

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 185 Нафтогазова інженерія та технологій
Освітня програма «Буріння нафтових і газових свердловин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри буріння та геології
Винников Ю.Л.

«21» 01 2026 року

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

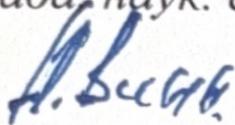
на тему Підвищення ефективності роторних керованих систем при бурінні горизонтальних свердловин

Пояснювальна записка

Керівник

к.г.н., доцент кафедри буріння та геології Соколов А.Б.

посада, наук. ступінь, ПІБ



підпис, дата

Виконавець роботи

Морщавка Кирило Олександрович
студент групи 2МНБ

студент, ПІБ



підпис, дата

Консультант за 1 розділом

к.т.н. доц. доцент кафедри БіГ Морщавка О.В.

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 2 розділом

к.т.н. доц. доцент кафедри БіГ Морщавка О.В.

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 3 розділом

к.т.н. доц. доцент кафедри БіГ Морщавка О.В.

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Дата захисту 22-01-2026

Полтава, 2026

**Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»**

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри буріння та геології
Винников Ю.Л.

«3» 09 Винник 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Морщавка Кирило Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності роторних керованих систем при бурінні горизонтальних свердловин

2. Керівник роботи доц. кафедри буріння та геології, к.г.н. Соколов А.Б.

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

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

3. Строк подання студентом роботи 22.01.2026р.

4. Вихідні дані до роботи

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

2. Проекти на влаштування свердловин (за необхідності).

3. Геологічні звіти за профілем роботи (за необхідності)

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

Анотація

Вступ

1. Аналітичний огляд літературних джерел та сучасного стану досліджуваної проблеми

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

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

Загальні висновки по роботі

Список використаних джерел

Додатки (за необхідності)

6. Перелік графічного матеріалу

Презентація із основними результатами кваліфікаційної роботи

7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	К.Т.Н., доц. Малам О.В.		
2	К.Т.Н., доц. Коргенко М.О.		
3	К.Т.Н., доц. Малам О.В.		

8. Дата видачі завдання 3.09.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

(підпис)

Морщавка К.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	6
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	11
1.1. Аналіз світового досвіду буріння горизонтальних свердловин	11
1.2. Переваги застосування горизонтальних свердловин у розробці нафтогазових родовищ	15
1.3. Проблематика та технологічні виклики при спорудженні горизонтальних стовбурів.....	17
1.4. Аналіз сучасних технічних рішень горизонтального буріння.....	23
1.5. Висновки до розділу 1. Мета та задачі досліджень.....	26
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОТОРНО-КЕРОВАНИХ СИСТЕМ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ БУРІННІ	28
2.1. Аналіз принципу дії та функціональні складові роторно-керованих систем	28
2.2. Аналіз моделей роторно-керованих систем.....	29
2.3. Аналіз досвіду застосування роторно-керованих систем	33
2.4. Аналіз переваг та недоліків застосування роторно-керованих систем при горизонтальному бурінні.....	36
2.5. Висновки до розділу 2.....	39
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОТОРНО-КЕРОВАНИХ СИСТЕМ ДЛЯ УМОВ УКРАЇНСЬКИХ РОДОВИЩ ..	41
3.1. Систематизація ключових геолого-технологічних факторів впливу на ефективність роторно-керованих систем.....	41

3.2. Інтеграція проектної конструкції та профілю свердловини в методику оцінки ефективності РКС	44
3.3. Технологічні параметри процесу буріння.....	45
3.4. Висновки до розділу 3.....	48
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ...	Помилка! Закладку не визначено.

АНОТАЦІЯ

Морщавка К.О. Підвищення ефективності роторних керованих систем при бурінні горизонтальних свердловин: Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 185 Нафтогазова інженерія та технологій, освітня програма «Буріння нафтових і газових свердловин» – Полтава; Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – 2026.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану технологій горизонтального буріння та проблематики їх застосування в складних геолого-технічних умовах. Визначено ключові переваги роторно-керованих систем як інструменту для досягнення високої швидкості, точності та безпеки буріння, що формує основу для подальшого дослідження.

Другий розділ містить дослідження принципів роботи, конструктивних особливостей та класифікації сучасних моделей РКС. На основі порівняльного аналізу світового досвіду їхнього застосування виокремлено ключові технологічні тенденції (інтелектуалізація, інтеграція з LWD) та систематизовано вимоги до РКС для ефективної роботи в умовах, аналогічних українським родовищам, з урахуванням характерних літологічних комплексів, термобаричних умов і технологічних ризиків.

В третьому розділі розроблено методику комплексної техніко-економічної оцінки ефективності застосування різних типів РКС. На основі систематизації геолого-технологічних факторів конкретного родовища запропоновано систему критеріїв та алгоритм вибору оптимальної системи, спрямований на максимізацію економічного ефекту через скорочення часу буріння та зниження ризиків. Розроблено практичні рекомендації щодо застосування РКС для вітчизняних умов.

Ключові слова: горизонтальне буріння, роторно-керована система (РКС), геолого-технічні умови, українські родовища.

ANOTATION

Morchavka K.O. Improving the Efficiency of Rotary Steerable Systems in Horizontal Well Drilling. Master's Thesis in Specialty 185 "Oil and Gas Engineering and Technology", Educational Program "Drilling of Oil and Gas Wells". – Poltava; National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic". – 2026.

The work is dedicated to the current problem of improving the efficiency of constructing horizontal wells at oil and gas fields in Ukraine. The first section provides an analysis of the current state of horizontal drilling technologies and the challenges of their application in complex geological and technical conditions. The key advantages of Rotary Steerable Systems (RSS) as a tool for achieving high drilling speed, accuracy, and safety are identified, forming the basis for further research.

The second section contains a study of the operating principles, design features, and classification of modern RSS models. Based on a comparative analysis of world experience in their application, key technological trends (intellectualization, integration with LWD) are highlighted, and requirements for RSS for effective operation in conditions similar to Ukrainian fields are systematized, taking into account characteristic lithological complexes, thermobaric conditions, and technological risks.

The third section develops a methodology for a comprehensive technical and economic assessment of the efficiency of applying different types of RSS. Based on the systematization of geological and technological factors of a specific field, a system of criteria and an algorithm for selecting the optimal system are proposed, aimed at maximizing economic effect through reducing drilling time and lowering risks. Practical recommendations for the application of RSS for domestic conditions have been developed.

Keywords: horizontal drilling, rotary steerable system (RSS), geological and technical conditions, Ukrainian fields.

ВСТУП

Актуальність теми. Обґрунтування ефективності застосування роторно-керованих систем при бурінні горизонтальних свердловин ґрунтується на комплексному аналізі їхньої роботи порівняно з традиційними технологіями направленої буріння. Основна відмінність та перевага полягає в принципово іншому підході до керування траєкторією. Традиційні методи з використанням гвинтових забійних двигунів та відхилювачів вимагають циклічності процесу: для зміни кута необхідно зупинити обертання бурильної колони, орієнтувати відхилювач у потрібному напрямку, а потім вести буріння лише за рахунок роботи двигуна без обертання колони. Цей режим супроводжується низькою механічною швидкістю, посиленням зносу долота через ковзання, погіршенням очищення вибою та значною витратою часу. Роторно-керована система усуває ці обмеження, забезпечуючи безперервне обертання колони протягом усього інтервалу буріння, що прямо веде до різкого зростання швидкості проходки, іноді вдвічі, і скорочення загального часу будівництва свердловини, а отже, і скорочення найбільшої статті витрат – оплати дорогого бурового обладнання та бригади.

Ефективність також проявляється в якості створюваного стовбура свердловини. Крім того, система забезпечує гарну точність навігації, дозволяючи втримувати долото в цільовому продуктивному пласті, потужність якого часто не перевищує кількох метрів, на протяжності горизонтальної ділянки в сотні метрів. Таким чином, свердловина, пробурена за допомогою роторно-керованих систем не тільки будується швидше, але і має принципово вищі експлуатаційні характеристики.

Тому, обґрунтування ефективності роторно-керованих систем є всебічним і базується на синергії технічних, операційних та фінансових факторів, що робить їх не просто інструментом, а стандартом для сучасного ефективного та безпечного будівництва горизонтальних свердловин.

Мета досліджень – обґрунтувати техніко-економічну ефективність та розробити практичні рекомендації щодо застосування роторно-керованих систем для буріння горизонтальних свердловин з урахуванням специфічних геолого-технічних умов українських родовищ.

Задачі досліджень:

- проаналізувати сучасний стан технологій горизонтального буріння;
- дослідити принципи роботи, конструктивні особливості та класифікацію існуючих моделей роторно-керованих систем; провести порівняльний аналіз світового досвіду їхнього застосування в геолого-технічних умовах, аналогічних українським родовищам;
- розробити методику (критерії та модель) для комплексної техніко-економічної оцінки ефективності застосування різних типів роторно-керованих систем на конкретних українських родовищах.

Об’єктом дослідження – процес буріння горизонтальних свердловин на нафтогазових родовищах України.

Предмет дослідження – ефективність застосування роторно-керованих систем для формування оптимальної траєкторії горизонтального стовбура в умовах українських геологічних розрізів.

Методи дослідження: аналіз науково-технічної літератури, порівняльний аналіз технологій.

Наукова новизна отриманих результатів – отримали подальшого розвитку комплексне обґрунтування техніко-економічної ефективності застосування роторно-керованих систем для геолого-технічних умов українських родовищ.

Практичне значення роботи – результати дослідження сприятимуть підвищенню економічної доцільності розробки складних і малорентабельних запасів вуглеводнів в Україні, що є важливим для зміцнення енергетичної безпеки країни.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану технологій горизонтального буріння та проблематики їх застосування в складних геолого-технічних умовах. Визначено ключові переваги роторно-керованих систем як інструменту для досягнення високої швидкості, точності та безпеки буріння, що формує основу для подальшого дослідження.

Другий розділ містить дослідження принципів роботи, конструктивних особливостей та класифікації сучасних моделей РКС/RSS. На основі порівняльного аналізу світового досвіду їхнього застосування виокремлено ключові технологічні тенденції (інтелектуалізація, інтеграція з LWD) та систематизовано вимоги до РКС для ефективної роботи в умовах, аналогічних українським родовищам, з урахуванням характерних літологічних комплексів, термобаричних умов і технологічних ризиків.

В третьому розділі розроблено методику комплексної техніко-економічної оцінки ефективності застосування різних типів РКС. На основі систематизації геолого-технологічних факторів конкретного родовища запропоновано систему критеріїв та алгоритм вибору оптимальної системи, спрямований на максимізацію економічного ефекту через скорочення часу буріння та зниження ризиків. Розроблено практичні рекомендації щодо застосування РКС для вітчизняних умов.

Загальні висновки відображають головні результати, що отримано в роботі.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз світового досвіду буріння горизонтальних свердловин

З огляду на сучасні виклики нафтогазової галузі, пов'язані з необхідністю досягнення зростаючих цільових показників видобутку вуглеводнів та максимального залучення ресурсного потенціалу родовищ, буріння горизонтальних і свердловин складної просторової траєкторії у світі стало стандартною практикою [2]. Реалізація таких свердловин потребує високої точності керування траєкторією, стабільності процесу буріння та мінімізації непродуктивного часу, що зумовлює активне впровадження сучасних роторних керованих систем.

Провідні нафтогазовидобувні країни світу – США, Канада, Італія, Велика Британія, Франція, Норвегія та Нідерланди – широко застосовують технології буріння горизонтальних свердловин ще з середини другої половини ХХ століття. При цьому майже 95 % усіх горизонтальних свердловин, пробурених у світі, припадає на Канаду та Сполучені Штати Америки, що зумовлено активним використанням високоефективних технологій керування траєкторією буріння, зокрема роторних керованих систем.

Горизонтальні свердловини успішно застосовуються для розв'язання широкого кола інженерно-технологічних задач, а саме: розробки покладів, що залягають у складних геологічних умовах або у важкодоступних районах, підвищення коефіцієнта вилучення вуглеводнів із тонких і малопотужних пластів, ефективного дренажу нафтових облямівок у газонафтових покладах, а також розробки родовищ на пізній стадії виснаження. Використання роторних керованих систем у таких умовах дозволяє підвищити механічну швидкість

буріння, забезпечити стабільну орієнтацію стовбура свердловини в продуктивному інтервалі та зменшити ризик технологічних ускладнень.

На рис. 1.1 наведено порівняльні показники продуктивності горизонтального буріння на родовищах Канади та США, що підтверджують високу ефективність застосування сучасних технологій керування траєкторією свердловин, зокрема роторних керованих систем [2].

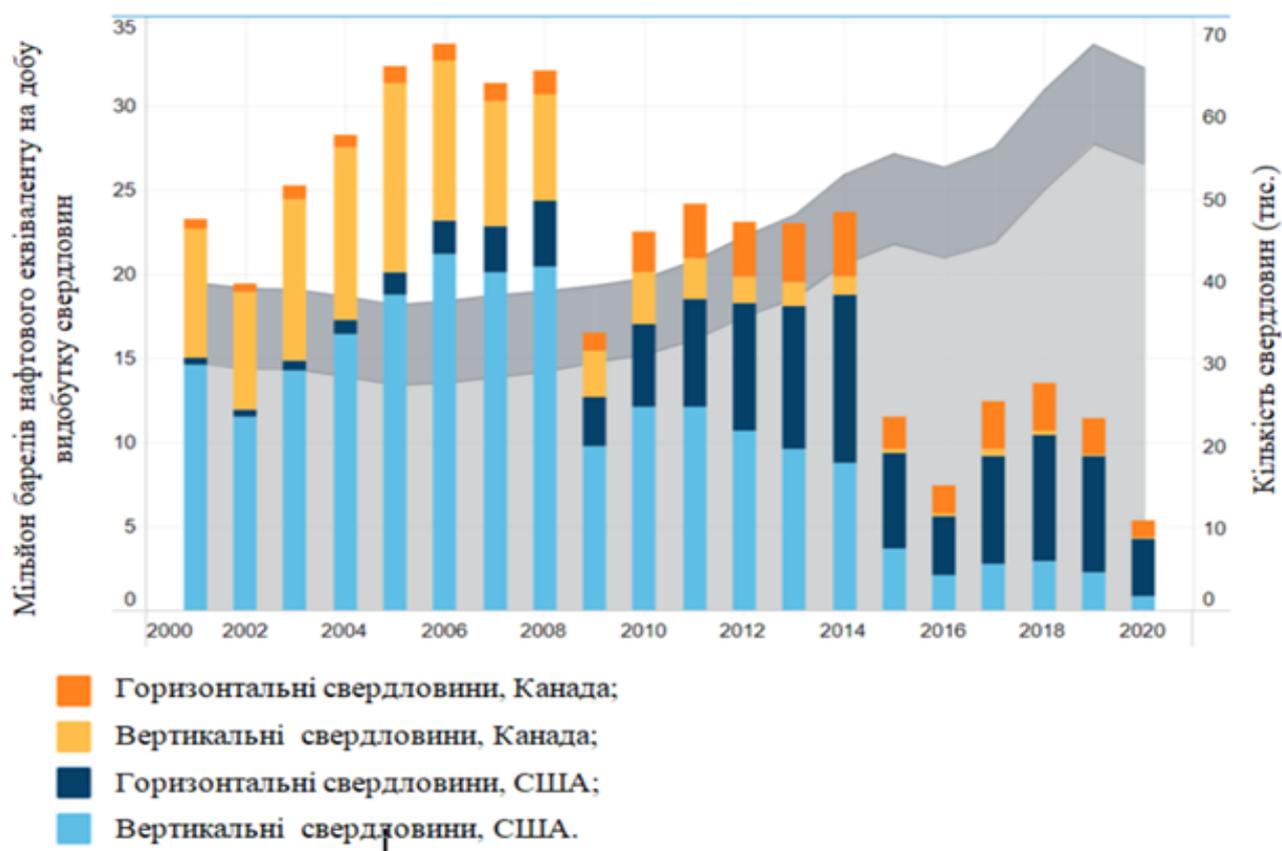


Рис. 1.1. Пробурені свердловини та видобуток нафти та газу в Канаді та США [3]

Пермський басейн у західному Техасі та східному Нью-Мексико є одним із найбільш продуктивних у світі нетрадиційних регіонів видобутку нафти та природного газу завдяки технологічному прогресу в методах буріння. Прогрес США в технології буріння дозволив їм бурити сучасні горизонтальні свердловини

довжину до 10 км. Довжина горизонтальної ділянки свердловини, є ключовим фактором хорошої продуктивності. У червні 2022 року на Пермський басейн припадало близько 43% видобутку сирої нафти в США та 17% видобутку природного газу в США (вимірюється як валовий видобуток) [11].

Найкращим канадським прикладом застосування горизонтального буріння є триасова формація Montni в західно-центральної частині Альберти. Видобуток в Montni бере свій початок з 1954 року. Спорудження горизонтальних свердловин дозволила отримати доступ до великих обсягів газу, що міститься в дрібнозернистих породах глибше в басейні на заході, створивши одну з найбільших можливостей видобутку газу в Північній Америці. Буріння горизонтальних стовбурів свердловин також були застосовано до пластів нафти з низькою проникністю, забезпечуючи нове життя для багатьох старих фаворитів, включаючи колектори Cardium, Viking, Bakken, Slave Point та Swan Hills reservoirs.

В Україні перші горизонтальні свердловини пробурено в Бориславському нафтопромисловому районі. Свердловини бурились з використанням вітчизняних технічних засобів з метою їх відпрацювання і визначення ефективності горизонтального стовбура. Набутий досвід не знайшов підтримки спеціалістів для широкого впровадження спорудження горизонтальних свердловин на родовищах України [31]. Набагато пізніше на Долинському родовищі було забурено декілька пілотних бокових горизонтальних стовбурі (на глибині 2800-2900 м) з метою підвищення продуктивності. Як результат у цих свердловинах отримали підвищені у декілька разів дебіти нафти.

В 2004 році компанією «Укргазвидобування» виконувалося буріння свердловини №152 Яблунівського ГК, яка по проєкту мала глибину по вертикалі понад 3500 м. та довжину стовбура 4200 м. Згідно даних [25] виконати поставлені завдання не вдалось через недостатню технічну оснащеність та підготовку бурових організацій для будівництва, освоєння і дослідження горизонтальних свердловин.

Враховуючи попередні невдачі та помилки дозволило ПАТ «Укрнафта» успішно пробурила горизонтальну частину проектного профілю стовбура свердловини № 119Г Великобубнівського родовища. Насамперед було оптимально спроектовано значення структурно-реологічних, інгібуючих та фільтраційних властивостей бурового розчину та дотримано інноваційний принцип «тандем технологій». Інноваційний принцип «тандем технологій» включає підготовлення висококваліфікованого інженерно-технічного персоналу, впровадження сучасних наукових досліджень та технологій. Це дало змогу впродовж останніх 16 років на родовищах ПАТ «Укрнафта» успішно пробурити ряд свердловин з горизонтальними ділянками (довжина ділянок 100 м – 245 м). Результати їх буріння підтвердили технологічну можливість реалізації таких проектів та ефективність буріння свердловин зі складною просторовою будовою з метою збільшення видобутку вуглеводнів [36, 37]. Але, при збільшенні довжини горизонтальної ділянки починають виникати ускладнення, які потребують подальшого вивчення.

На сьогодні горизонтальне буріння охоплює широке коло питань та проблем. Їх вирішенню присвячено багато досліджень зарубіжних та вітчизняних вчених, зокрема Васько І.А., Крилов В.І, Коцкулич Я.С., Мессера А.Г., Мислюка М.А., Морри В., Муслімова Р.Х., Оганова О.С., Оганова Г.С. Поваліхіна А.С., Саковича Е.С., Сьювел М., Тахаутдінова Ш.Ф., Фурментро Д., Чернова Б.О., Чудика І.І., Хісамова Р.С., Ясова В.Г. та ін.

Проаналізувавши світовий та вітчизняний досвід буріння горизонтальних свердловин можна зробити висновок, що це один із перспективних напрямків розвитку нафтогазової галузі України. Але, водночас технологія буріння горизонтальних свердловин є складною та має низку труднощів.

1.2. Переваги застосування горизонтальних свердловин у розробці нафтогазових родовищ

Видобуток нафти та газу нерозривно пов'язаний із технологіями буріння свердловин, на які припадає значна частка капітальних витрат нафтогазової галузі – до чверті загального бюджету. У зв'язку з цим будь-яке вдосконалення процесів планування та реалізації буріння безпосередньо впливає на енергоефективність галузі та загальний енергетичний баланс. На сучасному етапі однією з найбільш значущих технологічних інновацій у нафтогазовій промисловості є буріння горизонтальних свердловин, застосування яких стало ефективним інструментом підвищення дебітів та інтенсифікації розробки нафтових і газових покладів [2, 6, 4, 17, 25, 26, 29].

Попри вищу вартість спорудження горизонтальних свердловин порівняно з вертикальними, їх використання є економічно доцільним у широкому спектрі геолого-фізичних умов. Вертикальні свердловини забезпечують ефективне дренавання пластів з високою проникністю, тоді як у низькопроникних колекторах швидкість фільтрації флюїдів істотно обмежена, що знижує економічну ефективність традиційного буріння. Горизонтальні свердловини, навпаки, забезпечують значне збільшення площі контакту зі пластом і створюють умови для інтенсифікації припливу вуглеводнів [15, 29].

Згідно з аналізом літературних джерел [3, 5, 22 – 27], ключовими перевагами горизонтального буріння є зростання нафтовилучення за рахунок розширення зони дренавання та підвищення ефективності впливу на продуктивний пласт. Горизонтальний стовбур дозволяє охопити значно більшу площу покладу порівняно з вертикальною свердловиною, що сприяє підвищенню коефіцієнта нафтовилучення та зменшенню необхідної кількості експлуатаційних свердловин. Потенційний дебіт горизонтальних свердловин у межах

продуктивного пласта може у кілька разів, а за окремими оцінками – до 10–15 разів, перевищувати дебіт вертикальних свердловин.

Актуальність застосування горизонтальних свердловин особливо зростає для родовищ, що перебувають на пізній стадії розробки. Більшість нафтових родовищ України характеризуються високим ступенем виснаженості та значною обводненістю продукції. В умовах активного утворення водяних конусів під вибоєм свердловин та необхідності роботи при низьких депресіях буріння горизонтальних стовбурів є одним із найбільш ефективних геолого-технічних заходів для вилучення залишкових запасів вуглеводнів.

Додатковою перевагою горизонтального буріння є можливість відновлення продуктивності малodeбітних та ліквідованих свердловин шляхом забурювання бокових горизонтальних стовбурів [25, 29, 30]. Такий підхід дозволяє залучити до розробки нові ділянки пласта при суттєво менших матеріальних і часових витратах порівняно з будівництвом нових свердловин. Незважаючи на те, що вартість спорудження горизонтальних свердловин перевищує вартість вертикальних у середньому на 20–30 %, ці витрати повністю компенсуються покращеними технологічними та економічними показниками експлуатації.

Крім того, використання горизонтальних свердловин сприяє зниженню негативного впливу на довкілля завдяки скороченню кількості бурових майданчиків, оптимізації землевідведення та забезпеченню доступу до ресурсів у районах із чутливими природними умовами.

На рис. 1.2 зведено основні переваги технології буріння горизонтальних свердловин.

Отже, буріння горизонтальних свердловин є ефективним технологічним рішенням, яке дозволяє суттєво підвищити продуктивність свердловин, інтенсифікувати розробку покладів та забезпечити економічну доцільність видобутку в складних геолого-фізичних умовах, особливо на родовищах пізньої стадії розробки. Водночас реалізація потенційних переваг горизонтального буріння значною мірою залежить від точності керування траєкторією свердловини, стабільності її положення в продуктивному пласті та мінімізації

технологічних ризиків. Це зумовлює необхідність застосування та подальшого вдосконалення роторних керованих систем, ефективність яких безпосередньо впливає на якість буріння горизонтальних свердловин і кінцеві техніко-економічні показники їх експлуатації.



Рис. 1.2 Переваги технології буріння горизонтальних свердловин

1.3. Проблематика та технологічні виклики при спорудженні горизонтальних стовбурів

При бурінні горизонтальних ділянок свердловин можуть виникати різні труднощі: високі значення коефіцієнта тертя, крутного моменту та опору, нестабільність стовбура, неефективне видалення шламу та ін. [1 – 3, 9 – 13, 25, 31].

У горизонтальних свердловинах (як на ділянках набору зенітного кута, так і в горизонтальній частині) існує проблема збільшення крутного моменту та сил

опору бурильної колони. Тому існує тенденція до того, що бурильна колона лягає на нижню стінку стовбура свердловини. Як наслідок маємо велику площу контакту з породою, збільшується опір тертя та обмежується можливість передачі навантаження (ваги) на долото. Це по-перше призводить до підвищеної ймовірності заклинювання та застрягання труби. По-друге призводить до нестабільності стовбура свердловини, неможливості або ж труднощів у каротажі, спуску свердловини та цементуванні обсадної труби. Тому поява значного крутного моменту та сил опору є важливими фактором, оскільки він накладає серйозні обмеження на операції буріння.

Під час буріння горизонтальної ділянки стовбура існують труднощі контролю стабільності (стійкості) стінок свердловини, що сильно пов'язана з циркуляцією та втратами рідини [19]. Стабільність стовбура свердловини залежить від фізичних і хімічних взаємодій між пластом і розчином. Фізична стабільність є критичною в горизонтальній частині стовбура свердловини. Горизонтальний стовбур свердловини несе вертикальні напруги на відміну від горизонтальних напруг у вертикальних свердловинах. Згідно досліджень [19] стабільність пласта при високій насиченості вища, якщо повністю врахувати вплив проміжного головного напруження. Для підтримки стабільності пласта при низькій насиченості потрібні більш висока густина бурового розчину. Збільшена щільність бурового розчину на 7~10% під час буріння дозволить з великою ймовірністю запобігти обваленню стовбура свердловини.

Гradient тиску обвалення зростає на 7,2-9,2% від вертикального стовбура свердловини до горизонтального. Щоб запобігти руйнуванню стовбура свердловини, необхідна безпечна щільність, яка задовольняє як горизонтальні, так і вертикальні ділянки. Враховуючи умови обвалення, градієнта тиску розриву та безпечного вікна щільності, пропонується розташувати свердловину вздовж азимута 60-120°, що може значно знизити ризики при бурінні.

Неякісне очищення стовбура свердловини призводить до накопичення шламу, що в свою чергу призводить до серйозних проблем. Усунення цих

проблем може коштувати дуже дорого та перевищувати вартість профілактичних заходів, з покращення очищення свердловини, у багато разів [9 – 12]. Коли горизонтальний стовбур свердловини недостатньо очищений, затрубний тиск значно зростає, що може легко призвести до витоків пласта, викидів та інших аварій.

Неефективне очищення свердловини впливає на швидкість проходки і як наслідок, спричиняє втрату рідини, нестабільність еквівалентної циркулюючої щільності у затрубному просторі та механічне застрягання бурильної труби. Близько 30% усіх застряглих труб у вертикальних свердловинах пов'язані з проблемою очищення свердловини. У горизонтальних свердловинах, цей показник становить понад 80% [9, 13, 31]. Це пов'язано з тим, що на відмінно від вертикальних свердловин в горизонтальних виділяють три зони очищення. Переміщення шламу та ступінь очищення вибурених частинок породи залежить від зенітних кутів ділянок свердловини. А, саме 1 зона – вертикальна ділянка свердловини (з кутом відхилення 0° – 30°); 2 зона – ділянка свердловини з відхиленням 30° – 65° ; 3 зона – горизонтальна ділянка свердловини (з відхиленням 65 – 90°).

На рис. 1.3 представлена схема переміщення шламу в горизонтальній свердловині.

У викривленій частині свердловини з кутом відхилення 30° – 65° відбувається накопичення шламу. Тобто формується область осідання шламу, що вимірюється в сантиметрах. Найбільш чудовою рисою цього кута відхилення є те, що при зупинці насосів накопичений об'єм шламу починає ковзати та спускаються лавиною вниз до вибою свердловини. Цей процес суттєво змінює стратегію очищення стовбура свердловини порівняно з вертикальною свердловиною. На ділянках з кутом нахилу 45° шлам направляється до нижньої стінки свердловини, але легко може бути приведений в рух рідиною. Коли зупиняються насоси, шлам скочується по стінці, поки її кут нахилу не стане занадто великим і утворюються затори.

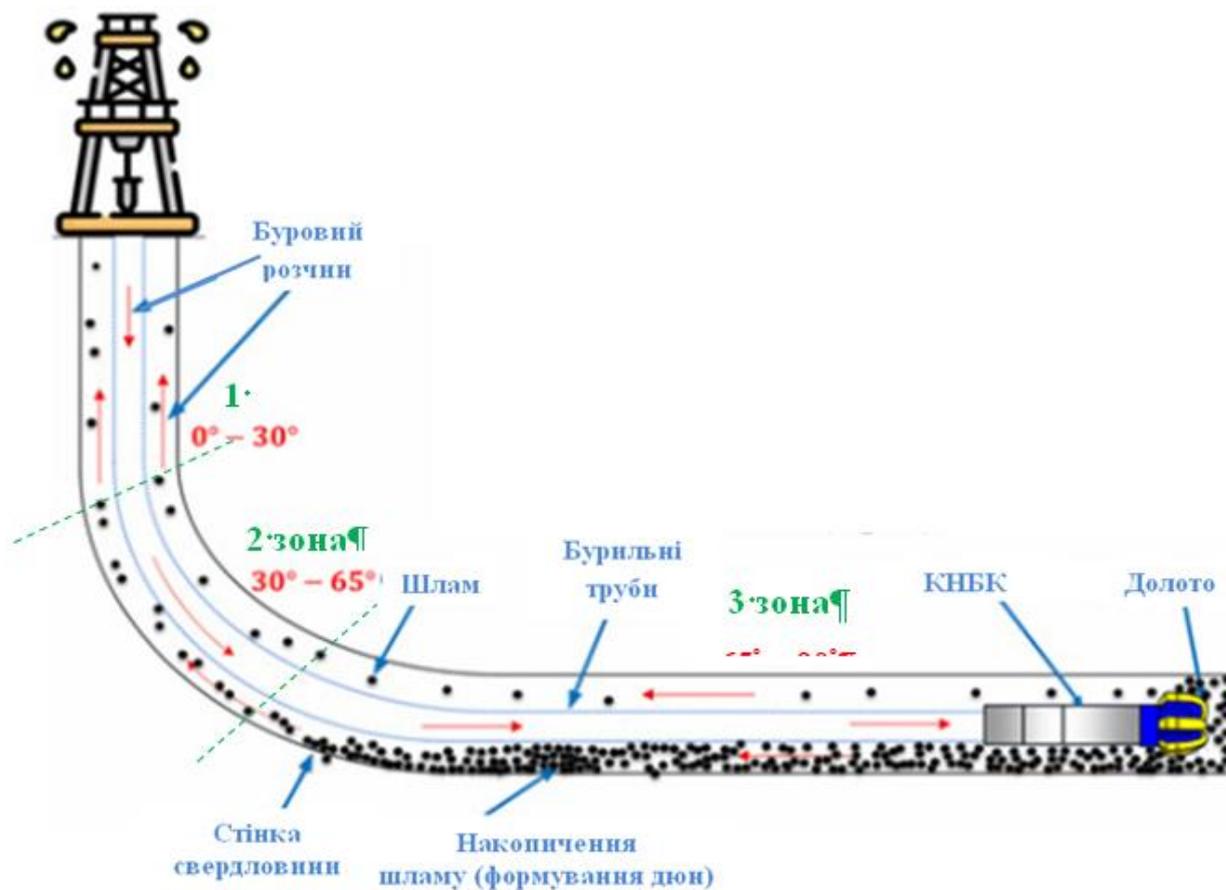


Рис. 1.3. Схема переміщення шламу в горизонтальній свердловині

В горизонтальній ділянці стовбура при 65° – 90° вибурена порода падає на нижню стінку свердловини. Як наслідок, формується безперервний шар вибуреної породи великої довжини. Хоча тут вже немає небезпек, пов'язаних з обвалом накопиченого шламу, проте очищення стовбура в даному середовищі становить ще більше проблем. А саме, більша витрата часу. У свердловині з великим кутом нахилу рухаються тільки поверхневі шари шламу, тоді як весь розчин рухається зверху. Потрібен механічний вплив для руху шламу незалежно від в'язкості та швидкості течії розчину.

Отже, шлам виноситься на денну поверхню буровим розчином і веде себе по-різному залежно від зенітного кута свердловини:

– від 0 град до ± 30 град. Шлам знаходиться у зваженому стані, при цьому відбувається швидке очищення. Напрямок руху розчину протилежно силі тяжіння. Щільність розчину постійна.

– від ± 30 град до ± 65 град. Середня швидкість очищення. Частина шламу рухається вгору, ковзаючи у висхідному потоці вниз під дією сили тяжіння. Щільність розчину тим вища, чим ближче до труби. Усі частки шламу через 5–7 свічок виявляються на бурильній трубі. Високий ризик утворення та сходження лавини (запустити лавину може СПО, зміна продуктивності насосів, розходження або обертання інструменту);

– більше ± 65 град. Повільне очищення. Напрямок руху розчину не протилежно силі тяжіння і не перешкоджає осадженню. Частина шламу рухається вниз, падаючи в потоці під дією сили тяжіння, утворюють нерухомий шар шламу. Щільність розчину тим вища, чим ближче до труби. Всі частинки шламу (барита) через 1-2 свічки виявляються на бурильній трубі.

При недостатньому механічному впливі на рух шламу в горизонтальній ділянці можливе поступове закупорювання отвору, що призводить до розривів і втрати циркуляції під час спуско-підйомних операцій [16]. Отже, існує проблема нестабільності еквівалентної циркулюючої густини (ЕЦГ/ ECD) у затрубному просторі (комбінація статичної щільності бурового розчину та втрати тиску в затруб'ї). ЕЦГ і очищення свердловини взаємопов'язані.

ЕЦГ є функцією наступних змінних: щільність бурового розчину; накопичення завислого шламу в кільцевому потоці; падіння тиску в затрубному просторі.

Втрата тиску в затрубному просторі зростає при збільшенні довжини затрубного простору, що призводить до безперервного збільшення ЕЦГ з виміряною глибиною. Це проблема, коли градієнт пластового тиску (градієнта гідророзриву) є вузьким. Швидкість потоку можна обмежити, щоб контролювати втрату тиску в кільцевому просторі та зменшити ЕЦГ, але це може вплинути на якість транспортування шламу та спричинити коливання ЕЦГ. Це може спричинити розрив пласта та втрату циркуляції [1, 9, 10].

Також існують проблеми, такі як передчасне зношування долота та надмірний опір і крутний момент на бурильній колоні [9, 10].

Погане очищення свердловин призводить до втрати понад 70% часу під час буріння [19, 22]. На досвіді буріння США доведено, що при правильному керуванні очищенням стовбура досягаються найкращі показники проходки на день. А отже, набагато простіше і ефективніше підтримувати свердловину чистою.

Проведений аналіз технологічних труднощів та обмежень при бурінні горизонтальних свердловин свідчить, що реалізація таких проєктів супроводжується значною кількістю технічних та технологічних викликів. До основних із них належать складність точного керування траєкторією свердловини, підвищене тертя та зростання осьових і крутильних навантажень на бурильну колону, нестійкість стінок свердловини, обмеження щодо ефективного очищення вибою, а також підвищені ризики прихоплень і ускладнень у довгих горизонтальних інтервалах. Зазначені фактори безпосередньо впливають на техніко-економічні показники буріння, збільшуючи тривалість робіт, витрати матеріальних ресурсів і ймовірність аварійних ситуацій.

Досвід промислового буріння показує, що традиційні методи керування траєкторією із застосуванням гвинтових вибійних двигунів у поєднанні з періодичним обертанням бурильної колони мають обмежені можливості щодо забезпечення стабільності профілю та високої точності проходження горизонтальних ділянок, особливо в складних геолого-технічних умовах. Це обумовлює необхідність переходу до більш досконалих технологічних рішень, здатних забезпечити безперервне обертання бурильної колони, зниження контактних навантажень, покращення очищення вибою та підвищення керованості процесу буріння.

У зв'язку з цим для подолання виявлених технологічних труднощів доцільним є застосування сучасних технічних рішень горизонтального буріння, зокрема роторних керованих систем, інтегрованих вибійних вимірювальних комплексів, інтелектуальних систем керування режимами буріння та методів

оптимізації траєкторії в режимі реального часу. Тому на наступному етапі дослідження необхідно проаналізувати сучасні технічні рішення, що застосовуються при бурінні горизонтальних свердловин, оцінити їхні функціональні можливості, переваги та обмеження, а також визначити їхній вплив на ефективність і надійність процесу буріння в складних геолого-технічних умовах.

1.4. Аналіз сучасних технічних рішень горизонтального буріння

Метою похило-скерованого буріння є забезпечення досягнення заданої точки входу в продуктивний пласт із віддаленого або обмеженого за площею бурового майданчика. Це дозволяє мінімізувати кількість бурових майданчиків, зменшити вплив на навколишнє середовище та забезпечити доступ до запасів, розташованих під населеними пунктами, водоймами, промисловими об'єктами або в зонах з обмеженим землевідведенням. Реалізація таких завдань досягається шляхом побудови складних просторових профілів свердловин.

Разом із горизонтальне буріння є складним технологічним процесом [2, 4, 5, 7, 9, 13, 17, 22, 28]. Через високу абразивність, анізотропність і неоднорідність гірських порід траєкторія свердловини може суттєво відхилитися від проєктної. Тому ключовою проблемою є ефективне та стабільне керування формою викривлення стовбура свердловини. Викривлення відбувається по складній просторовій кривій, геометричні параметри якої залежать від сукупності геологічних, технічних і технологічних факторів [27, 29].

Практична реалізація буріння свердловин зі складною просторовою орієнтацією потребує не лише точних розрахунків траєкторії, але й застосування сучасного бурового обладнання, вимірювальних систем та високотехнологічних методів керування процесом буріння.

На практиці буріння різних інтервалів свердловини — вертикальної ділянки, інтервалів набору zenітного кута та горизонтальної стабілізації — традиційно виконується із застосуванням обертальної технології буріння [10, 21, 22, 30]. Обертання долота може здійснюватися як від верхнього приводу (ротора) бурової установки, так і за допомогою гвинтових вибійних двигунів (ГВД). Комбінування цих методів дозволяє формувати необхідний профіль, однак має обмеження щодо точності, керованості та стабільності траєкторії.

Контроль просторового положення свердловини передбачає регулярне вимірювання zenітного кута та азимута в процесі буріння [27]. Висока точність реалізації проєктного профілю забезпечує [22, 27, 28, 29]:

- доведення свердловини до проєктної глибини без аварій та ускладнень;
- скорочення часу будівництва та матеріальних витрат;
- безперешкодне проходження компоновок низу бурильної колони, обсадних колон і елементів підземного обладнання;
- надійну та довготривалу експлуатацію свердловин.

Аналіз літературних джерел [1, 3, 8, 22, 27–29, 42, 43] свідчить, що досягнення високої точності похило-скерованого буріння сьогодні забезпечується застосуванням інформаційно-вимірювальних та керуючих систем, структурна схема яких наведена на рис. 1.4.

До них належать системи контролю та автоматизації технологічних параметрів буріння [3], зокрема управління навантаженням на долото, частотою обертання, витратою бурового розчину, а також діагностика стану обладнання та автоматизація спуско-підіймальних операцій. Безперервний контроль траєкторії реалізується за допомогою вибійних інформаційно-вимірювальних систем, таких як телеметричні системи MWD, системи каротажу під час буріння LWD та роторні керовані системи (RSS) [7]. Важливу роль також відіграють системи збору, обробки та візуалізації геолого-технологічних даних у режимі реального часу [8].

На етапі проєктування значного розвитку набувають методи оптимізації траєкторії свердловини на основі великих масивів даних та технологій штучного інтелекту. Інтелектуальне проєктування включає прогнозування поведінки траєкторії, оцінку ризиків відхилення та оперативне коригування режимів буріння в реальному часі [1].

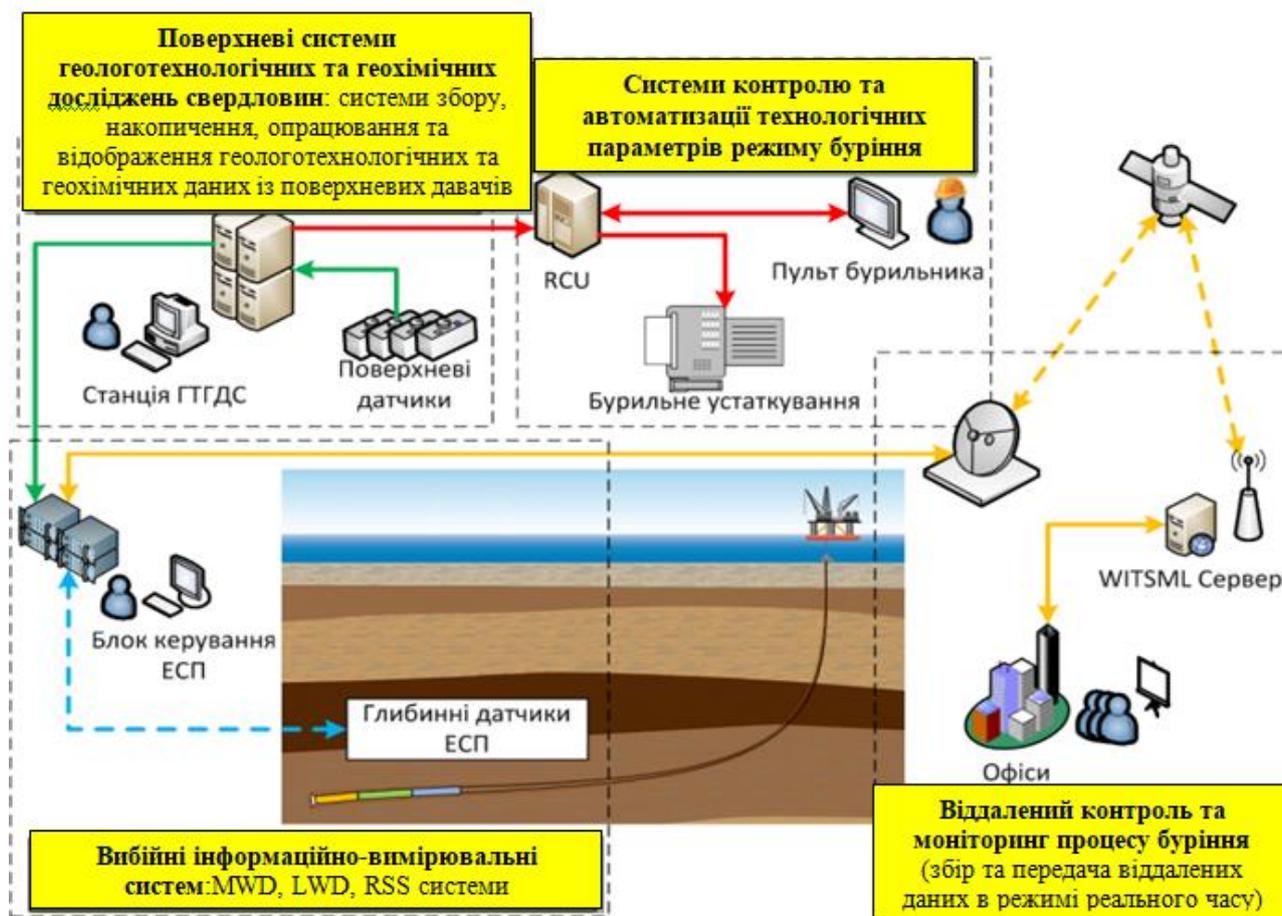


Рис. 1.4. Структурна схема інформаційних систем, які застосовуються в сучасному промисловому похило-скерованому бурінні

У світовій практиці близько 30 % похило-скерованих і горизонтальних свердловин буриться з використанням RSS, причому ця частка постійно зростає. Провідні міжнародні сервісні компанії (Halliburton, SLB, Baker Hughes) активно впроваджують інтелектуальні роторні керовані системи з елементами машинного навчання та автоматизованого керування траєкторією [17]. Прикладом є система iCruise Intelligent RSS компанії Halliburton [36].

У зв'язку з цим доцільним є детальний розгляд сучасного технічного обладнання та технологічних рішень, що забезпечують високу точність і ефективність похило-скерованого буріння, зокрема гвинтових вибійних двигунів, телеметричних систем та роторних керованих систем, як перспективного напрямку підвищення ефективності буріння горизонтальних свердловин.

1.5. Висновки до розділу 1. Мета та задачі досліджень

1. Проведений аналіз світового досвіду та сучасного стану технологій дозволив встановити, що горизонтальне буріння є ключовим інструментом підвищення ефективності розробки нафтогазових родовищ. Воно забезпечує суттєве збільшення контакту стовбура з пластом і покращення економічних показників проектів.

2. Виявлено, що процес спорудження горизонтальних стовбурів пов'язаний із значними технологічними викликами. До них належать забезпечення точності навігації в тонкому цільовому інтервалі, підтримання якісної очистки свердловини від шламу, стійкості довгого необсаженого стовбура та управління складними режимами буріння в неоднорідних геологічних умовах.

3. Аналіз показав, що серед сучасних технічних рішень саме роторно-керовані системи надають найбільш комплексну відповідь на ці виклики.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу визначаються мета та завдання дослідження:

Мета досліджень – обґрунтувати техніко-економічну ефективність та розробити практичні рекомендації щодо застосування роторно-керованих систем для буріння горизонтальних свердловин з урахуванням специфічних геолого-технічних умов українських родовищ.

Задачі досліджень:

–проаналізувати сучасний стан технологій горизонтального буріння;

–дослідити принципи роботи, конструктивні особливості та класифікацію існуючих моделей роторно-керованих систем; провести порівняльний аналіз світового досвіду їхнього застосування в геолого-технічних умовах, аналогічних українським родовищам;

–розробити методику (критерії та модель) для комплексної техніко-економічної оцінки ефективності застосування різних типів роторно-керованих систем на конкретних українських родовищах.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОТОРНО-КЕРОВАНИХ СИСТЕМ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ БУРІННІ

2.1. Аналіз принципу дії та функціональні складові роторно-керованих систем

Принципова основа роторно-керованої системи полягає у забезпеченні безперервного обертання бурильної колони з одночасною корекцією просторового положення долота без зупинок процесу. Це корінним чином відрізняє РКС від традиційних методів з гвинтовими забійними двигунами, які вимагають циклу «зупинка обертання – орієнтація – буріння без обертання». Фізичний принцип управління ґрунтується на створенні контрольованої бокової сили або зміщення осі в інструменті, що знаходиться безпосередньо над долотом.

Два фундаментальних принципи дії, що лежать в основі класифікації РКС/RSS:

Принцип «Виштовхування» (Push-the-bit)/ Система створює бокову силу, що «штовхає» корпус інструменту в потрібному напрямку. Це зазвичай реалізується через гідравлічні поршні (опорні лопаті), які висувуються з корпусу та контактують зі стінкою стовбура. Сила реакції спрямовує долото в протилежний бік.

Принцип «Наведення» (Point-the-bit). Система «згинає» або зміщує вісь інструменту в заданому напрямку, «наводячи» на ціль саме вісь обертання долота. Це досягається за допомогою внутрішнього шарнірного механізму або системи ексцентриків, що змінює кут.

Функціональні складові сучасної РКС є високотехнологічним комплексом, що інтегрує механіку, гідравліку, електроніку та телеметрію. До ключових модулів належать:

Керуючий блок (навігаційно-обчислювальний модуль). Містить інерціальні датчики (акселерометри, гіроскопи) для безперервного визначення кута нахилу та

азимуту, мікропроцесор для обчислення поточного положення та генерації команд, а часто – інтегровані датчики геофізичного каротажу (наприклад, гамма-променевий).

Виконавчий механізм. Перетворює електронні команди у фізичне відхилення. В залежності від принципу, це може бути: блок гідравлічних поршнів з клапанами керування (push-the-bit), або механізм з шарніром, кільцевим дефлектором та приводом (point-the-bit).

Силовий/енергетичний модуль. Забезпечує живлення електроніки та роботу виконавчих механізмів. Використовує гідравлічну енергію потоку бурового розчину (турбогенератор або гідравлічний насос) або бортові літієві батареї.

Система зв'язку (телеметрії). Забезпечує двосторонній обмін даними з поверхневим обладнанням у реальному часі. Передає показники датчиків і статус системи нагору, а команди оператора (наприклад, зміну напрямку) – донизу. Використовує Impulse- (MWD), електромагнітну або волоконно-оптичну телеметрію.

Таким чином, сучасна РКС/RSS функціонує як автономний роботизований комплекс. Її алгоритм роботи являє собою замкнутий цикл: вимірювання поточних параметрів навігації та навколишнього середовища; порівняння з цільовою траєкторією; активація виконавчого механізму для відхилення. Ця функціональна здатність забезпечує не лише пряму економію часу, а й новий рівень точності та безпеки при спорудженні складних траєкторій.

2.2. Аналіз моделей роторно-керованих систем

Для практичного обґрунтування вибору технології необхідний аналіз конкретних технічних рішень, доступних на ринку. Цей пункт присвячено огляду та порівнянню сучасних моделей роторно-керованих систем провідних виробників, їх конструктивних особливостей, принципів роботи та ключових

експлуатаційних характеристик, що визначають сферу їх ефективного застосування.

Як приклад сучасної технології розглядається система Magnus від компанії Weatherford, що працює за принципом push-the-bit. Її ключові особливості включають [39]:

- Підвищена надійність в складних умовах. Система захищена міцними нееластомірними ущільненнями, що забезпечує стабільну роботу під високим тиском та в агресивних середовищах.

- Зниження ризику заклинювання. Оптимізована геометрія корпусу, обертовий зміщувальний блок та спеціальні пази для відведення шламу значно зменшують ймовірність прихоплювання бурильної колони.

- Точне управління траєкторією. Селективне витискування опорних лопатей дозволяє плавно керувати напрямком буріння, створюючи якісний стовбур із заданою кривизною, що спрощує подальші операції.

- Контроль та діагностика в реальному часі. Вбудована система зв'язку передає дані про стан інструменту та параметри буріння, дозволяючи оперативно корегувати процес та запобігати помилкам.

- Ефективне використання гідравліки. Застосування трьох клапанів забезпечує точне управління тиском, підтримку потрібної інтенсивності набору кривизни та зростання швидкості проходки.

- Автоматизоване керування. Власна система «автопілот» реалізує замкнутий контур управління, автоматично виправляючи відхилення траєкторії під час буріння.

Система PowerDrive Orbit G2 (Schlumberger) є однією з найсучасніших РКС/RSS/RSS на ринку, спроектованою для максимальної продуктивності та надійності. Для цього дослідження ключовими є наступні інженерні та експлуатаційні рішення цієї моделі []:

- Підвищена надійність у складних умовах. Конструкція системи, зокрема ущільнення типу «метал-метал», забезпечує стійкість до агресивних

бурових розчинів, високих температур і тисків, що критично важливо для тривалих інтервалів буріння на глибоких свердловинах.

- Високоточне управління та навігація. Система забезпечує безперервні вимірювання, що дозволяє в режимі реального часу точно визначати положення долота та корегувати траєкторію. Модель реалізує оптимізоване управління інтенсивністю викривлення, забезпечуючи необхідну кривизну на ділянках набору кута, але мінімізуючи її на прямолінійних відрізках для отримання плавного стовбура.

- Оперативна ефективність та зв'язок. Наявність подвійних каналів низхідного зв'язку дозволяє миттєво передавати команди з поверхні та швидко змінювати параметри роботи системи, що підвищує гнучкість управління процесом буріння.

- Пристосованість до складних режимів. Здатність ефективно працювати при швидкості обертання до 350 об/хв. Робить її придатною для буріння у важких умовах, де присутні явища заклинювання, ковзання та значні вібрації.

Аналіз даної моделі показує, що сучасні РКС/RSS/RSS є високотехнологічними комплексами, які інтегрують механічну міцність, передову електроніку та точну навігацію для безпосереднього впливу на ключові показники: зростання швидкості проходки, підвищення точності траєкторії та зниження операційних ризиків. Ці характеристики становлять основу для подальшої техніко-економічної оцінки їх ефективності.

Система iCruise X (Halliburton) репрезентує наступний крок у розвитку РКС/RSS/RSS – інтелектуалізацію та автоматизацію. З точки зору нашого дослідження, ключові аспекти цієї моделі такі:

- Автономне управління та автоматизація. Інтеграція з автономною буровою платформою LOGIX дозволяє системі самостійно керувати траєкторією в режимі реального часу, оптимізуючи процес для досягнення найкращих результатів за мінімальний час. Це пряме підвищення операційної ефективності.

- Висока обчислювальна потужність для точності. Наявність високошвидкісних процесорів та здійснення до 1000 вимірювань на секунду забезпечують безпрецедентну точність контролю положення інструменту та якості стовбура, що критично для складних профілів.

- Надійність у екстремальних умовах (при високих температурах, в агресивних бурових розчинах та під час буріння інтервалів з інтенсивним набором кривизни).

- Підвищена продуктивність (скороченню часу проходки та створенню плавного стовбура високої якості).

Аналіз iCruise X підкреслює, що основним резервом підвищення ефективності РКС/RSS є інтеграція передової електроніки, алгоритмів автономного керування та матеріалів нового покоління. Це дозволяє не лише реагувати на умови, але й прогнозувати та проактивно оптимізувати весь процес буріння, що є ключем до економії часу та коштів.

Сучасний розвиток технологій роторно-керованих систем характеризується чіткою тенденцією до їх глибокої інтелектуалізації та інтеграції з системами автоматичного управління на основі штучного інтелекту. Цей перехід від механічної до «розумної» автоматизації є ключовим драйвером підвищення ефективності всього процесу спорудження горизонтальних свердловин. Основним напрямком розвитку стала реалізація автономного або напівавтономного управління траєкторією, коли система на основі даних від масиву датчиків (вібрації, моменту, положення, гамма-каротажу) та передових алгоритмів самостійно приймає рішення щодо корекції курсу в реальному часі. Це дозволяє не лише мінімізувати затримки, пов'язані з людським фактором, але й досягати більшої точності при утриманні в цільовому пласті.

Одночасно, штучний інтелект активно застосовується для створення прогностичних моделей, здатних аналізувати геолого-технологічні параметри та передбачати оптимальні режими буріння, оцінювати ризики виникнення ускладнень або прогнозувати механічну швидкість проходки. Такі моделі, засновані на нейронних мережах або генетичних алгоритмах, трансформують

великі масиви операційних даних в корисні інструкції для системи. Критично важливим елементом цієї трансформації є максимальне наближення вимірювальних датчиків до долота та їх тісна інтеграція з керуючим модулем РКС/RSS. Наприклад, розміщення гамма-датчика на відстані близько метра від вибою дає можливість миттєво реагувати на зміни літології та корегувати траєкторію для точного «стеління» по пласту.

Досвід провідних сервісних компаній наочно демонструє практичну цінність такого підходу. Результатом є не просто поступове вдосконалення, а якісний стрибок у продуктивності: скорочення часу буріння, зниження операційних ризиків, збільшення довжини та якості горизонтальних інтервалів. Таким чином, інтелектуалізація РКС/RSS/RSS перестає бути експериментальною опцією, а стає новим стандартом ефективності, що формує вимоги до будь-яких сучасних рішень у галузі направленої буріння.

2.3. Аналіз досвіду застосування роторно-керованих систем

Міжнародний досвід, зокрема в геологічно складних регіонах, аналогічних українським, дає кількісні показники ефективності.

Так наприклад, застосування РКС/RSS/RSS в Румунії дозволило збільшити середню швидкість проходки на 26% та знизити рівні застрягань і ковзання на 50% порівняно з технологією гвинтових двигунів. Буріння інтервалу понад 2800 м за один прохід заощадило 9 днів і приблизно 2.5 млн дол. США [8].

Кувейт: Комбінація РКС/RSS з комплексами LWD дозволила виконати буріння та каротаж похило-скерованого інтервалу за один прохід, усунувши необхідність у окремому спуску каротажу на дроті та заощадивши 39 годин роботи бурової установки і близько 40 000 дол. США [8].

Мексика/Близький Схід: Використання систем (наприклад, Magnus RSS від Weatherford) для вирішення завдань з підтримки різкості вигину та високої

точності траєкторії призводило до економії в 2-3 дні бурового часу на кожному об'єкті, що еквівалентно сотням тисяч доларів.

Азербайджан (родовище Шах-Деніз, Каспійське море) для буріння складних розвідувальних свердловин у формаціях з високим вмістом глин та ризиками заклинювання застосовувалися інтелектуальні РКС/RSS. Це дозволило підвищити середню швидкість проходки на 15-20% порівняно з традиційними методами та точно виконувати геологічні цілі в нестійких інтервалах, мінімізуючи ризики. Ключовим фактором стало використання систем з можливістю миттєвої корекції на основі даних LWD.

Норвегія (Надра Північного моря): На офшорних родовищах з високою вартістю бурового часу застосування РКС/RSS для буріння похило-скерованих та горизонтальних інтервалів стало стандартом. Звіти операторів (наприклад, Equinor) вказують на те, що використання систем типу PowerDrive Archer (Schlumberger) для буріння інтервалів з великим відходом від вертикалі дозволило скоротити час будівництва секцій на 25-30% завдяки усуненню необхідності в багаторазових операціях зі зміни складу бурового розчину та додаткових спусків для каротажу.

Канада (родовища важкої нафти): При бурінні групових свердловин із кустових майданчиків РКС/RSS використовуються для точного розмежування стовбурів і уникнення колізій. Досвід показує, що завдяки високій точності управління азимутом та кутом нахилу вдається зменшити відстань між стовбурами до безпечного мінімуму, максимально щільно розміщуючи свердловини та збільшуючи охоплення пласта. Це призводить до підвищення коефіцієнта вилучення нафти на 5-7% для таких проектів.

У Бенгальській затоці в Східній Індії технологія RSS здійснила буріння глибокої розвідувальної свердловина з ухилом 34° в глинистій формації з прошарками пісковика, мергелю та вапнякової глини. Час буріння склав 192 год, із середньою швидкістю обертання 7,8 м/год.

На родовищі Саудівській Аравії, яке схильне до втрати циркуляції, диференціального залипання та проблем із сірководнем, використовуючи RSS

– Висока швидкість буріння. За рахунок обертання всіх зовнішніх елементів із швидкістю обертання бурильної колони технологія RSS забезпечує вищу швидкість буріння, скорочуючи загальний час на буріння.

– Спрямовують траєкторію свердловини без ковзання, що впливає на стабільність і орієнтацію бурильної колони для обертання в одному напрямку. Ковзання створює накопичення шламу, оскільки відсутність обертання утримує рідину в статичному стані, що ускладнює видалення розбуреної породи. Це призводить до того, що шлам збираються навколо вибою, спричиняючи прилипання бурильної колони до стінки свердловини. Також, при цьому ускладнюється передача ваги на долото, як результат не досягається запланована швидкість проходки. Завдяки інструментам RSS системи забезпечується безперервне обертання бурильної колони. Відповідно шлам утримується у підвішеному стані, дозволяючи рідині створювати вихор навколо бурильної колони для забезпечення якісного очищення стовбура свердловини. Це суттєво зменшує ризик застрягання або викривлення труби.

– Точне розміщення свердловини. Завдяки можливостям автономного керування, інструменти RSS забезпечують неперевершену точність розміщення стовбура свердловини, зменшуючи ймовірність дорогих помилок.

– Покращена якість стовбура свердловини. Обертіві керовані системи створюють більш гладкі стовбури свердловин, мінімізуючи потребу в додаткових операціях (очищення, шаблонування, обробка).

– Знижують звивистість. Забезпечує плавне проходження стовбура свердловини за розміром і контролює торець долота, що забезпечує більш точне керування напрямком і меншу звивистість.

– Знижують крутний момент та опір, що ефективно при бурінні свердловин з великим відходом від вертикалі та горизонтальних ділянок великої протяжності;

– Розширений доступ до стовбура свердловини. Завдяки навігації в складних геологічних формаціях інструменти RSS забезпечують розширений доступ до нафтових і газових пластів, максимізуючи потенціал видобутку.

– До складу входять підсистеми, що відхиляються, які поєднують у собі переваги використання ГВД.

– Дані системи є найбільш досконалими. Поєднують системами телеметрії та геонавігації за рахунок чого перетворилися на безпілотні засоби дистанційного управління похило-скерованих свердловин.

– Можливості цих систем вражають: при високій точності ($\pm 0,1^\circ$) і оперативності дані системи здатні здійснювати буріння свердловин будь-якої траєкторії у просторі довжиною до 13 кілометрів безперервними рейсами, довжина яких може становити понад 1000 метрів.

Незважаючи на свої численні переваги, RSS ситеми можуть мати деякі недоліки. Зокрема:

– Висока вартість. Особливо, якщо RSS ситеми використовувати в ситуаціях, коли точне керування напрямком руху не є першочерговим завданням. Щоб виправдати витрати на використання RSS ситеми, економія часу роботи бурової установки та інших витрат повинні бути більшими, ніж вартість цієї системи. А також заміна RSS ситеми, якщо вона втрачена в отворі, може перевищувати 1 мільйон доларів США.

– Обмежений вибір розмірів і типів доліт. Необхідно використовувати дорогі долота, спеціально розроблені для таких систем.

– Складність як механічної, так і електронної частини.

– Передчасний знос обсадних труб і бурильної колони за рахунок високих швидкостей обертання. Даний недолік можна дещо зменшити, використовуючи інтегровану силову секцію з RSS, але при цьому збільшує вартість.

– Залежними від бурової установки. Бурова установка забезпечує потужність роторного керованого буріння;

– Високі вимоги до очищення бурового розчину (низький вміст твердих частинок і матеріалів для усунення втрат);

– чутливість до вібраційних навантажень;

– введення додаткових датчиків в бурову систему (напірна лінія бурового насоса)

Згідно аналізу попередніх розділів використовувати RSS доцільно для буріння:

– У тісних або вузьких пластах, де потрібне точне управління напрямком;

– похило-скерованих інтервалів стовбура свердловини;

– Свердловин з великим відходом від вертикалі (ERD свердловини) та свердловин з горизонтальним закінченням великої протяжності – де ковзне буріння спричиняє високу еквіваленту щільність циркуляції (ЕЩЦ) та проблеми зі стабільністю стовбура.

– Надглибоких свердловин, де виникають проблеми з двигунами через підвищення температури пластів;

Загалом знання, коли вибрати роторну керовану систему, а коли використовувати високопродуктивний ГВД, надзвичайно важливо для оптимізації проекту буріння як з інженерної точки зору, так і з точки зору витрат.

2.5. Висновки до розділу 2

1. Принципова відмінність роторно-керованих систем від традиційних методів полягає в можливості одночасного обертання бурильної колони та точного керування траєкторією. Роторно-керовані системи забезпечують вищу механічну швидкість проходки, здатність будувати довгі та плавні стовбури з мінімальною звивистістю, що критично важливо для ефективного розкриття продуктивних пластів.

2. Сучасні роторно-керовані системи класифікуються за принципом відхилення долота на дві основні групи: «point-the-bit» (навести долото) та «push-the-bit» (виштовхнути долото). Обидва типи є складними електронно-механічними системами з автономним живленням, вбудованими датчиками

навігації (кут, азимут) та геофізичного каротажу (наприклад, гамма-каротаж), що передають дані на поверхню в реальному часі.

3. Незважаючи на переваги, основним обмеженням для масового впровадження роторно-керованих систем залишається висока вартість. Її вибір повинен розглядатися як стратегічне інвестиційне рішення, спрямоване на досягнення комплексного техніко-економічного ефекту через скорочення часу буріння, підвищення якості будівництва свердловини.

4. Економічний ефект від роторно-керованих систем формується насамперед за рахунок уніфікації технологічних операцій (буріння + каротаж за один прохід), мінімізації ускладнень (застрягання, ковзання, втрата циркуляції) та максимізації механічної швидкості завдяки безперервному обертанню та точному управлінню.

розрахованою для запобігання проявам та поглинанням. Документація виробника повинна містити чіткі рекомендації щодо якості бурового розчину.

Синтез у практичні рекомендації для методики оцінки:

Для обґрунтування вибору конкретної моделі РКС запропонована методика повинна включати ступінчасту систему фільтрів:

1. Чи відповідає заявлена робоча температура/тиск моделі умовам цільових інтервалів (S_{1w} , D_1) із запасом 20-25%? Чи має система сертифікацію для роботи в умовах ризику газопровівів? При негативній відповіді – модель відсіюється.

2. Геологічна ефективність. Чи забезпечує модель можливість інтеграції з LWD (гамма, опір) на відстані < 5-10 метрів від долота? Чи може її програмне забезпечення обробляти ці дані для геостерингу? Без цього – ризик не виконати геологічне завдання.

3. Операційна ефективність. Для верхніх інтервалів – яка максимальна механічна швидкість проходки в м'яких породах? Для всіх інтервалів – який гарантований ресурс (метраж пробурення) до відмови в абразивних умовах? Тут проводиться порівняння та розрахунок собівартості метра проходки.

4. Економічне обґрунтування. Вартість аренди відібраних моделей порівнюється не абстрактно, а з розрахованою економією від: а) скорочення часу буріння; б) уникнення витрат на боротьбу з ускладненнями (поглинання, прихвати); в) збільшення довжити ефективного розкриття колектора за рахунок високої точності.

Таким чином, систематизація факторів показує, що успішне застосування РКС на подібних родовищах України – це не лише питання її наявності, а результат комплексного інжинірингу, де технічні характеристики системи жорстко прив'язані до конкретних викликів геологічного розрізу.

3.2. Інтеграція проектної конструкції та профілю свердловини в методику оцінки ефективності РКС

Конструкція та профіль запроектованої свердловини є ключовими вхідними параметрами для формування методики техніко-економічної оцінки роторно-керованих систем. Аналіз проектних рішень дозволяє конкретизувати вимоги до РКС та визначити критерії, що безпосередньо впливатимуть на її ефективність.

Конструкція свердловини як система обмежень і вимог: Багатоколонна конструкція (направлення, кондуктор, проміжна, експлуатаційна колони та хвостовик) формує низку технологічних викликів, що визначають вибір РКС:

Прогресуюче звуження діаметра стовбура: Робота РКС у інтервалах буріння під останні дві колони (\varnothing 311.1 мм та \varnothing 215.9 мм) висуває вимоги до мініатюризації та надійності системи. Вибір моделі обмежений тими, що доступні для цих діаметрів і здатні нести необхідну геонавігаційну апаратуру (LWD).

Ізоляція ускладнених інтервалів: Призначення проміжної (до 1320 м) та експлуатаційної (до 2512 м) колон — захист від обвалів, сальників та газопроявів у девоні та силурі. Це означає, що РКС при бурінні цих інтервалів не має права на значну похибку, яка могла б призвести до ускладнень і невдалого спуску колони. Критерій точності та стабільності траєкторії стає пріоритетним.

Фінальна ціль — горизонтальний інтервал: Умови буріння хвостовика (інтервал 2589–3300 м по MD у пласті S_{1W}) є визначальними для всього вибору. РКС повинна забезпечити не просто проходження, а високоточне «стеління» протягом 591 метра в цільовому пласті. Це неможливо без інтеграції з LWD (гамма-каротаж, опір) для геостерингу в реальному часі.

Профіль свердловини та вимоги до маневреності РКС: Прийнятий п'ятиінтервальний похило-скерований профіль з горизонтальним завершенням безпосередньо визначає операційні вимоги:

Контрольована зміна кута: Профіль передбачає набір кута нахилу та зміну азимуту для входу в ціль. РКС повинна гарантовано забезпечувати необхідну інтенсивність викривлення (DLS) у точці закладання кривизни, будучи при цьому стійкою до побічних вібрацій.

Стабільність у прямолінійних інтервалах: Після набору потрібного кута система повинна точно його утримувати, мінімізуючи небажані відхилення. Для горизонтальної ділянки ця вимога є абсолютною.

Довжина проходки: Сумарна довжина стовбура по MD (понад 3300 м), особливо довгий горизонтальний інтервал, вимагає від РКС підвищеного ресурсу роботи без відмови. Економічні ризики втрати дорогого інструменту в такому стовбурі вкрай високі.

На основі аналізу конструкції та профілю формується наступна система критеріїв для порівняння РКС, що наведена в табл. 3.1.

3.3. Технологічні параметри процесу буріння

На основі аналізу запроєктованих рецептур бурових розчинів та режимів буріння визначено додатковий комплекс технологічних факторів, що суттєво впливають на експлуатацію роторно-керованих систем. Ці фактори визначають умови їх роботи в стовбурі та безпосередньо пов'язані з геологією та конструкцією свердловини.

Проєктна зміна типу розчину з глинистого на інвертну емульсію із поступовим зростанням щільності (від 1.12 до 2.25 г/см³) формує різні експлуатаційні умови. На початкових інтервалах (0-2800 м) – полімерні та глинисті розчини мають підвищену абразивність (вміст твердої фази до 40%) та здатність утворювати товсту кірку. Це вимагає від РКС підвищеної стійкості механічних частин (опорних лопатей, ущільнень) до зношування і забезпечення якісного очищення системи.

Таблиця 3.1 – Система критеріїв для порівняння РКС

Група критеріїв	Конкретний параметр	Обґрунтування (зв'язок із проектом)	Прикладне значення для вибору
Техніко-експлуатаційні	Сумісність з діаметром долота 215.9 мм та наявність LWD.	Необхідність буріння продуктивного інтервалу.	Фільтруючий критерій: модель, недоступна для Ø215.9 мм, відсіюється.
	Точність навігації (кут, азимут) та стабільність утримання заданої траєкторії.	Вимоги до якості стовбура для спуску колон і точного «стеління» в пласті.	Кількісне порівняння заявленої точності виробника.
	Максимальна інтенсивність викривлення	Відповідність проектному профілю закладання кривизни.	Перевірка: чи може система реалізувати проектний профіль.
	Термобаричний ресурс (>80°C, >35 МПа).	Умови в цільовому інтервалі на глибині понад 2500 м.	Фільтруючий критерій: гарантовані параметри повинні перевищувати розрахункові.
Операційно-економічні	Середня механічна швидкість проходки в породах, аналогічних розрізу (аргіліти, вапняки, пісковики).	Впливає на загальний час буріння та витрати на оренду бурового обладнання.	Розрахунок економії часу порівняно з базовим сценарієм (наприклад, з ГВД).
	Гарантований метраж роботи на відмову (MTBF).	Довжина горизонтального інтервалу та загальний метраж під зменшеним діаметром створюють ризик.	Оцінка ймовірності дозавершити інтервал без технічної відмови РКС.
	Вартість послуги (оренда, сервіс).	Пряма складова капітальних витрат.	Порівняння з очікуваною економією від скорочення часу та зменшення ризиків.

На цільових глибоких інтервалах (2800-7050 м) – перехід на інвертну емульсію з високою щільністю та низьким вмістом твердої фази (<10%) зменшує абразивне навантаження. Однак набуває значення корозійна активність водовуглеводневої суміші та її термостабільність при температурах до 172°C, а також вплив на еластомери та спеціальні покриття компонентів РКС. Низькі значення СНЗ емульсії можуть ускладнювати очищення вибою від шламу, що потребує оптимізації гідравліки РКС.

Заплановані режими буріння (навантаження на долото 60-130 кН, частота обертання 60-100 об/хв) базуються на традиційному роторному або комбінованому способі. Впровадження РКС потребує їх перегляду.

РКС, особливо системи push-the-bit, можуть бути чутливими до надмірного навантаження на долото, що може призвести до небажаного зносу опорних елементів або втрати точності керування. Частота обертання повинна бути узгоджена з технічними характеристиками конкретної моделі для забезпечення її стійкої роботи та ефективного очищення.

Прогнозовані витрати (від 10 до 50 л/с) впливають на охолодження електронних модулів РКС та роботу її гідравлічної системи, якщо вона використовує потік розчину для живлення. Зменшення витрат у вузьких інтервалах (під хвостовик) потребує перевірки достатності для коректної роботи обраної РКС.

Проект включає багато операцій калібрування стовбура, розбурювання цементних стаканів та відбору керна. Ці операції, як правило, виконуються у роторному режимі без активної корекції траєкторії. Впровадження РКС дає можливість інтегрувати ці операції в єдиний технологічний процес, наприклад, виконуючи калібрування з одночасною корекцією напрямку, що може додатково підвищити ефективність.

Отже, при виборі РКС необхідно додатково аналізувати:

– Сумісність матеріалів РКС із запроектованими типами бурових розчинів (особливо інвертною емульсією) на всій глибині.

- Відповідність гідравлічних характеристик РКС проектним витратам промивальної рідини, особливо в інтервалах під хвостовик.
- Можливість роботи в запланованому діапазоні WOB/RPM без втрати точності керування та перевищення допустимих навантажень на власні механізми.
- Операційну гнучкість. Бажано, щоб модель РКС дозволяла легко перемикатися між режимом активної корекції траєкторії та пасивного обертання для виконання допоміжних операцій.

Ці технологічні фактори, разом із геологією та конструкцією, формують повну картину вимог до РКС і повинні бути формалізовані у вигляді додаткових критеріїв у зваженій системі оцінки їх техніко-економічної ефективності.

3.4. Висновки до розділу 3

1. Аналізу літологічного розрізу, проектної конструкції свердловини, параметрів бурових розчинів та режимів буріння сформовано структуровану систему критеріїв. Вона включає як фільтруючі параметри (наприклад, мінімально допустимі температуру та тиск, діаметр), так і зважені показники для порівняльного аналізу (швидкість проходки, точність, ресурс, вартість).

2. Розроблений підхід передбачає алгоритм вибору оптимальної РКС, що починається з відсіву моделей за відповідністю базовим вимогам безпеки та умовам застосування, а закінчується порівняльним техніко-економічним моделюванням. Це дозволяє перейти від якісних міркувань до кількісного обґрунтування вибору конкретної технології для мінімізації ризиків і максимізації економічного ефекту від будівництва свердловини.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі вирішено важливу науково-технічну задачу з удосконалення застосування роторно-керованих систем для буріння горизонтальних свердловин з урахуванням специфічних геолого-технічних умов українських родовищ

1. Технологія роторно-керованих систем (РКС) є ключовим інструментом для підвищення ефективності горизонтального буріння на українських родовищах. Порівняльний аналіз світового досвіду та конструктивних особливостей сучасних моделей доводить, що РКС забезпечують вирішальні переваги порівняно з традиційними методами: підвищення швидкості проходки на 20-30%, точне виконання складних траєкторій та суттєве зниження операційних ризиків (заклинювання, обвали), що прямо впливає на економіку будівництва свердловин.

2. Успішне застосування РКС в Україні вимагає глибокого врахування специфіки місцевих геолого-технічних умов. Систематизація факторів впливу для типових розрізів показала, що основним обмеженням є термобаричні умови глибоких горизонтів та нестійкість верхніх відкладів. Вибір конкретної моделі РКС та її функціоналу (наявність інтегрованих датчиків LWD) повинен базуватися на аналізі літології, пластових тисків, температур та прогнозованих ускладнень, а не на узагальнених рекомендаціях.

3. Розроблена в роботі методика техніко-економічної оцінки надає практичний інструмент для обґрунтованого прийняття рішень. Запропонована система критеріїв та підхід до моделювання дозволяють кількісно порівнювати різні типи РКС для конкретних проектів, враховуючи як технічні параметри (точність, надійність), так і економічні фактори (вартість оренди, очікувана економія часу). Це дозволяє перейти від інтуїтивного вибору до науково обґрунтованої оптимізації капітальних витрат.

4. Впровадження сучасних РКС з функціями геостерингу є стратегічним напрямком для розвитку вітчизняної нафтогазової галузі. Практичні рекомендації, сформовані в результаті дослідження, спрямовані на підвищення економічної доцільності розробки складних запасів, зокрема в глибоких палеозойських відкладах. Це сприяє збільшенню видобутку вуглеводнів, зменшенню собівартості буріння та, як наслідок, зміцненню енергетичної безпеки України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білецький В. Моделювання силової секції гвинтових вибійних двигунів / В. Білецький, С. Ландар, Ю. Міщук // Mining of Mineral Deposits, 11(3), 15-22. – 2017. – <https://doi.org/10.15407/mining11.03.015>
2. Буріння свердловин: навч. посіб. [Електронний ресурс] / 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». – Електрон. текст. дані. – Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 294 с. – Режим доступу : <http://nmu.org.ua>
3. Васько І.С. Буріння скерованих свердловин / І.С. Васько, І.І. Чудик, І.І. Витвицький, А.І. Васько// Навчальний посібник – Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 387 с.
4. Долик Р.М. Вибір неорієнтованих компоновок низу бурильної колони для буріння свердловин роторним способом : дис. канд. техн. наук : спец. 05.15.10 «Буріння свердловин» – ІФНТУНГ МОН України, Івано-Франківськ, 2018. – 187 с.
5. Коровяка Є.А. Прогресивні технології спорудження свердловин: монографія [Електронний ресурс] / Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатів ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Електрон. текст. дані. – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. – 166 с.
6. Коцкулич Я.С. Застосування роторно-керованих систем при спорудженні похило-скерованих свердловин / Я.С. Коцкулич, В.Г. Вітрик, А.М. Лівинський // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения. - 2016. - Вып. 19. - С. 55-61. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pimi_2016_19_13
7. Кунцяк Я.В. Розробка та впровадження комплексу технічних засобів і технологій буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин (для умов нафтогазових родовищ України) : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра

техн. наук : спец. 05.15.10 «Буріння свердловин». – Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу, Івано-Франківськ, 2013 <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/4628>

8. Лівінський А.М. Удосконалення технології буріння скерованих свердловин суміщеним способом : автореферат дис. канд. техн. наук : спец. 05.15.10 «Буріння свердловин» – Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу МОН України, Івано-Франківськ, 2019. – 20 с.

9. Матвійків Т.М. Інформаційні технології усунення ударів та вібрацій в похилоскерованому бурінні : дис. канд. техн. наук : спец. 05.13.06 «Інформаційні технології» – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2016 – 155 с.

10. Мислюк М. А. Буріння свердловин. Т.3. Вертикальне та скероване буріння. /М. А. Мислюк, І. Й. Рибчин, Р. С. Яремчук. – К.: «Інтерпрес ЛТД», 2004 – 294 с.

11. Орловський В.М. Нафтогазовилучення з вантажодоступних і виснажених пластів / В.М. Орловський, В.С. Білецький, В.І. Сіренко// Харків: Харківський національний технічний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, НТУ «Харківський політехнічний інститут», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, видавництво «Новий світ – 2000», 2023. – 312 с.

12. Офіційний сайт компанії «APS-TECH» <https://www.apstech.com/systems/suresteer-drilling-systems/suresteer-rss-rotary-steerable-system/>

13. Офіційний сайт компанії «Baker Hughes»: <https://www.bakerhughes.com>

14. Офіційний сайт компанії «DENIMEX» <http://www.denimex.us/>

15. Офіційний сайт компанії «Gyrodax»: <http://www.gyrodax.com>

16. Офіційний сайт компанії «Halliburton»: <http://www.halliburton.com>

17. Офіційний сайт компанії «Schlumberger»: <https://www.slb.com>

18. Офіційний сайт компанії «Tianhe Oil Group» <https://www.tianheoil.com/>

19. Офіційний сайт компанії «Weatherford»: <https://www.weatherford.com>

20. Офіційний сайт компанії «Wenzel Downhole Tools» <https://wenzeltools.com/>

21. Офіційний сайт компанії ТОВ «Бурова техніка»
22. Стефурак Р. І., Яремійчук Р. С. Історичні нариси буріння нафтових і газових свердловин – від проекту до практики (погляд з минулого в майбутнє) // Мінер. ресурси України. – 2021. – № 3. – С. 24–27
23. Чепак А.В. Нафтогазоносність Дніпровсько-Донецької западини [Текст] / А. В. Чепак, О. М. Прищепка, І. В. Букач [та ін.] ; за ред. А. В. Чепака ; НАН України, Ін-т геологічних наук. – Київ : [б. в.], 2017. – 480 с.
24. Фем'як Я.М. Використання роторних керованих систем при бурінні похилих і горизонтальних ділянок свердловин / Я.М. Фем'як, О.В. Герасімов // Modern directions of theoretical and applied researches – 2015 – с. 245-260
25. Advanced data-driven model for drilling bit position and direction determination during well deepening / Koryabkin V, Semenikhin A, Baybolov T, Gruzdev A, Simonov Y, Chebuniaev I, et al.// In: Proceedings of the SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition; 2019 Oct 29-31; Bali, Indonesia. Richardson: OnePetro; 2019
26. A Novel Automated Model for Evaluation of the Efficiency of Hole Cleaning Conditions during Drilling Operations / Mohammed Al-Rubaii, Mohammed Al-Shargabi, Dhafer Al-Shehri// Appl. Sci. 2023, 13. <https://doi.org/10.3390/app13116464>
27. Automation of directional drilling system with remote supervisory control allows mile-a-day wells to be achieved in Appalachian Basin. article is based on a presentation at IADC World Drilling 2018, in Copenhagen, Denmark. <https://drillingcontractor.org/automation-of-directional-drilling-system-with-remote-supervisory-control-allows-mile-a-day-wells-to-be-achieved-in-appalachian-basin-48345>
28. Banna AL, Taher A, Kaiser MS, Rahman Cho GH. Application of Artificial Intelligence in Predicting Earthquakes: State-of-the-Art and Future Challenges. 2021

29. Biswas, K., Vasant, P.M., Vintaned, J.A.G. et al. A Review of Metaheuristic Algorithms for Optimizing 3D Well-Path Designs. *Arch Computat Methods Eng* 28, 1775–1793 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09441-1>
30. Bryant T. An operational comparison of push-the-bit rotary tearable tools APS Technology, Inc. – 2019 https://www.aps-tech.com/site/assets/files/1/aps_rss-white-paper.pdf
31. Drilling Engineering. Towards Achieving Total Sustainability Sustainable Oil and Gas Development Series. – 2021, Pages 317-382
32. Hitting the Bullseye: The Evolution of RSS and LWD Technology in Horizontal Wells / Julio Loreto, Brad Zukiwsky, Aly Bassiouny, Onochie Michael Okorie // *Topics Journal of Petroleum Technology* – 2022. <https://jpt.spe.org/hitting-the-bullseye-the-evolution-of-rss-and-lwd-technology-in-horizontal-wells>
33. Hazbeh O, Aghdam SK, Ghorbani H, et al. Comparison of accuracy and computational performance between the machine learning algorithms for rate of penetration in directional drilling well. *Petroleum Research*. 2021;6(3):271-282
34. Hohl, A. et al. (2017) ‘Characterization and mitigation of mud motor vibrations’, SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings, 2017-March(March), pp. 1594–1611. doi: 10.2118/184711-ms.
35. Hossein Yavari, Jafar Qajar, Bernt Sigve Aadnoy, Rasool Khosravanian Selection of Optimal Well Trajectory Using Multi-Objective Genetic Algorithm and TOPSIS Method. – *Topsis Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2023 <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08149-1>
36. Ismakov, R.A., Zakirov, N.N., Al’-Sukhili, M.Kh., Toropov, E.S. (2015). Issledovanie raboty pary “elastomer – metall” silovoy sektsii vintovogo zaboynogo dvigatelya. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, (2-3), 1-8
37. Li Gang Zhang, G.R. Liu, Wei Li, Shi Bin Li Analysis and optimization of control algorithms for RSSTSP for horizontal well drilling. – *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* (2018) <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0464-1>

38. Ovchinnikov, V.P., Dvoynikov, M.V., Bud'ko, A.V., & Prolubshchikov, S.V. (2007). K voprosu prodleniya sroka sluzhby vintovykh zaboynykh dvigateley. Burenie i Neft', (10), 24-26.

39. Prospects for the Use of Technology of Rotary Steerable Systems for the Directional Drilling / Anton Epikhin, Vitaly Zhironkin, Michal Cehlar // E3S Web of Conferences International Innovative Mining Symposium №174. – (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401022>

40. The Guidance Systems Used in Directional Drilling. <https://utilitiesone.com/the-guidance-systems-used-in-directional-drilling>

41. Sharma D, Kumar NA. Review on machine learning algorithms, tasks and applications. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. 2017;

42. Yang H. Oil and Gas Wells - Recent Advances in Drilling and Completion Technologies. Application of Artificial Intelligence in Drilling and Completion / Yang H., Guanyi Shang, Xiaorong Li, Yongcun Feng// – [DOI:10.5772/intechopen.112298](https://doi.org/10.5772/intechopen.112298)

43. Warren, T., 2019. Technology gains momentum: Rotary-steerable technology Part 1. [Online] Available at: <http://images.pennwellnet.com/ogj/images/ogj2/9651jwa02.gif>