидкісної зйомки наведено в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Інтенсивність циркуляції та швидкість куль у камері змішування при різних значеннях кутів розкриття дифузора

Кут розкриття дифузора, °	Інтенсивність циркуляції куль у камері змішування, шт/с	Швидкість куль у камері змішування, м/с
10	1084	8,387
20	1041	7,668
30	1011	6,884
0 (циліндр)	890	6,728

Отримані дані показують, що в ряді кутів розкриття дифузора 10° – 20° – 30° – 0° зменшується інтенсивність циркуляції куль у камері змішування на 18%, що пов'язано з утворенням скупчень куль між буровим снарядом і вибоєм свердловини (рис. 3.18). Зменшення швидкості куль у камері змішування на 20% пов'язане зі зростанням кількості рикошетів від стінки бурового снаряда в нижній області.

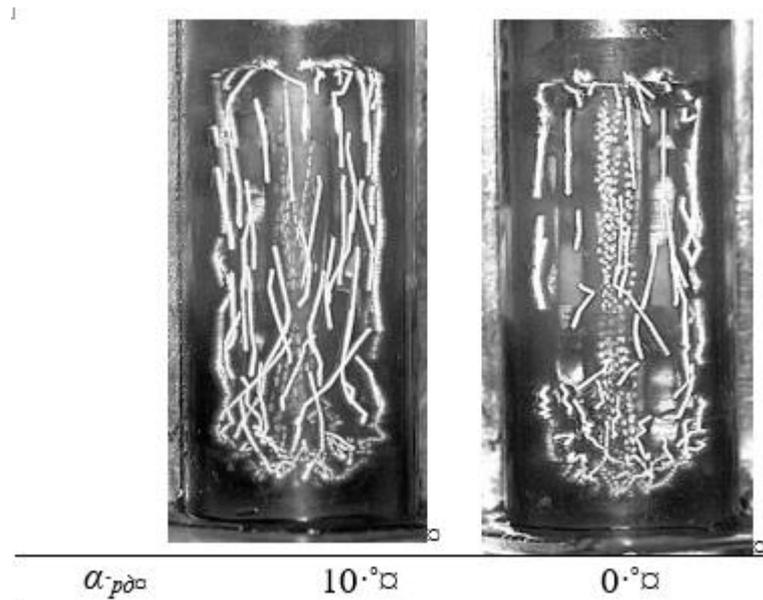


Рисунок 3.18 – Зображення, що ілюструють рух куль у затрубному просторі при різних кутах розкриття дифузора

Аналізуючи результати швидкісних зйомок, можна побачити, що зменшення діаметра свердловини пов'язане з траєкторією руху куль у буровому снаряді. У ряді кутів розкриття дифузора 10° – 20° – 30° – 0° умови зіткнення куль з периферійною частиною вибою свердловини ускладнюються. Крім того, зіставлення реальних геометричних розмірів снаряда, куль і відстані між снарядом і вибоєм свердловини, а також спостереження за траєкторією куль показало, що руйнування периферійної частини вибою свердловини обумовлюється рикошетами куль, що відскочили від породи, з кулями, що надходять на вибій. Це ще раз підтверджує необхідність буріння з мінімальною відстанню між снарядом і вибоєм.

На наступному етапі дослідниками проводилося порівняння ефективності руйнування снарядами з різними діаметрами сопел. У зв'язку з необхідністю визначення оптимальної маси порції куль експерименти проводилися при її варіюванні. При цьому здійснювалося забурювання свердловини за наступних умов: $d_{\text{нбс}} = 16 \text{ мм}$, $d_{\text{кз}} = 8 \text{ мм}$, $\alpha_{\text{зу}} = 40^\circ$, $h_{\text{то}} = 4,2 \text{ мм}$, $l_{\text{кз}} = 40 \text{ мм}$, $\alpha_{\text{рд}} = 10^\circ$, $\delta_{\text{д}} = 1 \text{ мм}$, $d_{\text{ш}} = 3,5 \text{ мм}$, $R_{\text{дз}} = 5 \text{ мм}$, $t = 1 \text{ хв}$.

За отриманими експериментальними результатами побудовано графік залежності об'єму свердловини від маси порції куль при різних значеннях діаметра сопел, представлений на рисунку 3.19.

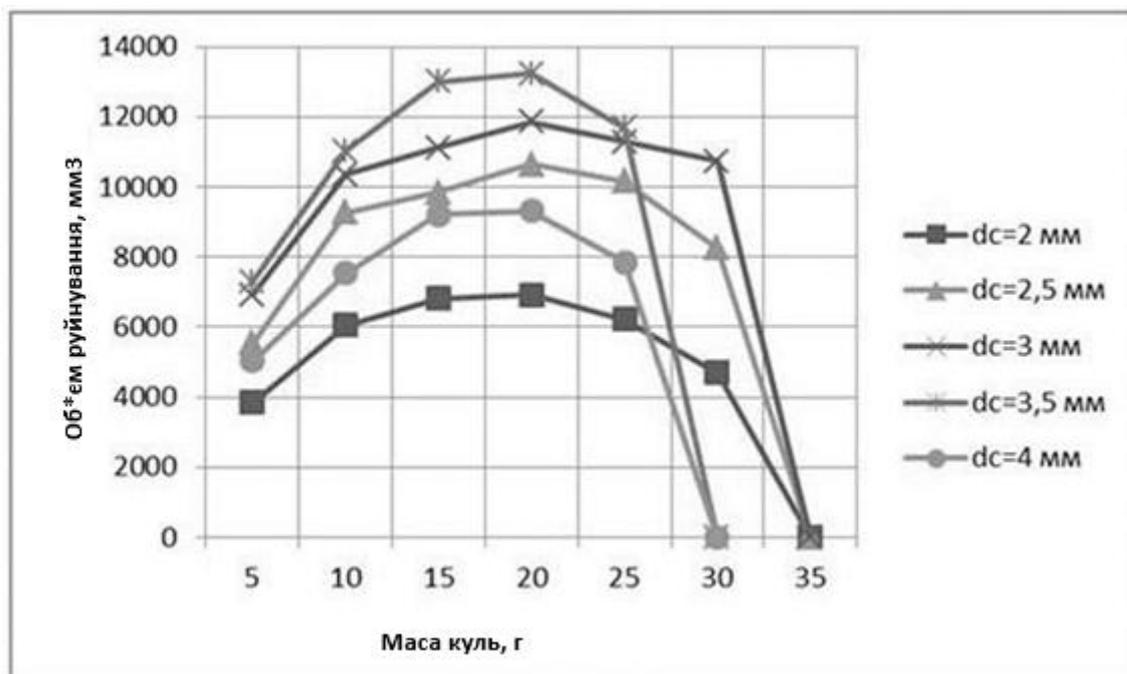


Рисунок 3.19 – Залежність об'єму свердловини від маси порції куль при різних значеннях діаметра сопел

Графік показує, що в ряді діаметрів сопел 2–2,5–3–3,5 мм об'єм свердловини зростає, а при діаметрі сопла 4 мм – знижується. Разом з тим, критична маса порції куль при діаметрах сопел, рівних 3,5 і 4 мм, падає, що пов'язано з нижчими значеннями коефіцієнта ежекції. Важливим є той факт, що оптимальна маса порції куль у досліджуваному діапазоні зміни діаметра сопел залишається приблизно постійною на рівні 30 г.

На наступному етапі досліджень дослідниками було проведено високошвидкісну зйомку процесу циркуляції куль у привибійній зоні. Обробка отриманих відеофрагментів дозволила визначити інтенсивність циркуляції та швидкості куль у камері змішування при бурінні снарядами з різним діаметром сопел (таблиця 3.14).

Таблиця 3.14 – Вплив діаметра сопла на інтенсивність циркуляції та швидкість куль у камері змішування

Діаметр сопла, мм	Інтенсивність циркуляції куль у камері змішування, шт/с	Швидкість куль у камері змішування, м/с	Розрахована швидкість рідини без куль, м/с	Відношення швидкості куль до швидкості рідини
2,0	1084	8,387	10,151	0,826
2,5	1118	9,445	10,889	0,867
3,0	1224	9,616	11,777	0,816
3,5	1368	10,015	13,973	0,716
4,0	1120	8,046	10,050	0,800

Аналізуючи результати швидкісних зйомок, можна помітити, що в ряді діаметрів сопел 2,0–2,5–3,0–3,5 мм збільшується швидкість руху куль у камері змішування на 19%, що пояснюється збільшенням швидкості змішаного потоку рідини в камері змішування внаслідок зростання швидкості струменя на виході із сопла.

Збільшення швидкості куль у камері змішування призводить до збільшення їх інтенсивності циркуляції на 26%. Це пов'язано з тим, що в момент всмоктування куль у технологічні вікна при великій швидкості змішаного потоку кулі швидше залишають верхню область бурового снаряда, не перешкоджаючи надходженню інших куль.

На основі результатів високошвидкісної зйомки вдалося визначити відношення швидкості руху куль до швидкості промивної рідини в камері змішування (таблиця 3.14). Слід зазначити, що при діаметрі сопла, що дорівнює 3,5 мм, спостерігається зменшення цього відношення до 0,716, що пояснюється

значним збільшенням інтенсивності циркуляції куль та виникненням їх взаємних зіткнень, які гальмують рух.

3.5 Аналіз результатів експериментальних досліджень. Висновки та рекомендації

На основі проведеного аналізу експериментальних досліджень, виконаних науковцями в галузі кулькострумного буріння, можна зробити комплексні висновки та сформулювати практичні рекомендації для проектування кулькострумно-ежекторних бурових снарядів та вибору оптимальних режимів буріння.

Аналіз впливу технологічних параметрів режиму буріння на ефективність процесу дозволяє сформулювати наступні висновки.

Відстань між снарядом і вибоєм є одним з найбільш критичних параметрів, що визначають ефективність кулькострумного буріння. Встановлено, що при збільшенні цього параметра від 5 до 15 мм обсяг свердловини зменшується на 15%, загальна глибина – на 19%, а довжина циліндричної частини – на 31%. При цьому діаметр свердловини дещо збільшується (на 6%), що свідчить про погіршення якості формування свердловини. Високошвидкісна зйомка показала, що при збільшенні відстані зростає кількість скупчень куль у затрубному просторі під снарядом, що призводить до зниження інтенсивності їх циркуляції. Таким чином, відстань між снарядом і вибоєм має бути мінімально можливою для забезпечення максимальної швидкості вильоту куль та ефективного руйнування породи.

Маса порції куль має оптимальне значення для кожної конкретної конструкції снаряда та умов буріння. Експериментально встановлено, що зі збільшенням маси порції куль від 10 до 40 г обсяг свердловини спочатку зростає (у 2,4 рази), а діаметр свердловини майже не змінюється (збільшення лише на 6%). Однак при перевищенні певного значення (приблизно 30-35 г для досліджуваних умов) швидкість проходки значно знижується через скупчення

куль перед впускними вікнами, аж до повного припинення процесу буріння при критичній масі. Таким чином, маса порції куль повинна бути максимально можливою, але не більше критичного значення, що визначається співвідношенням геометричних параметрів снаряда та діаметра куль.

Діаметр куль істотно впливає на механізм та ефективність руйнування гірської породи. Зі збільшенням діаметра куль від 2,0 до 3,5 мм обсяг свердловини зростає на 57%, а глибина – на 27%. При цьому зі збільшенням діаметра куль закономірно збільшується їх маса та кінетична енергія перед зіткненням із вибоєм (від 2,68 до 9,82 мДж), а загальна кількість куль, що беруть участь у процесі буріння, зменшується (від 304 до 57 шт). Встановлено, що зі збільшенням діаметра куль знижуються втрати енергії на їх зіткнення один з одним та зі стінками снаряда, а об'ємне руйнування гірської породи при одиничному зіткненні кулі з вибоєм зростає. Кулі меншого діаметра більш схильні до швидкого зношування. Таким чином, рекомендується використовувати кулі максимально можливого діаметра, що забезпечують вільне проходження через технологічні вікна та камеру змішування.

Аналіз впливу геометричних параметрів кулькоструминно-ежекторного бурового снаряда на ефективність буріння дозволяє сформулювати наступні рекомендації.

Відстань між вихідним перерізом сопла та верхнім зрізом технологічних вікон істотно впливає на швидкість куль у камері змішування. При збільшенні цієї відстані від 0 до 6 мм об'єм свердловини зменшується на 31%, а швидкість куль – на 23% при практично незмінній інтенсивності циркуляції. Це пов'язано зі зміною профілю швидкостей потоку рідини в камері змішування та зменшенням прискорення куль. Нижній торець сопла повинен збігатися за висотою з верхнім зрізом технологічних вікон або знаходитися дещо нижче. При такому розташуванні кулі, що проходять через камеру змішування, відчують найбільше прискорення за рахунок максимального значення коефіцієнта ежекції.

Висота технологічних вікон впливає на умови входу куль у камеру змішування. При збільшенні висоти вікон від 4,2 до 7,8 мм обсяг свердловини

зменшується на 15%, а швидкість куль – на 5,4%. Аналіз відеозаписів показав, що зі збільшенням висоти технологічних вікон в області під затримувальним пристроєм збільшується кількість куль, що накопичилися, що призводить до зменшення коефіцієнта ежекції. Впускні вікна повинні мати мінімально можливу висоту, що забезпечує вільне проходження куль без заклинювання. При збільшенні висоти впускних вікон проходженню куль у камеру змішування перешкоджає струмінь рідини, що витікає з сопла.

Довжина камери змішування має неоднозначний вплив на продуктивність буріння. При збільшенні довжини від 40 до 140 мм обсяг свердловини зменшується на 23%, а швидкість куль – на 12%. Це пов'язано зі зростанням кількості зіткнень куль зі стінками камери та зниженням коефіцієнта ежекції. Максимальна продуктивність досягається при найменшій довжині камери (5d_{кз} – 7,5d_{кз}). Однак вибір довжини камери змішування залежить від очікуваної тривалості рейсу. Зі збільшенням довжини камери змішування ефективність буріння дещо знижується, проте збільшується величина проходки на долото за рахунок повільнішого зносу куль, оскільки вони зазнають меншого прискорення та відповідно менших динамічних навантажень при зіткненні з породою.

Кут розкриття дифузора значно впливає на траєкторію руху куль та формування профілю вибою. Оптимальне значення становить 10°, при якому забезпечуються максимальні діаметр (25,3 мм), глибина (62,5 мм) та об'єм (28600 мм³) свердловини. При збільшенні кута до 30° або використанні циліндричного дифузора (0°) об'єм свердловини зменшується на 25-27%, а швидкість куль – на 18-20%. Кут розкриття дифузора повинен бути мінімально можливим (близько 10°) для забезпечення розробленості периферійної частини вибою за рахунок оптимальної траєкторії руху куль та мінімізації їх рикошетів від стінок снаряда.

Діаметр сопла визначає швидкість струменя рідини та інтенсивність циркуляції куль. У досліджуваному діапазоні 2,0–4,0 мм оптимальним є діаметр 3,0–3,5 мм, при якому забезпечується найбільша швидкість куль (9,6–10,0 м/с) та їх інтенсивність циркуляції (1224–1368 шт/с). При використанні відцентрових насосів варто вибирати діаметр сопла, що забезпечує найбільшу швидкість

змішаного потоку в камері змішування при заданій витраті насоса та коефіцієнті ежекції.

Для систематизації отриманих результатів складено узагальнену таблицю впливу досліджуваних параметрів на ефективність кулькоструминного буріння (таблиця 3.15).

Таблиця 3.15 – Узагальнені результати експериментальних досліджень впливу технологічних і геометричних параметрів на ефективність кулькоструминного буріння

Досліджуваний параметр	Діапазон варіювання	Вплив на об'єм свердловини	Вплив на глибину свердловини	Вплив на діаметр свердловини	Оптимальне значення / рекомендація
Технологічні параметри					
Відстань між снарядом і вибоєм	5–15 мм	Зменшення на 15%	Зменшення на 19%	Збільшення на 6%	Мінімально можлива (5 мм)
Маса порції куль	10–40 г	Зростання до максимуму, потім різке падіння	Зростання на 72% (10–40 г)	Практично не змінюється (+6%)	30–35 г (критичне ~40 г)
Діаметр куль	2,0–3,5 мм	Зростання на 57%	Зростання на 27%	Збільшення на 12%	Максимально можливий (3,5 мм)
Геометричні параметри снаряда					
Відстань сопло – вікна	0–6 мм	Зменшення на 31%	Зменшення на 28%	Практично не змінюється (–0,8%)	0 мм (співпадіння рівнів)
Висота технологічних вікон	4,2–7,8 мм	Зменшення на 15%	Зменшення на 12%	Практично не змінюється (–0,8%)	Мінімальна (1,2–1,5)d _ш
Довжина камери змішування	40–140 мм	Зменшення на 23%	Практично не змінюється (–2%)	Зменшення на 7%	(5–7,5)d _{кз} для max продуктивності; (12,5–15)d _{кз} для збільшення рейсу
Кут розкриття дифузора	0–30°	Макимум при 10° (зменшення на 25–27% при інших)	Макимум при 10°	Зменшення зі збільшенням кута (–6%)	10°
Діаметр сопла	2,0–4,0 мм	Макимум при 3,0–3,5 мм	Не досліджувалося детально	Не досліджувалося детально	3,0–3,5 мм

На основі узагальнених результатів експериментальних досліджень розроблено алгоритм вибору оптимальних параметрів кулькоструминного буріння для конкретних гірничо-геологічних умов (рис. 3.20).

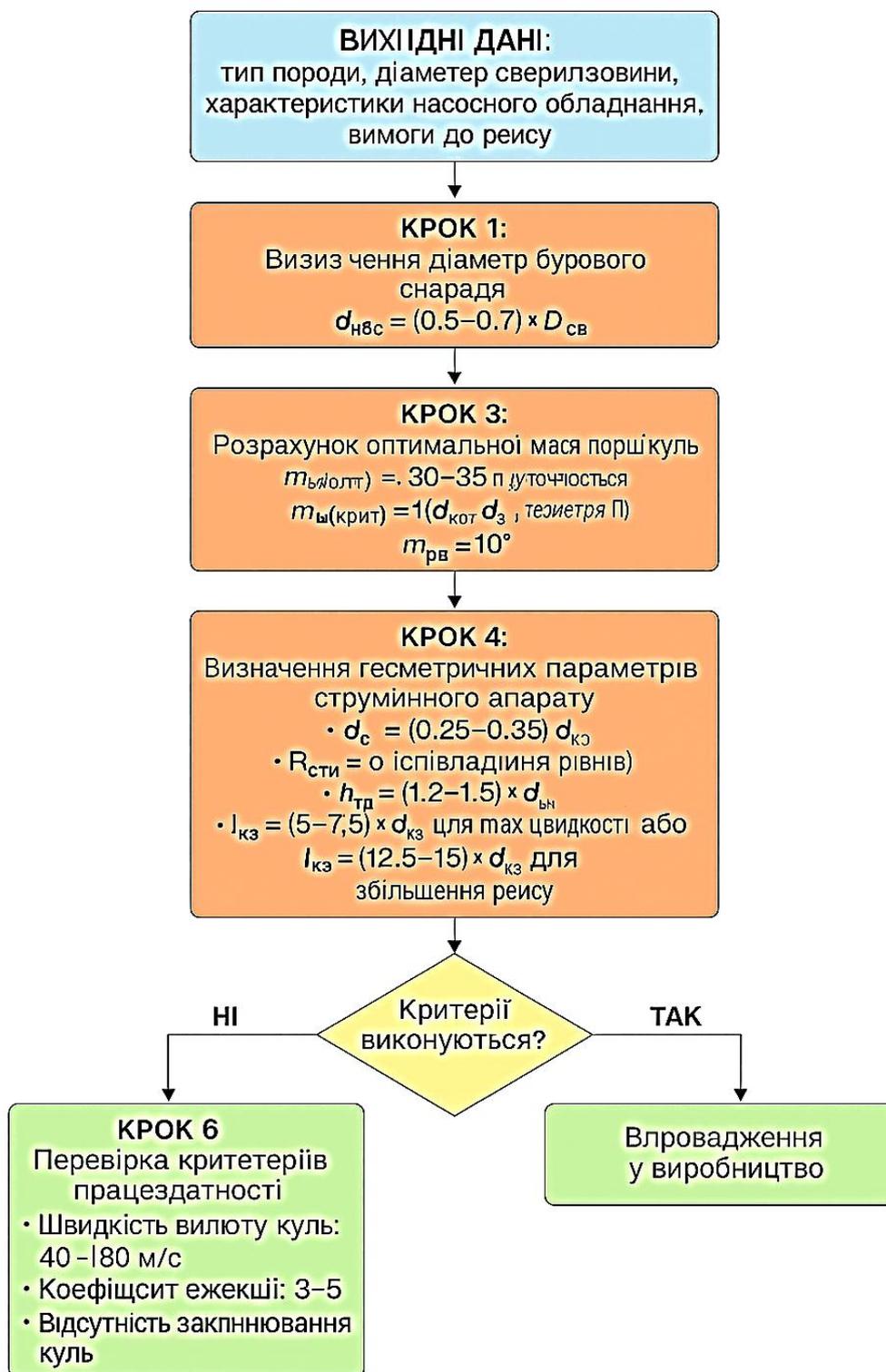
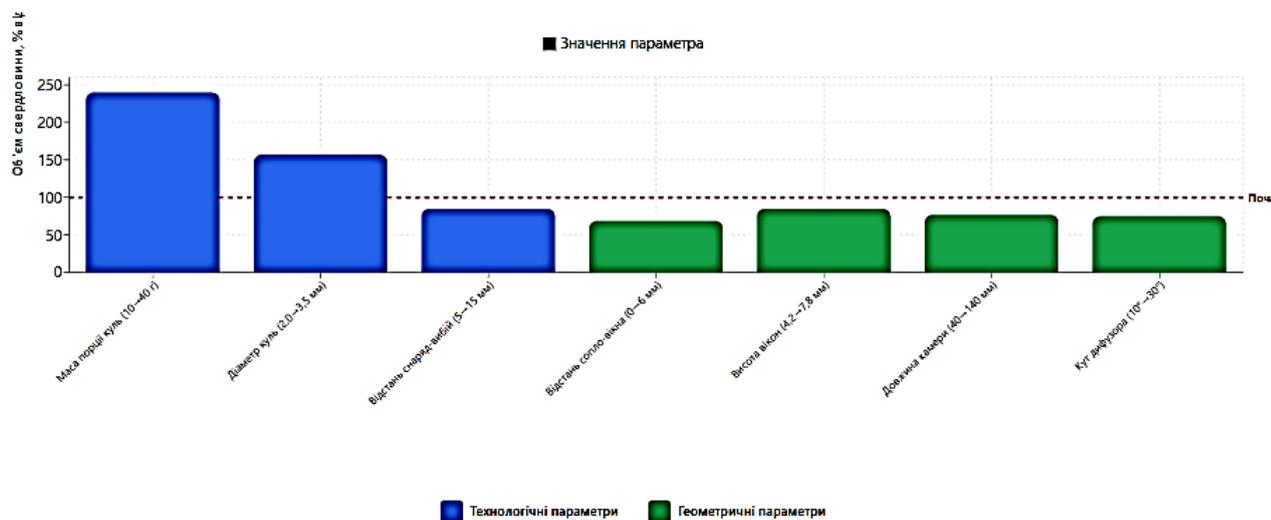


Рисунок 3.20 – Алгоритм вибору оптимальних параметрів кулькоструминного буріння

Для наочного представлення характеру впливу основних параметрів на ефективність буріння побудовано узагальнену діаграму (рис. 3.21).



Примітки:

- Значення 100% відповідає початковому (мініальному) значенню параметра
- Стовпці вище 100% показують збільшення об'єму свердловини
- Стовпці нижче 100% показують зменшення об'єму свердловини
- Маса порції куль має найбільший вплив (+140% при оптимальному значенні)
- Відстань сопло-вікна призводить до найбільшого негативного впливу (-31%)

Рисунок 3.2 – Узагальнена діаграма впливу технологічних і геометричних параметрів на об'єм свердловини (у відсотках від максимального значення)

На основі проведеного аналізу експериментальних досліджень розроблено наступні практичні рекомендації для проектування кулькострумінно-ежекторних бурових снарядів та вибору режимів буріння:

1. Рекомендації щодо технологічних параметрів:

– Відстань між снарядом і вибоєм повинна підтримуватися на мініальному рівні (5–10 мм) протягом усього процесу буріння. Для автоматичного підтримання оптимальної відстані рекомендується використовувати систему контролю на основі реєстрації пружних коливань у бурильній колоні або періодичне розхитування снаряда з контролем проходки.

– Масу порції куль необхідно вибирати на рівні 90–95% від критичного значення, що забезпечує максимальну продуктивність без ризику заклинювання. Для досліджуваних умов оптимальна маса становить 30–35 г.

Критичну масу можна попередньо оцінити за формулою, що враховує геометричні параметри затримувального пристрою та співвідношення діаметрів камери змішування і куль.

– Діаметр куль слід вибирати максимально можливим виходячи з умови вільного проходження через технологічні вікна: $d_{ш} = (0,15-0,25) \times d_{кз}$. Це забезпечує максимальну кінетичну енергію куль, мінімальні втрати на взаємні зіткнення та знижений знос.

2. Рекомендації щодо геометричних параметрів снаряда:

– Нижній торець сопла повинен збігатися з верхнім зрізом технологічних вікон ($R_{сто} = 0$) або знаходитися на 1–2 мм нижче для забезпечення максимального коефіцієнта ежекції.

– Висота технологічних вікон має становити $h_{то} = (1,2-1,5) \times d_{ш}$, що забезпечує вільне проходження куль без утворення скупчень під затримувальним пристроєм.

– Довжина камери змішування вибирається залежно від пріоритетів:

○ Для максимальної механічної швидкості буріння: $l_{кз} = (5-7,5) \times d_{кз}$

○ Для збільшення тривалості рейсу та зменшення зносу куль: $l_{кз} = (12,5-15) \times d_{кз}$

– Кут розкриття дифузора рекомендується приймати $\alpha_{рд} = 10^\circ$, що забезпечує оптимальну траєкторію руху куль та максимальну розробленість периферійної частини вибою.

– Діаметр сопла слід вибирати виходячи з характеристик насосного обладнання: $d_c = (0,25-0,35) \times d_{кз}$. Для відцентрових насосів оптимальним є діаметр, що забезпечує роботу насоса в зоні максимального ККД при заданому тиску.

3. Рекомендації щодо конструктивного виконання:

– Затримувальний пристрій конусного типу з кутом 40° забезпечує ефективне утримання куль у привибійній зоні та сприяє їх рівномірному розподілу перед впускними вікнами.

– Для полегшення заміни зношених елементів та адаптації снаряда до різних умов буріння рекомендується модульна конструкція зі змінними соплами, камерами змішування та дифузорами.

– Центратори снаряда повинні забезпечувати його співвісність зі свердловиною для рівномірного формування вибою.

4. Рекомендації щодо матеріалів та експлуатації:

– Кулі рекомендується виготовляти зі сталі з твердістю HRC 58–62 для забезпечення оптимального співвідношення між зносостійкістю та здатністю до руйнування породи.

– Камера змішування та дифузор повинні виготовлятися з зносостійких матеріалів або мати змінні футерівки для продовження терміну служби снаряда.

– Періодичність розхитування снаряда для підтримання відстані до вибою рекомендується встановлювати на рівні $t_{роз} = 5-10$ хв залежно від твердості породи та швидкості буріння.

Запропоновані рекомендації дозволяють здійснити обґрунтований вибір параметрів кулькоструминного буріння для конкретних гірничо-геологічних умов та забезпечити максимальну ефективність процесу при мінімальних експлуатаційних витратах.

3.6 Висновки до розділу 3

1 Встановлено, що відстань між снарядом і вибоєм є одним із ключових параметрів ефективності. Зі збільшенням відстані від 5 до 15 мм обсяг свердловини зменшується до 31 %, що зумовлено зниженням швидкості куль та утворенням скупчень у затрубному просторі. Оптимальна відстань становить 5–10 мм.

2 При масі порції куль нижче 20 г зменшується кількість ударів куль по вибою, тоді як при масі понад 35–40 г виникають скупчення та заклинювання. Найкращий результат забезпечує маса 30–35 г.

3 Збільшення діаметра куль дає позитивний ефект на продуктивність буріння. Великі кулі мають більшу кінетичну енергію, краще руйнують породу та менше втрачають енергію на зіткнення між собою. У результаті при діаметрі 3–3,5 мм свердловина виходила більша й глибша.

4 Геометрія самого бурового снаряда дуже сильно впливає на роботу всього процесу. Коли, наприклад, збільшується довжина камери змішування або висота вікон, швидкість куль зменшується, і буріння стає менш ефективним. Тому важливо підбирати ці параметри так, щоб циркуляція куль була максимально стабільною.

5 Аналіз експериментів дозволив визначити оптимальні значення основних геометричних параметрів. Найкращі результати отримано при $R_{sto} = 0$ мм, висоті вікон на рівні $(1,2-1,5)d_{sh}$, довжині камери змішування $(5-7,5)d_{kx}$ та куті розкриття дифузора 10° . Саме ці параметри забезпечували найбільшу швидкість руху куль і максимальний обсяг руйнування породи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено важливу науково-технічну задачу підвищення ефективності кулькоструминного буріння свердловин шляхом обґрунтування оптимальних технологічних режимів конструкції бурового снаряда.

1. На основі аналізу розвитку кулькоструминного буріння підтверджено його перспективність для руйнування міцних гірських порід та можливість досягнення високих швидкостей проходки. Метод має суттєві переваги порівняно з традиційними способами, зокрема простоту конструкції снаряда та можливість буріння без великих осьових навантажень.

2. Проаналізовані конструкції існуючих кулькоструминних снарядів показали, що їх ефективність значною мірою залежить від правильно підібраних геометричних параметрів та стабільності циркуляції куль. Виявлено ряд недоліків типових конструкцій, що свідчить про необхідність оптимізації ключових вузлів.

3. Опрацювання експериментальних даних засвідчило, що найбільший вплив на результативність буріння мають технологічні параметри – відстань між снарядом і вибоєм, маса порції куль та діаметр куль. Для отримання максимального об'єму руйнування рекомендовано підтримувати відстань 5–10 мм, застосовувати масу порції куль близько 30–35 г та використовувати кулі діаметром 3–3,5 мм.

4. Аналіз залежностей показав, що геометричні характеристики бурового снаряда суттєво визначають траєкторію руху куль та коефіцієнт ежекції. Найкращі результати забезпечують: збіг рівня сопла з вікнами, оптимальна висота вікон $(1,2-1,5)d_{sh}$, коротша камера змішування $(5-7,5)d_{kx}$ та кут розкриття дифузора близько 10° .

5. Зіставлення даних експериментів дало змогу сформувані узагальнені рекомендації щодо вибору параметрів кулькоструминного буріння у межах досліджених умов. Вони можуть бути використані для попереднього налаштування бурових снарядів та підвищення ефективності руйнування порід.

6. На основі комплексного аналізу теоретичних та експериментальних досліджень сформовано алгоритм вибору оптимальних технологічних і геометричних параметрів кулькоструминного буріння. Запропоновані технічні рішення та рекомендації можуть бути використані під час проектування модернізованих кулькоструминно-ежекторних бурових снарядів та підвищення ефективності буріння у складних геологічних умовах.

GENERAL CONCLUSIONS ON THE WORK

An important scientific and technical task has been solved in the work – increasing the efficiency of ball-jet drilling by substantiating optimal technological parameters and improving the design of the drilling tool.

1 Based on the analysis of the development of ball-jet drilling, its high potential for the destruction of hard rock formations and for achieving high rates of penetration has been confirmed. The method offers significant advantages over traditional drilling techniques, including the simplicity of the tool design and the ability to drill without applying substantial axial loads.

2 The analysis of existing ball-jet drilling tool designs showed that their efficiency strongly depends on the correct selection of geometric parameters and on the stability of ball circulation. Several shortcomings of typical designs were identified, indicating the need to optimize key structural components.

3 Processing of experimental data demonstrated that the most influential technological parameters are the distance between the tool and the bottomhole, the mass of the ball portion, and the ball diameter. To achieve maximum rock destruction, it is recommended to maintain a distance of 5–10 mm, use a ball-portion mass of approximately 30–35 g, and apply balls with a diameter of 3–3.5 mm.

4 The analysis of parameter dependencies showed that the geometric characteristics of the drilling tool have a substantial effect on ball trajectory and the ejection coefficient. The best results are achieved when the nozzle level matches the window level, the window height is $(1.2–1.5)d_{sh}$, the mixing chamber length is $(5–7.5)d_{kx}$, and the diffuser opening angle is around 10° .

5 Comparison of the experimental results made it possible to formulate generalized recommendations for selecting ball-jet drilling parameters within the investigated conditions. These recommendations can be used for preliminary tool adjustment and for improving the rock-breaking efficiency.

6 Based on a comprehensive analysis of theoretical and experimental results, an algorithm for selecting optimal technological and geometric parameters of

ball-jet drilling has been developed. The proposed technical solutions and recommendations can be applied in the design of modernized ball-jet–ejector drilling tools and for improving drilling efficiency under complex geological conditions.

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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Коровяка Є.А. Прогресивні технології спорудження свердловин: монографія [Електронний ресурс] / Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Електрон. текст. дані. – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. – 166 с.
7. Коцкулич Я.С. Закінчування свердловин: підручник / Я.С.Коцкулич, О.В. Тищенко. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2009. – 366 с.
8. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурові промивальні рідини та тампонажні суміші: Підручник. – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – 296 с.
9. Павличенко А.В. Гідрогазодинамічні процеси при спорудженні та експлуатації свердловин. Монографія. А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка, А.О.

Ігнатов, О.М. Давиденко; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 201 с.

10. Павличенко А.В. Дослідження гідравлічних основ циркуляції технологічних рідин Монографія / А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Журфонд, 2023. – 212 с.

11. Патент 102707 № а201107407 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулеструмінний пристрій для буріння свердловин / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. – Заявл. 14.06.2011; Опубл. 12.08.2013; Бюл. № 15.

12. Патент 102708 № а201107452 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулеструмінний пристрій для буріння свердловин / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. – Заявл. 14.06.2011; Опубл. 12.08.2013; Бюл. № 15.

13. Патент 67845 № u201108906 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулькострумінний прилад / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. – Заявл. 15.07.2011; Опубл. 12.03.2012; Бюл. № 5.

14. Патент 68322 № u201109643 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулькострумінний прилад / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. – Заявл. 02.08.2011; Опубл. 26.03.2012; Бюл. № 6.

15. Патент 81067 № u201212574 Україна, МПК Е 21 В 7/00. Пристрій для буріння / А.О. Ігнатов. – Заявл. 05.11.2012; Опубл. 25.06.2013; Бюл. № 12.

16. Патент 81068 № u201212576 Україна, МПК Е 21 В 7/00. Пристрій для буріння / А.О. Ігнатов. – Заявл. 05.11.2012; Опубл. 25.06.2013; Бюл. № 12.

17. Пашенко О.А. Експлуатація бурового обладнання: навч. посіб. О.А. Пашенко, Є.А. Коровяка, В.Л. Хоменко, В.О. Расцветаев, О.М. Федик, С.В. Калинович. Дрогобич. Посвіт, 2024. – 300 с

18. Політучий О.І. Буріння нафтових і газових свердловин: навч. посібник / О.І. Політучий. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 170 с.

19. 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.

20. Технологія і техніка буріння / В.С. Войтенко, В.Г. Вітрик, Р.С. Яремійчук, Я.С. Яремійчук. – Львів: Центр Європи, 2012. – 708 с.

21. Фем'як Я. М. Практичне використання кавітаційних процесів у бурінні свердловин. Монографія. Фем'як Я. М., Чудик І. І., Судаков А. К., Якимченко Я.Я., Федик О. М.. – Дрогобич: «Посвіт». - 2021. - 232 с

22. Яремійчук Р. С., Качмар Ю. Д., Семак О. С. Відкриття, розвідка та експлуатація нафтових і газових родовищ. – Львів: Центр Європи, 2003. – 450 с.

23. 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.

24. 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).

25. 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.

26. 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.

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

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

29. 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.

30. 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.

31. Aziukovskyi O.O. Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions : monograph / O.O. Aziukovskyi, Ye.A. Koroviaka, A.O. Ihnatov; Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro University of Technology. – Dnipro: Zhurfond, 2023. – 159 p.

32. 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.

33. 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.

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

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

36. De Oliveira C.R.S. et al. Synthesis of superacid sulfated TiO₂ prepared by sol-gel method and its use as a titania precursor in obtaining a kaolinite/TiO₂ nano-hybrid composite. // *Powder Technol.*, Elsevier, 2021, Vol. 381, p. 366–380.

37. Eckel I.E., Deily F.H., Ledgerwood L.W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // *Transaction AIME*. – Dallas, 1956. – p. 15.

38. 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.

39. 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.

40. Krishnan S., Abyat Z., Chok C. Characterization of boron-based nanomaterial enhanced additive in water-based drilling fluids. – 2016.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. Stanić V., Tanasković S.B. Antibacterial activity of metal oxide nanoparticles. // *Nanotoxicity*, Elsevier, 2020, p. 241–274.
50. 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.