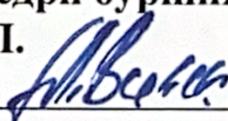


Міністерство освіти і науки України
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

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.
« 20 » 01  2026 року

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему Скероване буріння: світові технології та перспективи застосування
для виснажених і малодобітних родовищ України

Пояснювальна записка

Керівник

к.т.н., ст. викладач кафедри буріння
та геології Рибалко М.О.

посада, наук. ступінь, ПІБ



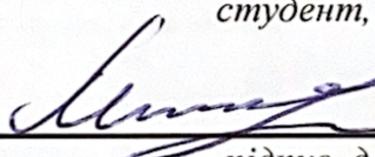
підпис, дата

Виконавець роботи

Марченко Дмитро Сергійович

студент групи 601НБ

студент, ПІБ



підпис, дата

Консультант за 1 розділом

к.т.н., ст. викладач кафедри
буріння та геології Рибалко М.О. 

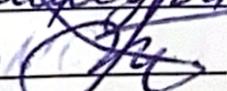
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 2 розділом

к.т.н., доц., доцент кафедри
буріння і геології Марченко М.О. 

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 3 розділом

к.т.н., ст. викладач кафедри
буріння та геології Рибалко М.О. 

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Дата захисту 28.01.2026 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 технологій
Освітня програма: Буріння нафтових і газових свердловин

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри буріння та геології

Винников Ю.Л. *Ю. Винников*

« 3 » 09 2025 року

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

Марченко Дмитро Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Скероване буріння: світові технології та перспективи застосування для виснажених і малодебітних родовищ України

2. Керівник роботи ст. викл. кафедри буріння та геології, к. т. н. Рибалко М. О.

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

затверджені наказом вищого навч. закладу від « 3 » 09 2025 року № 015-02

3. Строк подання студентом роботи 21.01.2026р.

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

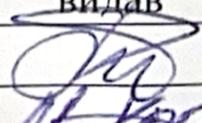
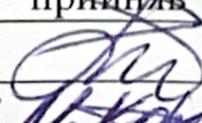
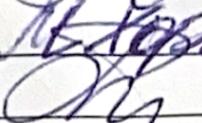
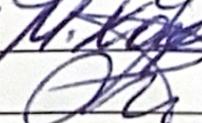
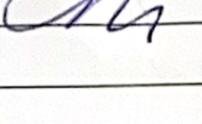
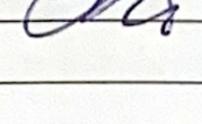
Список використаних джерел

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 прийняв
1.	Рибанко М.О. к.т.н., ст. викл		
2.	Марченко М.О. доц., к.т.н., доц.		
3.	Рибанко М.О. к.т.н., ст. викл		

8. Дата видачі завдання 3.09.2025

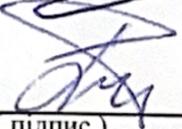
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ 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) МАРЧЕНКО Д.
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи


 (підпис) Рибанко М.О.
 (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	6
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	11
1.1. Загальна характеристика нафтових і газових родовищ України	11
1.2. Основні проблеми видобутку на виснажених і малодобітних родовищах	12
1.3. Особливості геолого-технологічних умов експлуатації	14
1.4. Потенціал буріння бокових стовбурів та багатостовбурових свердловин для підвищення ефективності розробки	15
1.5. Висновки до розділу 1. Мета та задачі досліджень	18
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СВІТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ СКЕРОВАНОГО БУРІННЯ.....	20
2.1. Огляд світових технологій для скерованого буріння	20
2.2. Аналіз гвинтових вибійних двигунів та їх застосування у скерованому бурінні.....	21
2.2.1. Аналіз моделей та технічних рішень провідних виробників ГВД.....	26
2.3. Аналіз роторно-керованих системи (RSS): архітектура, принципи дії та огляд ринкових рішень	32
2.3.1. Аналіз моделей та технічних рішень провідних виробників RSS	34
2.5. Висновки до розділу 2	44

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЙ СКЕРОВАНОГО
БУРІННЯ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУТКУ НА ВИСНАЖЕНИХ
РОДОВИЩАХ УКРАЇНИ 46

3.1. Критерії вибору технології скерованого буріння при реалізації проєктів
капітального ремонту свердловин з бурінням бічних стовбурів 46

3.2. Порівняння ефективності використання ГВД та RSS при реалізації
проєктів капітального ремонту свердловин з бурінням бічних стовбурів..... 47

3.3. Впровадження результатів дослідження при розробці технологічних
рішень щодо капітального ремонту обводненої свердловини Ігнатівського
родовища шляхом забурювання бічного стовбура 53

3.3.1. Аналіз гірничо-геологічних умов 53

3.3.2. Аналіз проектних даних конструкції свердловини та її профілю..... 54

3.4. Висновки до розділу 3 56

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 57

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 59

ДОДАТОК А. Вихідні гірничо-геологічні умови 64

ДОДАТОК Б. Вихідні конструктивні рішення свердловини 67

АНОТАЦІЯ

Марченко Д.С. Скероване буріння: світові технології та перспективи застосування для виснажених і малодебітних родовищ України. 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.

Роботу присвячено обґрунтуванню доцільності та перспектив застосування технологій скерованого буріння для підвищення ефективності розробки виснажених і малодебітних родовищ України.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розробки виснажених і малодебітних родовищ, розглянуто основні проблеми їх експлуатації та обґрунтовано необхідність впровадження прогресивних технологій буріння.

У другому розділі розглянуто сучасні технології скерованого буріння, наведено класифікацію та принципи їх застосування, а також виконано огляд і порівняльний аналіз основних технічних рішень, що використовуються для керування траєкторією свердловин.

Третій розділ присвячений практичному застосуванню результатів дослідження. Розроблено комплекс критеріїв для вибору технології скерованого буріння (ГВД або RSS) при капітальному ремонті свердловин. На основі порівняльного аналізу ефективності, продуктивності та економіки цих систем обґрунтовано їх оптимальні сфери застосування в умовах українських родовищ. Теоретичні висновки впроваджено в практичну площину шляхом розробки технологічних рішень для конкретного об'єкту – капітального ремонту обводненої свердловини Ігнатівського родовища. На основі аналізу гірничо-геологічних умов, конструкції та профілю свердловини підтверджено доцільність і економічну ефективність вибору технології на основі гвинтового вибійного двигуна (ГВД) для буріння бічного стовбура.

Ключові слова: скероване буріння, горизонтальна свердловина, роторно-керовані системи, компоновка низу бурильних колон, гвинтовий вибійний двигун

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГВД – гвинтовий вибійний двигун

ДДЗ – Дніпровсько-Донецька западина

КНБК – компоновка низу бурильної колони

MWD – телесистеми (Measurement While Drilling)

LWD – системи каротажу в процесі буріння (Logging While Drilling)

RSS – роторні керовані системи (Rotary Steerable System)

PDC – полікристалічні алмазні долота (Polycrystalline Diamond Compact)

TVD – глибина по вертикалі (True vertical depth)

MD – довжина свердловини (Measured Depth)

DLS – інтенсивність викривлення (Dogleg Severity)

HD – горизонтальне зміщення (Horizontal Displacement)

ВСТУП

Актуальність теми. Нафтогазовидобувна галузь України на сучасному етапі характеризується переважанням родовищ, що перебувають на пізній стадії розробки та відзначаються низькими дебітами і високим ступенем виснаження запасів. Тривала експлуатація призвела до зниження пластових тисків, зростання обводненості продукції та погіршення умов припливу вуглеводнів до вибою свердловин, що суттєво обмежує ефективність традиційних підходів до буріння та подальшої розробки.

За таких умов особливої актуальності набуває впровадження скерованого буріння як інструменту залучення до розробки залишкових та важкодоступних запасів. Використання похило-скерованих, горизонтальних і багатостовбурних свердловин дозволяє суттєво збільшити площу дренавання пластів, оптимізувати систему розробки та підвищити коефіцієнт вилучення вуглеводнів без необхідності значного нарощування кількості нових свердловин.

Окреме практичне значення має застосування технологій скерованого буріння під час капітального ремонту свердловин шляхом забурення бічних стовбурів. Такий підхід дає можливість відновлювати або підвищувати продуктивність існуючого свердловинного фонду, обходити техногенно ускладнені інтервали та повторно вводити в експлуатацію свердловини, що втратили рентабельність.

Світовий досвід свідчить, що сучасні технічні засоби керування траєкторією дозволяють реалізовувати складні профілі свердловин з високою точністю та надійністю, що істотно підвищує технологічну й економічну ефективність бурових робіт. Проте в умовах України потенціал цих рішень використовується обмежено та потребує системного аналізу, адаптації й наукового обґрунтування.

Таким чином, дослідження світових технологій скерованого буріння та обґрунтування перспектив їх застосування для виснажених і малодобітних родовищ України є своєчасним, актуальним і практично значущим завданням,

спрямованим на підвищення ефективності використання наявної ресурсної бази та стабілізацію рівня вуглеводневидобутку.

Метою роботи є обґрунтування доцільності та перспектив застосування технологій скерованого буріння для підвищення ефективності розробки виснажених і малодебітних родовищ України.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати сучасний стан розробки виснажених і малодебітних родовищ України;
- систематизувати сучасні світові технічні рішення та підходи до реалізації скерованого буріння;
- обґрунтування оптимальної технології скерованого буріння (ГВД/RSS) на основі порівняльного аналізу та апробації критеріїв вибору для умов конкретного промислового об'єкту України.

Об'єкт дослідження – процес розробки виснажених і малодебітних нафтогазових родовищ України.

Предмет дослідження– технології скерованого буріння (зокрема, на основі вибійних двигунів і роторно-керованих систем) як інструмент підвищення ефективності розробки виснажених і малодебітних нафтогазових родовищ України (шляхом забурення бічних стовбурів).

Методи дослідження: аналіз наукової літератури, порівняльний аналіз технологій.

Наукова новизна роботи полягає в систематизації та узагальненні сучасних світових підходів до застосування технологій скерованого буріння для умов виснажених і малодебітних родовищ України, а також у обґрунтуванні доцільності використання цих технологій для підвищення ефективності розробки та відновлення продуктивності свердловин шляхом забурення бічних стовбурів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані при виборі та обґрунтуванні застосування технологій скерованого буріння на виснажених і малодебітних родовищах, у тому числі при забуренні бічних стовбурів.

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Вона викладена на 63 сторінках, у тому числі 18 рисунків, 3 таблиці, 5 сторінок списку використаних джерел (43 найменувань).

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розробки виснажених і малодобітних родовищ, розглянуто основні проблеми їх експлуатації та обґрунтовано необхідність впровадження прогресивних технологій буріння.

У другому розділі розглянуто сучасні технології скерованого буріння, наведено класифікацію та принципи їх застосування, а також виконано огляд і порівняльний аналіз основних технічних рішень, що використовуються для керування траєкторією свердловин.

Третій розділ присвячений практичному застосуванню результатів дослідження. Розроблено комплекс критеріїв для вибору технології скерованого буріння (ГВД або RSS) при капітальному ремонті свердловин. На основі порівняльного аналізу ефективності, продуктивності та економіки цих систем обґрунтовано їх оптимальні сфери застосування в умовах українських родовищ. Теоретичні висновки впроваджено в практичну площину шляхом розробки технологічних рішень для конкретного об'єкту – капітального ремонту обводненої свердловини Ігнатівського родовища. На основі аналізу гірничо-геологічних умов, конструкції та профілю свердловини підтверджено доцільність і економічну ефективність вибору технології на основі гвинтового вибійного двигуна (ГВД) для буріння бічного стовбура.

Загальні висновки відображають головні результати, що отримано в роботі.

Кваліфікаційна робота виконана у Навчально-науковому інституті нафти і газу Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» в 2026 році під керівництвом к.т.н., старшого викладача кафедри буріння та геології Рибалко М.О.

Автор висловлює щире подяку науковому керівнику Рибалко М.О. за допомогу при виконанні кваліфікаційної роботи.

скерованого та горизонтального буріння, що дозволяє залучати до розробки важкодоступні та залишкові запаси вуглеводнів.

1.3. Особливості геолого-технологічних умов експлуатації

Родовища нафти і газу, що перебувають на пізній стадії розробки, характеризуються складними та неоднорідними геолого-технологічними умовами, які істотно ускладнюють процес їх подальшої експлуатації. Ці умови формуються під впливом як природних геологічних чинників, так і тривалої техногенної дії, пов'язаної з багаторічною експлуатацією покладів.

З геологічної точки зору більшість виснажених і малодобітних родовищ України характеризується складною тектонічною будовою, значною розчленованістю продуктивних пластів, наявністю літологічних заміщень та екрануючих порушень. Колектори часто мають низькі та середні фільтраційно-ємнісні властивості, значну анізотропію проникності та високу ступінь неоднорідності як за площею, так і за товщиною. У результаті цього процес дренавання покладів є нерівномірним, а значна частина запасів залишається неохопленою розробкою.

Важливою особливістю є зміна початкових пластових умов у процесі тривалої експлуатації. Зниження пластового тиску, зміна фазового стану флюїдів, формування зон підвищеної обводненості та газонасиченості призводять до ускладнення умов припливу вуглеводнів до вибою свердловин і зниження їх продуктивності. У ряді випадків відбувається перерозподіл фільтраційних потоків, що сприяє передчасному прориву води або газу до вибою.

З технологічної точки зору експлуатація таких родовищ ускладнюється погіршенням технічного стану свердловинного фонду. Тривала робота свердловин призводить до зносу обсадних колон, порушення герметичності міжколонного простору, деформацій та прихоплень у стовбурі свердловини. Додатковими ускладненнями є наявність викривлених стовбурів, звужень, каверн

та інших дефектів, що обмежують можливості проведення ремонтно-ізоляційних та інтенсифікаційних робіт.

Суттєвий вплив на геолого-технологічні умови має стан привибійної зони пласта. У процесі експлуатації відбувається її забруднення продуктами корозії, механічними домішками, а також випадінням солей, парафінів, асфальтенів і смол. Це призводить до зниження проникності та додаткового гідродинамічного опору, що ще більше ускладнює приплив флюїдів до свердловини.

Окрему групу проблем становлять термобаричні та гідрохімічні умови експлуатації. Для багатьох родовищ характерні підвищені температури, агресивні пластові води з високим вмістом солей і корозійно активних компонентів, що негативно впливає на довговічність обладнання та потребує застосування спеціальних матеріалів і технологічних рішень.

У сукупності зазначені геолого-технологічні особливості зумовлюють обмежену ефективність традиційних методів буріння та експлуатації вертикальних свердловин. За таких умов підвищується значення застосування сучасних технологій, зокрема скерованого та горизонтального буріння, багатостовбурних свердловин і високоточних систем керування траєкторією, які дозволяють більш повно залучати до розробки залишкові та важкодоступні запаси вуглеводнів.

1.4. Потенціал буріння бокових стовбурів та багатостовбурових свердловин для підвищення ефективності розробки

Аналіз сучасного стану розробки виснажених і малодобітних родовищ України свідчить, що застосування традиційних технологій буріння та експлуатації вертикальних свердловин у багатьох випадках є малоефективним або економічно недоцільним. Складні геологічні умови, значна неоднорідність колекторів, низькі фільтраційно-ємнісні властивості пластів, а також високий

ступінь виснаження запасів зумовлюють необхідність пошуку та впровадження нових, більш досконаліх технологічних рішень.

Як показує практика, вертикальні свердловини забезпечують лише обмежений контакт із продуктивним пластом і не дозволяють ефективно залучати до розробки залишкові та важковидобувні запаси вуглеводнів. У результаті значна частина корисного об'єму колектора залишається недренованою, а коефіцієнт вилучення нафти і газу залишається на низькому рівні. Особливо гостро ця проблема проявляється на родовищах зі складною тектонічною будовою, лінзоподібними або тріщинуватими колекторами та значною вертикальною і латеральною неоднорідністю.

За таких умов впровадження прогресивних технологій буріння є одним із ключових напрямів підвищення ефективності освоєння родовищ. До таких технологій належать похило-скероване, буріння бічних стовбурів та багатостовбурне буріння, які дозволяють суттєво збільшити довжину контакту свердловини з продуктивним пластом, підвищити площу дронування та забезпечити більш рівномірне охоплення запасів розробкою.

Особливе значення має скероване буріння, яке створює можливість цілеспрямованого виходу в задані ділянки пласта, обходу зон з ускладненими геологічними умовами, розкриття тонких, виклинюваних або екранованих пластів, а також повторного залучення до розробки залишкових запасів у межах уже розбурених площ. Це особливо актуально для родовищ, де буріння нових вертикальних свердловин є технічно складним або економічно необґрунтованим.

Крім того, застосування сучасних технологій скерованого буріння дозволяє оптимізувати розміщення свердловинного фонду, зменшити кількість гирл, скоротити площі відведення земель та знизити загальні капітальні й експлуатаційні витрати. Це має важливе значення як з економічної, так і з екологічної точок зору.

Розвиток технічних засобів керування траєкторією свердловин, зокрема вибійних двигунів та роторно-керованих систем (RSS) – забезпечує високу точність проведення стовбура, стабільність профілю та можливість оперативного

коригування траєкторії без значних втрат часу на спуско-підймальні операції. Це істотно підвищує технологічну та економічну ефективність процесу буріння.

Таким чином, у сучасних умовах впровадження скерованого буріння слід розглядати не як альтернативу, а як необхідний елемент стратегії подальшої розробки виснажених і малодебітних родовищ України. Саме ці технології створюють реальні передумови для підвищення коефіцієнта вилучення вуглеводнів, стабілізації рівня видобутку та більш повного й раціонального використання мінерально-сировинної бази країни.

На старих родовищах ДДЗ та Прикарпаття успішно впроваджено технології і технічні засоби для відновлення ліквідованих, недіючих і мало-дебітних свердловин зарізанням і бурінням додаткових бокових похило-спрямованих та горизонтальних стовбурів. Відновлено понад 20 ліквідованих свердловин, які дали високі для своїх горизонтів, практично початкові дебіти нафти і газу. При цьому відновлення старих свердловин має значно коротші терміни порівняно з будівництвом нових і, відповідно, потребує менших капіталовкладень. Розробка та освоєння нової техніки і технології дозволили знизити вартість будівництва додаткового стовбура до 50-60 % від вартості буріння нової свердловини.



Враховуючи те, що на завершальному етапі промислової розробки будь-якого родовища відбувається, головним чином, згущення сітки свердловин, відновлення бездіючого фонду при цьому буде значно ефективнішим з економічної точки зору, ніж буріння нових свердловин. В умовах обмежених інвестицій ця технологія виявляється ефективним засобом інтенсифікації видобутку вуглеводнів на Україні.

Останнім часом у зв'язку з активним використанням геолого-гідродинамічного моделювання розроблення родовищ нафти і газу, появою новітніх видів навігаційного обладнання, надійного і зносостійкого бурового інструменту, нових технологій і технологічного оснащення буріння бічних стовбурів набуває дедалі більшого значення. З'явилася можливість до розробки залишкових запасів нафти із застійних і тупикових зон і напівлінз на родовищах, що перебувають на пізній стадії розроблення, залучення в активне розроблення запасів нафти прикривних водонафтових зон і переходу на нижчерозміщені продуктивні пласти з використанням пробуреного фонду свердловин, що перебувають у простої через аварії або через нерентабельну експлуатацію.

Застосування методу горизонтального буріння під час будівництва бічного стовбура дає змогу перевести вертикальні свердловини або звичайні похилі в розряд горизонтальних або багатостовбурних зі значним збільшенням зони дронування. Крім економічного ефекту, буріння БС зменшує техногенний вплив бурових робіт на навколишнє середовище.

1.5. Висновки до розділу 1. Мета та задачі досліджень

Проведений аналіз сучасного стану розробки нафтових і газових родовищ України дозволяє сформулювати наступні ключові висновки, які прямо обґрунтовують мету та напрямки подальшого дослідження:

1. Ресурсна база України перебуває на пізній стадії розробки. Переважна більшість родовищ, особливо в ключовому Дніпровсько-Донецькому басейні, характеризуються високим ступенем виснаженості (понад 70-80%), критичним

зниженням пластового тиску та масовим обводненням видобувних свердловин. Фонд свердловин значною мірою складається з малодобітних об'єктів, експлуатація яких супроводжується високою собівартістю та низькою рентабельністю.

2. Традиційні методи розробки вичерпали свій потенціал. Вертикальні свердловини неефективні для дренавання складних, розрізнених колекторів, що призводить до низького коефіцієнта вилучення запасів. Геолого-технологічні умови (складна будова, кольматація, зношеність фонду) унеможливають стабілізацію видобутку звичайними методами.

3. Існує значний потенціал залишкових запасів, сконцентрованих у ізольованих, недрібованих прошарках або важкодоступних зонах в межах існуючих родовищ. Їхнє залучення вимагає принципово нового підходу до розробки.

4. Технології скерованого буріння, зокрема спорудження бокових стовбурів та багатостовбурових свердловин, є стратегічно необхідним напрямом. Вони дозволяють збільшити контакт із пластом, точно цілитися в залишкові запаси та оптимізувати розміщення фонду свердловин, мінімізуючи капітальні витрати на нове будівництво. Це робить їх найбільш перспективним інструментом для капітального ремонту та інтенсифікації видобутку на виснажених родовищах.

Метою роботи є обґрунтування доцільності та перспектив застосування технологій скерованого буріння для підвищення ефективності розробки виснажених і малодобітних родовищ України.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі **задачі**:

– систематизувати сучасні світові технічні рішення та підходи до реалізації скерованого буріння;

– обґрунтувати ключову роль технологій скерованого буріння (на основі вибійних двигунів та RSS) для реалізації проектів забурення бічних стовбурів як найбільш ефективного методу капітального ремонту та інтенсифікації видобутку на виснажених родовищах.^{34у}

РОЗДІ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СВІТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ СКЕРОВАНОГО БУРІННЯ

2.1. Огляд світових технологій для скерованого буріння

Скероване буріння активно застосовується у світовій практиці вже кілька десятиліть, постійно удосконалюючись [1, 3, 5, 11, 25]. Його розвиток дозволяє не лише підвищувати ефективність видобутку на складних і виснажених родовищах, але й оптимізувати експлуатацію існуючого свердловинного фонду. Основними технологічними напрямками скерованого буріння є [5, 36]:

1. Навігаційно-вимірювальні системи (геонавігація):

- каротажні системи при бурінні (Logging While Drilling, LWD);
- телеметричні та системи вимірювання в реальному часі (Measurement While Drilling, MWD).

2. Виконавчі механізми керування траєкторією:

- вибійні двигуни (Positive Displacement Motor, PDM);
- роторно-керовані системи (Rotary Steerable System, RSS).

3. Спеціалізоване обладнання для реалізації складних профілів:

- комплекси для спорудження багато вибійних/багатостовбурових свердловин (Multilateral Wells) з використанням спеціалізованого кріплення, механізмів розгалуження та систем герметизації (класифікація TAML);
- обладнання для забурювання бічних стовбурів (Sidetracking), таке як відхилювач (whipstock), фрезер-долото (whipstock mill) та розширювач (reamer mill);

4. Допоміжні технології та інтегровані рішення:

- інтегровані датчики в бурильній колоні (Near-Bit Sensors, Along-String Measurement);
- програмне забезпечення для проектування траєкторій та моделювання процесу буріння (Well Planning & Drilling Simulation Software);
- сучасні бурові установки з верхнім приводом (Top Drive);
- вдосконалені рецептури бурових розчинів.

Застосування цих технологій у комплексі дозволяє реалізовувати складні траєкторії свердловин, підвищувати довжину контакту з продуктивним пластом та ефективно залучати до розробки залишкові та важкодоступні запаси. Світовий досвід показує, що подібні технологічні рішення особливо ефективні на виснажених і малодебітних родовищах, де традиційні методи буріння часто не забезпечують економічно доцільного видобутку.

На українському ринку послуг скерованого буріння переважає традиційний підхід. Аналіз проєктів капітального ремонту зі спорудженням бічних стовбурів показує, що більшість сервісних компаній (наприклад, ТОВ «Укрнафтогазсервіс», ТОВ «Навіком Енерджі», ТОВ «Везерфорд Україна», ТОВ «Денімакс Юкрейн», «Ньютекс Юкрейн», ТОВ «Сервіс ОЙЛ», ТОВ «НТП «Бурова техніка») використовують комбінований спосіб буріння (роторне + ГВД) із застосуванням систем MWD/LWD. Це свідчить про те, що гвинтові вибійні двигуни (ГВД/PDM) залишаються основним робочим інструментом для реалізації проєктів капітального ремонту в Україні, що обумовлено їхньою технологічною освоєністю та економічною доцільністю для багатьох операцій.

Однак для підвищення ефективності розробки виснажених родовищ постає ключове питання: чи вичерпали традиційні ГВД свій потенціал, і коли доцільно розглядати впровадження більш точних та продуктивних роторно-керованих систем (RSS)? Відповідь на це питання вимагає детального порівняльного аналізу обох технологій з огляду на їхні технічні можливості, економіку та придатність для специфічних умов українських родовищ (обводненість, низькі дебіти). Саме цьому аналізу присвячені наступні підрозділи.

2.2. Аналіз гвинтових вибійних двигунів та їх застосування у скерованому бурінні

Незважаючи на появу сучасних роторно-керованих систем, гвинтові вибійні двигуни залишаються найбільш поширеним, надійним та економічно обґрунтованим рішенням для скерованого буріння, особливо при реалізації бічних стовбурів. Для ефективного їх застосування необхідно чітко розуміти, як принцип

роботи та конструктивні особливості різних моделей впливають на можливості виконання конкретних завдань у складних геолого-технічних умовах виснажених родовищ.

Гвинтові вибійні двигуни (ГВД), або Positive Displacement Motors (PDM) є гідравлічною машиною об'ємного типу, яка перетворює енергію потоку бурового розчину на механічну роботу – обертання ротора з долотом. Типова конструкція ГВД (рис. 2.1) включає такі основні вузли:

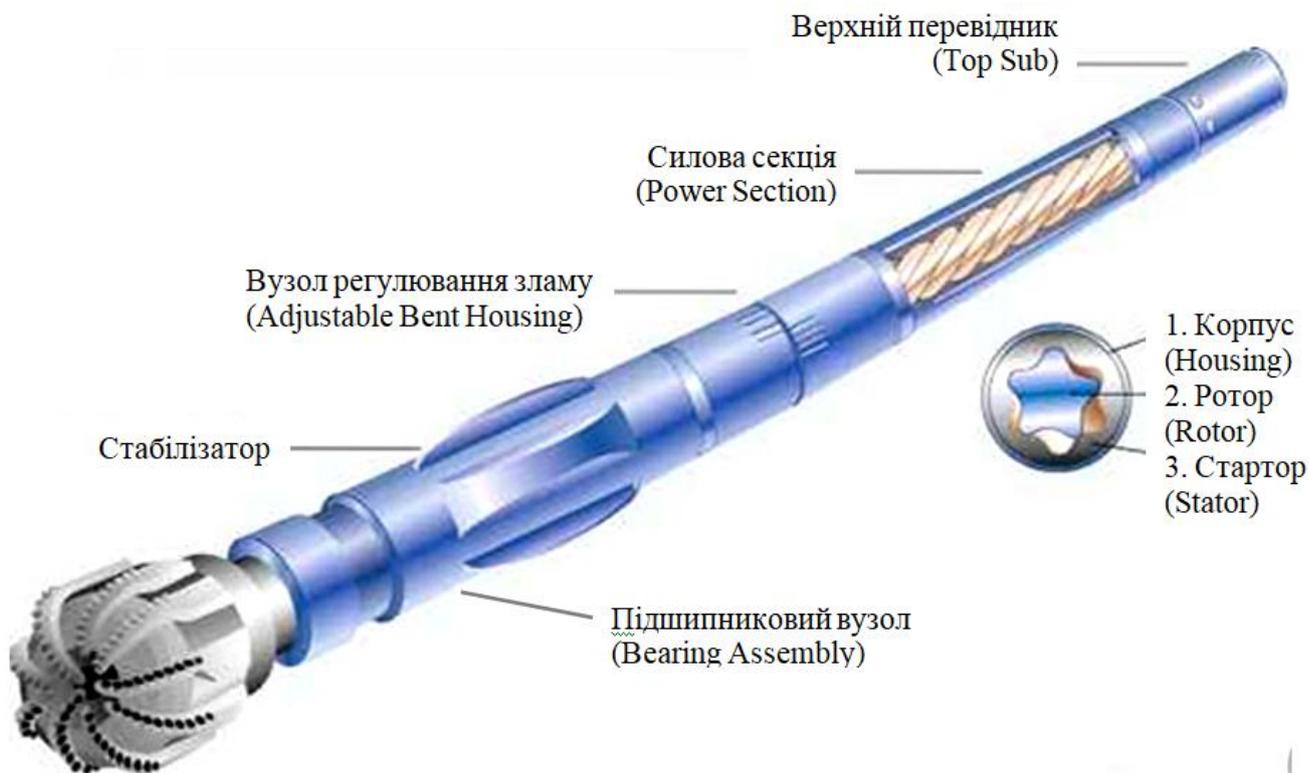


Рис. 2.1. Конструкція гвинтового вибійного двигуна

– верхній перевідник (Top Sub), який служить для з'єднання вибійного двигуна з бурильною колоною. Забезпечує передачу осьового навантаження та крутного моменту, а також подачу бурового розчину в двигун;

– силова секція (Power Section), яка складається з статора і ротора гвинтової пари. При проходженні бурового розчину через цю секцію виникає обертальний рух ротора, який перетворює гідравлічну енергію потоку в механічну;

– привідний вал (Drive Shaft Assembly) служить для передачі

обертального руху від ротора до нижніх вузлів двигуна. Компенсує ексцентриситет обертання ротора та забезпечує стабільну передачу крутного моменту;

– вузол регулювання зламу (Adjustable Bent Housing), забезпечує створення керованого відхилення осі двигуна, що дозволяє здійснювати скероване буріння та коригувати траєкторію свердловини. Кут зламу може змінюватися (зазвичай $0,75^\circ - 2,0^\circ$) залежно від необхідного темпу набору або скидання зенітного кута.

- підшипниковий вузол (Bearing Assembly), який призначений для сприйняття осьових і радіальних навантажень, захисту силової секції від перевантажень;

Управління траєкторією за допомогою ГВД здійснюється за рахунок почергового застосування двох режимів (рис. 2.2):

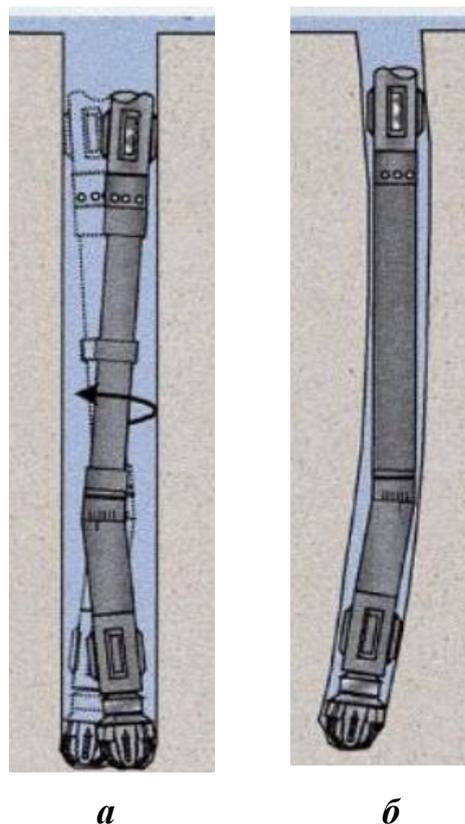


Рис. 2.2. Режими буріння ГВД

a – режим обертання (Rotating Mode); ***б*** – режим «слайд» (Sliding Mode)

– обертальний режим (Rotating Mode). Бурильна колона обертається від ротора установки або верхнього приводу (Top Drive). Двигун та його згин

обертаються разом із колоною, для передачі зусилля на долото. Обертальний режим використовується для буріння вертикальних або тангенціальних ділянок, де не очікується зміна кута нахилу.

– режим «слайд» (Sliding Mode). Обертання бурильної колони зупиняється. Подача (осьове навантаження) та обертання долота забезпечуються виключно роботою вибійного двигуна. Фіксована в просторі орієнтація зігнутого корпусу (Bent Housing) призводить до того, що вісь двигуна (а отже, і долота) постійно відхилена від осі свердловини. Це забезпечує набір зенітного кута. Для зміни напрямку цього відхилення (коригування азимуту) необхідно повернути всю колону разом із двигуном у потрібне положення (за показами MWD системи).

Таким чином, циклічне чергування цих режимів дозволяє формувати заплановану траєкторію свердловини.

Ефективне застосування гвинтових двигунів пов'язане з низкою технічних обмежень, які необхідно враховувати, особливо в умовах виснажених родовищ:

- чутливість до хімічного складу бурових розчинів:
 - вуглеводневі та високомінералізовані розчини викликають набухання та деградацію еластомера статора, що веде до збільшення тертя, перегріву та передчасного зношування робочої пари;
 - агресивні компоненти (солі, кислоти) можуть спричинити корозійне руйнування покриття ротора, що, у свою чергу, прискорює знос статора.

– протиріччя між продуктивністю (швидкістю) та потужністю. Існує обернена залежність: двигуни, розраховані на високу частоту обертання, зазвичай мають нижчий крутний момент, і навпаки. Тому конструктивно, збільшення частоти обертання (для швидкості проходки) веде до зниження крутного моменту (потужності). Це обмежує можливості одночасного досягнення високої швидкості проходки та ефективного буріння твердих порід, особливо на великій глибині.

– підвищені механічні навантаження в режі «слайд». Робота без обертання колони суттєво збільшує ризик заклинювання (прихоплення). Комбінація обертання колони з роботою двигуна для підвищення швидкості створює підвищені торсійні та згинальні навантаження на вал та підшипниковий вузол, підвищуючи ризик механічного відмови.

Ці обмеження означають, що вибір та експлуатація ГВД для скерованого буріння (буріння бічних стовбурів) потребують ретельного підбору моделей, адаптованих до конкретних геологічних умов і хімічного складу розчину, а також обґрунтованого режиму буріння для мінімізації ризиків. Ускладнені умови на виснажених родовищах часто змушують шукати компроміс між продуктивністю, надійністю та вартістю.

Незважаючи на це, широке застосування ГВД в Україні та світі обґрунтоване низкою ключових експлуатаційних переваг:

- оптимальні кінематичні характеристики, що забезпечують ефективне відпрацювання доліт;
- мінімальні осьові габарити, що дозволяють ефективно використовувати ГВД при скерованому бурінні (похило-спрямованих і горизонтальних свердловин, бокових стовбурів);
- простота збірки і ремонту, що знижує витрати на обслуговування та підвищує технологічну доступність.

Однак для завдань підвищеної складності виявляються суттєві недоліки ГВД:

- як відмічалось раніше низький ресурс та надійність пари «ротор-статор». Термін безвідмовної роботи 90 – 235 годин веде до високої аварійності [6].
- погіршення якості стовбура в режимі «слайд», що формує спіралеподібний стовбур із шорсткими стінками;
- у режимі «слайд» ефективність видалення шламу різко падає, провокуючи його осідання і як результат прихоплення.
- високе тертя та нестабільність. Режим «слайд» супроводжується значним зростанням сили тертя колони. Неоднорідність порід призводить до нестабільної роботи двигуна, гальмівних режимів та додаткових навантажень [26].

Обмеження та недоліки використання ГВД суттєво звужують сферу їх ефективного застосування найбільш складних проєктів на виснажених родовищах. Однак вони залишаються оптимальним вибором завдяки технічним характеристикам сучасних моделей.

2.2.1. Аналіз моделей та технічних рішень провідних виробників ГВД

На українському ринку послуг представлено як імпортні, так і вітчизняні ГВД. Компанії, такі як ТОВ «Бурова техніка», ТОВ «Navicom Energy», «Укрнафтагазсервіс» мають в своєму арсеналі ГВД канадської компанії «Wenzel Downhole Tools» (рис. 2.3) [21].



Рис. 2.3. ГВД виробництва Wenzel Downhole Tools [21]

Так наприклад ТОВ «Бурова техніка» [22] для проведення траєкторії стовбура свердловини з високою просторовою інтенсивністю використовують ГВД High Build Motor із укороченою шпindelною секцією HB-21 [21].

Гвинтовий вибійний двигун типу High Build Motor модель HB2 (рис. 2.4, б) відрізняється від стандартних рішень своєю конструкцією та надаваними

операційними перевагами. Має відстань від торця вихідного валу до регулятора кута 800 мм, що є менша порівняно з іншими моделями (стандартні опори M6 Millennium мають відстань 1725 мм – рис. 2.4, а). Це дозволяє підтримувати високі темпи набору зенітного кута (збільшити інтенсивність майже в 2 рази) та зменшити кількість спуско-підймальних операцій для зміни кута перекосу. Застосування цієї моделі дозволяє здійснювати процес буріння при реалізації високого моменту сили і низької частоти обертання на вихідному валу. Контроль над роботою двигуна можна здійснювати за зміною тиску на бурових насосах, оскільки перепад тиску на гвинтовому двигуні пропорційний моменту на його валу.



**Рис. 2.4. ГВД High Build Motor Wenzel Downhole Tools:
а – M6 Millennium; б - модель HB2 21**

Нафтосервісна компанія Denimex проводить скероване буріння свердловин з використанням ГВД виробництва Vico Drilling Tools (США) та Tianhe Oil Group (Китай) [15].

Водночас, для розуміння світових тенденцій та доступних на ринку технологічних рішень необхідно проаналізувати пропозиції ключових глобальних виробників, таких як Halliburton, SLB, Weatherford та Baker Hughes.

Компанія Halliburton для скерованого буріння пропонує моделі двигунів NitroForce та StrataForce [17]. Модель NitroForce розроблено для підвищення ефективності та надійності скерованого буріння в складних умовах, що актуально для розробки виснажених родовищ. Порівняння обох моделей наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця моделей Halliburton

Аспекти	StrataForce™ Motor	NitroForce® High-Torque Motor
Ключова перевага	Підвищений крутний момент і потужність за рахунок оптимізації базової конструкції	Максимальна продуктивність та надійність для виконання найскладніших завдань за один спуск
Основні технічні особливості	Подовжені силові секції з високостійкими еластомерами. Витримує перепад тиску до 1,55 МПа/ступінь (225 psi/ступінь) для генерування більшого крутного моменту. На 50% більший крутний момент на одиницю довжини порівняно зі стандартними двигунами	Збільшені упорні підшипники PDC та титановий карданний вал для вищого навантаження та довговічності Покращена прокачувальна здатність для кращого очищення вибою та підвищення потужності на долоті. Менше з'єднань у конструкції для підвищення надійності
Надійність у складних умовах	Оптимізована для роботи при високій температурі до 160°C (320°F). Покращена хімічна стійкість еластомерів знижує ризик відмов	Конструкція без гуми та ущільнень в нижній частині для роботи в екстремальних умовах. Призначена для проходження довгих складних латералів за один безперервний спуск
Основна сфера застосування	Свердловини, де потрібна підвищена та стабільна потужність для покращення швидкості проходки та довговічності долота в умовах високого тиску та температури	Найскладніші проекти, де пріоритет - максимальна продуктивність, мінімізація спусків та час будівництва свердловини, наприклад, довгі горизонтальні ділянки (латерали)

Компанія Weatherford [20] пропонує дві ключові лінійки ГВД для скерованого буріння: HyperLine (високопродуктивна) та FrontLine (стандартна надійна). Порівняння моделей представлено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння ГВД HyperLine та FrontLine компанія Weatherford

Аспект	HyperLine (Високопродуктивний двигун)	FrontLine (Стандартний двигун)
Ключова перевага	Максимальна потужність: подвоєний крутний момент і потужність порівняно зі стандартними двигунами	Універсальність та надійність у широкому спектрі стандартних умов
Основні технічні особливості	Використання запатентованих еластомерів у потужних секціях WorkWise для створення високого перепаду тиску	Широкий вибір конфігурацій за швидкістю, крутним моментом та потужністю
Надійність у складних умовах	Призначений для найскладніших завдань: може виконувати відкриття бокового стовбура (сидітрекінг) та буріння всієї ділянки до проектної глибини за один спуск. Ефективний у багатоствольних свердловинах	Забезпечує стабільну та надійну роботу в різних умовах, включаючи буріння з агресивними буровими розчинами
Основна сфера застосування	Складнощі: горизонтальні свердловини, багатоствольні свердловини, операції, де критично важливо зменшити кількість спусків та час буріння	Широкий спектр завдань: вертикальні, горизонтальні та нахилні (похило-скеровані) свердловини

Для рутинних операцій капітального ремонту часто достатньо економічного та надійного рішення, як-от FrontLine. Однак для досягнення максимальної ефективності у найскладніших проєктах, таких як буріння довгих горизонтальних ділянок чи багатоствольних свердловин на старих родовищах, необхідне застосування високопродуктивних технологій, подібних до HyperLine.

Для вирішення різноманітних завдань скерованого буріння компанія SLB [18] пропонує дві ключові лінійки ГВД: універсальну PowerPak та високопродуктивну DynaForce. Ці рішення відрізняються за своїми можливостями та сферою найефективнішого застосування (табл. 2.3).

Для типових завдань капітального ремонту часто достатньо надійного рішення, як-от PowerPak. Однак для досягнення максимальної ефективності у найскладніших геологічних умовах (наприклад, при бурінні в твердих породах,

при високій температурі або для ультра-довгих латералів) необхідне застосування високопродуктивних технологій класу DynaForce.

Таблиця 2.3 – Порівняння ГВД PowerPak та DynaForce компанія SLB

Аспект	PowerPak Steerable Motors	DynaForce High-Performance Drilling Motors
Ключова перевага	Модульність, надійність та універсальність для широкого спектру операцій скерованого буріння	Максимальна продуктивність, потужність та стійкість для найскладніших та екстремальних умов
Основні технічні особливості	Модульна конструкція з трьома основними вузлами (силова, передавальна, опорна секції) для гнучкої конфігурації. Широкий вибір спеціалізованих силових секцій (GT, HS, HF тощо). Технологія PowerPak DTX: надає більш ніж подвійний крутний момент порівняно зі стандартними двигунами завдяки рівномірній товщині еластомеру	Тонкостінні силові секції DTX для високого крутного моменту та мінімізації ризику відмов еластомеру. Патентовані високотемпературні еластомери DynaPower (XE, XP, XR), призначені для екстремальних умов. Технологія DynaMic: зменшує внутрішнє тепловиділення в еластомері, подовжуючи ресурс
Надійність у складних умовах	Надійна робота у вертикальних, тангенціальних та горизонтальних інтервалах. Покращена довговічність версії DTX	Спеціально розроблений для абразивних та твердих порід, високих температур (геотермальні свердловини) та профілів з високою кривизною. Еластомери DynaPower усувають більше 50% незапланованих спусків через відмови
Основна сфера застосування	Буріння вертикальних, похилих, горизонтальних ділянок. Відкриття бокових стовбурів (кікофф) та коригування траєкторії. Універсальні проекти, де потрібна адаптивність.	Складнощі з високими вимогами до швидкості проходки (ROP) та точності. Геотермальне буріння та свердловини з високою температурою. Буріння кривої та горизонтальної ділянки за один спуск

Компанія Baker Hughes представляє ГВД DuraMax. За даними компанії [14] дана модель забезпечує підвищену потужність, крутний момент і довговічність для буріння похилих свердловин за один прохід, а також для буріння свердловин з великим відходом від вертикалі. У разі похило-скерованого буріння DuraMax забезпечує швидшу швидкість проходки завдяки високому значенню навантаження на долото. Короткий кут вигину долота оптимізує керування похило-скерованим бурінням і, в поєднанні з високою швидкістю проходки, дозволить завершити буріння свердловини з максимальною ефективністю та результативністю (за меншу кількість днів і з меншими витратами на буріння).

Технічні характеристики ГВД різних типів наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики ГВД

Модель	SSS100	High Build Motor (HB21)	NitroForce	HyperLine	PowerPak	DuraMax
Виробник	Bico Drilling Tools (США)	Wenzel Downhole Tools (Канада)	Halliburton	Weatherford	SLB	Baker Hughes
Номинальний розмір, дюйми (мм)	6-1/2" (Ø 165)	6-1/2" (Ø 165)	5", 7" (Ø 178)	-	6" – 6-3/4"	-
Вага двигуна, кг	1050	970	-	-	950	-
Довжина двигуна, м	9,5	8,56	-	-	-	-
Діаметр свердловини	7 7/8" – 9 7/8" (200 – 251 мм)	7 7/8" – 9 7/8" (200 – 251 мм)	-	-	-	-
Діапазон обертання вихідного валу, об/хв	58 – 174	-	70-180	-	345 – 170	-
Робочий діапазон витрати, л/хв			450-1520	-	380-1320	-
Рекомендований максимальний диференційний тиск, кПа	9050	6850	-	-	6900	-
Витрати бурового розчину, л/с	12,6 – 37,9	-	10 – 40	-	6.3 – 22	-
Робочий крутний момент, Нм	15550	10500	19680	-	16270	-
Максимальна робоча температура, °С	120	120	148	-	-	-
Густина бурового розчину, кг/м ³	1900	2000	1800	-	1800	-
Основна сфера застосування	-	-	складнощі та довгі латерали, де потрібна надійність і здатність працювати без відмов тривалий час	операції "за один спуск" (sidetrack-to-TD), буріння довгих латералів у нестабільних породах	проекти, орієнтовані на мінімізацію спусків і максимізацію ефективності буріння	проекти, орієнтовані на мінімізацію спусків і максимізацію ефективності буріння

Для розробки виснажених родовищ України через капітальний ремонт із забуренням бічних стовбурів найціннішими є моделі, орієнтовані на надійність та операційну ефективність. Мінімізація кількості спусків (як у випадках з HyperLine (Weatherford) чи DuraMax (Baker Hughes) прямо впливає на собівартість і ризики проекту. Моделі класу StrataForce або NitroForce (Halliburton) будуть ключовими для робіт у складних геологічних умовах або при високій обводненості.

Проведений аналіз сучасних ГВД свідчить, що провідні світові виробники зосереджені на підвищенні надійності та операційної ефективності. Однак навіть найдосконаліші ГВД мають технологічні обмеження, пов'язані з режимом «слайд», які впливають на якість стовбура, довжину горизонтальної ділянки та загальну швидкість буріння. Ці обмеження можуть бути критичними для найбільш амбітних проектів на виснажених родовищах, що змушує розглядати роторно-керовані системи (RSS) як наступний рівень технологій скерованого буріння.

2.3. Аналіз роторно-керованих системи (RSS): архітектура, принципи дії та огляд ринкових рішень

Роторно-керована система (RSS) – це складний механізм, який забезпечує відхилення траєкторії свердловини при безперервному обертанні бурильної колони. Її принцип дії ґрунтується на активному керуванні вектором буріння за допомогою внутрішніх виконавчих механізмів, що дозволяє досягати значно вищої точності, швидкості та якості стовбура порівняно з традиційними ГВД.

RSS складається з трьох ключових компонентів, які працюють в єдиній системі: система вимірювання та навігації (MWD/LWD), блок управління (Control Unit), виконавчий механізм (Steering Unit).

Існують дві основні архітектурні концепції (рис. 2.5), що принципово відрізняються способом впливу на долото. В табл. 2.5 наведено порівняння основних типів виконавчих механізмів RSS.

Таблиця 2.5 – Порівняння основних типів виконавчих механізмів RSS

Критерій	Система «Push-the-Bit» (штовхає долото)	Система «Point-the-Bit» (націлює долото)	Гібридна система (Hybrid Point-the-Bit)
Принцип дії	Радіальне виштовхування Розташовані навколо корпусу упори висуваються гідравлічно, створюючи бокову силу, яка "штовхає" весь низ бурильної колони у потрібному напрямку	Нахил осі Внутрішній згинаючий механізм (наприклад, шарнір з ексцентриковими кільцями) змінює кут осі самого долота щодо осі бурильної колони, націлюючи його	Комбінований Використовує механізм нахилу осі долота ("point"), але зовнішній корпус також має можливість радіального виштовхування для більшого контролю
Переваги	Простіша та надійніша механіка. Ефективно в м'яких та середньо-твердих породах. Швидше реагує на команди	Більш плавна і точна траєкторія. Краща стабільність та контроль у твердих породах. Менший діаметр свердловини (менше калювання)	Поєднує переваги обох систем: точність "point" та потужність "push". Підвищена маневреність для складних 3D-профілів
Недоліки	Може створювати різкі вигини (doglegs) та небажаний спіральний профіль стовбура. Менш точний у дуже твердих або абразивних формаціях	Більш складна та дорога механіка, чутлива до пошкоджень. Може бути повільнішою у реакції	Найбільш складна та дорога конструкція. Вищі вимоги до обслуговування

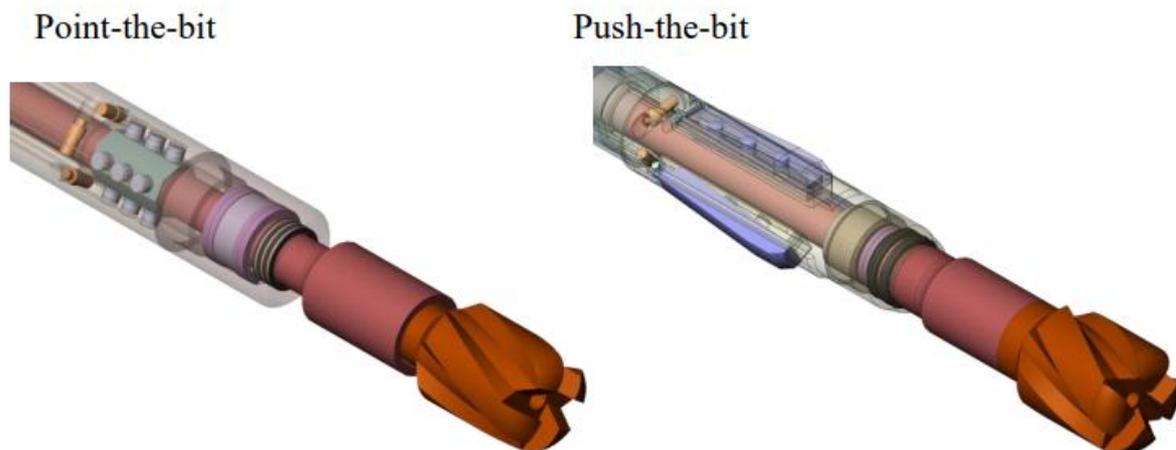


Рис. 2.5. Вид керуючих систем RSS

Вибір архітектури RSS має пряме технологічне та економічне значення для реалізації проекту. Наприклад, для спорудження довгої горизонтальної ділянки в однорідному пласті може бути достатньо надійної системи «push-the-bit». Однак для буріння тонкого цільового пласта (наприклад, потужністю 2-3 метри) або для обходу застарілих вироблених каверн на виснаженому родовищі буде критичною висока точність та плавність траєкторії, які забезпечує система «point-the-bit».

Таким чином, принципова відмінність RSS від ГВД полягає не в самому факті відхилення, а в способі його реалізації: замість фізичного вигину нерухомої секції (як у ГВД), RSS використовує активні механізми для динамічного керування вектором буріння під час обертання, що і є основою її переваг.

2.3.1. Аналіз моделей та технічних рішень провідних виробників RSS

На сьогодні до найпопулярніших в світі роторно-керованих системам відносяться PowerDrive від SLB, GeoPilot та iCruise X RSS від Halliburton, Magnus від компанії Weatherford та від Baker Hughes Inteq система AutoTrak RSS.

Роторно-керована система PowerDrive Orbit G2* компанії SLB [18] забезпечує високу швидкість та потужність обертання, необхідну для розміщення свердловин з більшою точністю, безпекою, мінімізує випадки застрягання труб,

максимально підвищує ефективність буріння та підтримує якість свердловини (рис. 2.6).

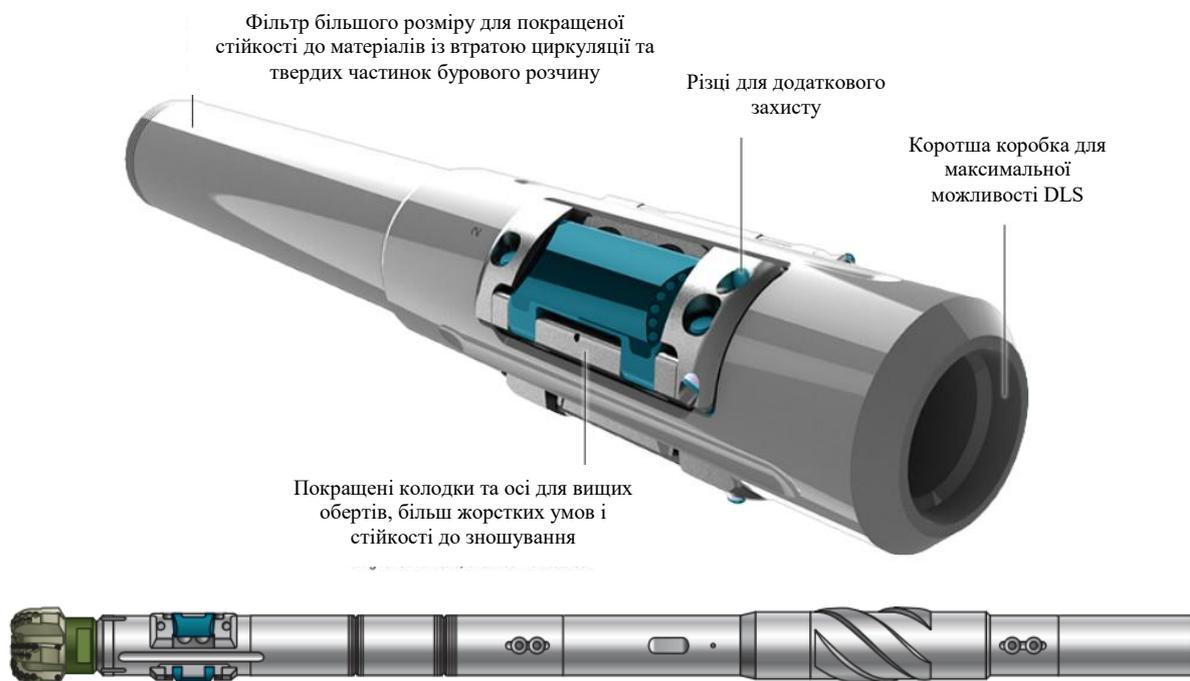


Рис. 2.6. Роторно-керована система PowerDrive Orbit G2

Основні характеристики роторно-керованої система PowerDrive Orbit G2:

- інноваційна конструкція прокладки з ущільненням метал-метал для роботи з корозійними буровими рідинами та важкими свердловинними умовами;
- вища здатність DLS у кривій, але мінімізована DLS у бічній частині для більш гладких стовбурів свердловини;
- шестиосьові безперервні вимірювання НІА для кращого визначення TVD і точного позиціонування свердловини;
- Подвійні параметри низхідної лінії для виконання всіх команд з поверхні для будь-якого типу бурової установки.

Інтелектуальна роторно-керована система iCruise X (RSS) від Halliburton Sperry Drilling – це система нового покоління з підтримкою автоматизації (рис. 2.7). Розроблена спеціально для тривалого використання свердловин у суворих умовах, здатна скорочувати час на спорудження та точно розміщувати

стовбур свердловини. Надійна механічна конструкція та високоміцні матеріали оптимізують роботу в складних геолого-технічних умовах.

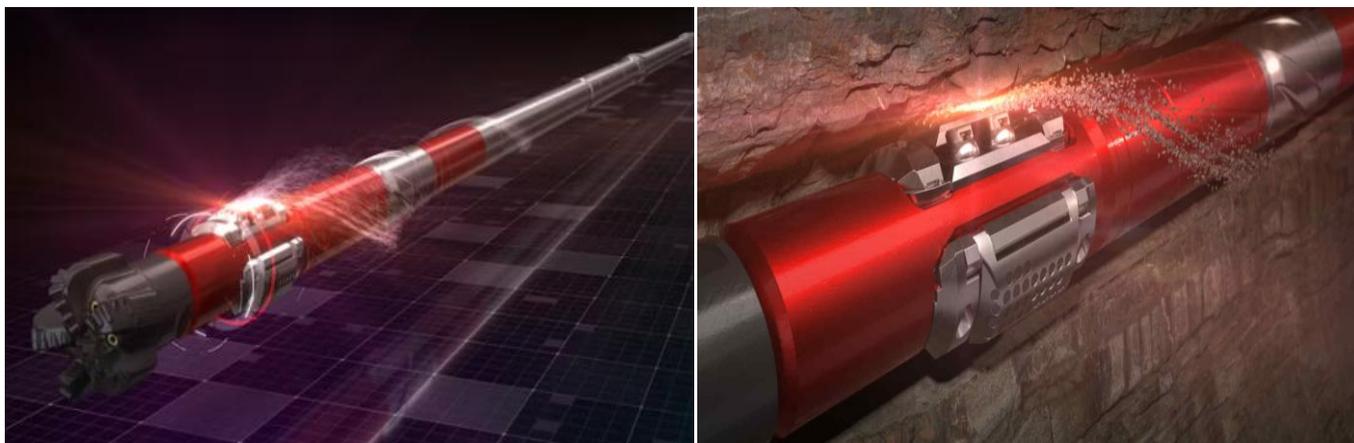


Рис. 2.7. Роторно-керована система iCruise X компанії Halliburton

Інноваційні вдосконалення інтелектуальної RSS-системи iCruise X допомагають операторам досягати передбачуваних і надійних результатів у найскладніших умовах, включаючи високі температури, хімічний склад бурового розчину різної якості, а також коли необхідна висока ступінь тяжкості. Містить нову головку рульового керування з конструкцією коміра, яка може витримувати високочастотні торсійні коливання та міцні з'єднання. Це подовжує термін служби манжети під час свердління секцій з високими вигнутими кутами. Інтелектуальний iCruise X включає передову електроніку, складні алгоритми, численні датчики та пакети досліджень, а також високошвидкісні процесори для підтримки автоматизації буріння. Завдяки автономній буровій платформі LOGIX® iCruise X автономно керує свердловинами та оснащений можливостями уникнення зіткнень у режимі реального часу, щоб зменшити небезпеку в свердловині та забезпечити операторам швидшу, послідовну та повторювану продуктивність буріння [17].

Особливості роторно-керованої системи iCruise X компанії Halliburton згідно даних [17]: шість високошвидкісних процесорів; три вимірювання торця інструменту; 1000 вимірювань в секунду; точний контроль торця інструменту;

інтеграція технології CruiseControl і автономної бурової платформи LOGIX; удосконалені ущільнення метал-метал; високоміцні матеріали; високоміцні з'єднання; більша сила накладки при однаковому свердловинному тиску.

Компанія Halliburton виділяє такі переваги роторно-керованої системи iCruise X: більш тривалий пробіг у важких умовах; точне розміщення свердловини; плавні вертикально-криво-бічні свердловини; скорочений час свердловини

Роторно-керована система Magnus компанії Weatherford – це високоефективна, міцна модульна конструкція для керованого спрямованого буріння, яка допомагає надійно бурити та легко підтримувати траєкторію (рис. 2.8). Magnus (RSS) використовує технологію push-the-bit, що забезпечує високопродуктивне буріння з точним спрямованим управлінням. Magnus RSS сумісна із комплектом датчиків LWD (розташовані на відстані 1,8 м позаду долота) для виконання вимог щодо оцінки пласта або геонавігації. Високочастотна система управління забезпечує швидкість відбору проб для перевірки розташування та оптимізації управління в додатках з високою частотою обертання в несприятливих умов вібраційного буріння [20].



Рис. 2.8. Роторно-керована система Magnus компанії Weatherford

Особливості даної роторно-керована система згідно даних компанії [20]:

- стійкі до несприятливих навколишніх умов завдяки міцним поршневым ущільненням. Для роботи під тиском Magnus RSS містить нееластомерні поршневі ущільнювачі в муфтових накладках. Результатом є покращена механічна цілісність у суворих умовах буріння та більша загальна надійність системи;

- мінімізує проблеми із застряганням труб. Оптікаючий дизайн зменшує проблеми із застряганням. Такі функції, як повністю обертовий блок зміщення, мінімальна стабілізація КНБК і оптимізована зона сміттевого слота, зменшують ризик застрягання труби;

- вибіркова активація колодки забезпечує оптимізацію траєкторії, гладкий, високоякісний стовбур та створює кращий вигин, що знижує витрати майбутніх операцій з будівництва свердловини;

- діагностики в реальному часі. Свердловинна система зв'язку надсилає негайні команди. Отримана миттєва інформація від КНБК дає змогу підтвердити правильну роботу, вжити заходів наперед у разі виникнення проблем і впевнено бурити;

- за допомогою трійки клапанів досягається задана глибини, підтримується висока інтенсивність викривлення та зменшується час проходки;

- використовується інноваційна електронна система автопілот, що забезпечує замкнуте керування для корекції курсу під час буріння.

Таблиця 2.6 – Порівняльний огляд провідних систем RSS

Модель (Виробник)	Тип системи	Ключові переваги та особливості	Технічні характеристики	Основна сфера застосування
PowerDrive Orbit (SLB)	"Push-the-bit"	Металічні ущільнення для роботи в агресивних розчинах. Безперервне 6-осьове вимірювання для точної навігації. Автоматичне утримання напрямку та зенітного кута. Повністю обертається зовнішній корпус.	Температура до 150°C. Швидкість обертання до 350 об/хв. Інтенсивність набору кривизни до 2,44 ⁰ /30 м (8°/100 фт)	Складні операції, довгі та горизонтальні ділянки (ERD), робота в складних гідравлічних системах
Geo-Pilot (Halliburton)	"Point-the-bit"	Не залежить від міцності породи для керування, ефективний у м'яких формаціях. Покращує якість стовбура (низька мікроторсійність) за допомогою довгих калібруючих доліт. Покращує очищення вибою за рахунок безперервного обертання.	Інтенсивність набору кривизни 10-15°/100 фт залежно від діаметра	Жорсткі умови, глибоководдя, складні профілі, м'які формації, де потрібна висока якість стовбура
iCruise® X RSS (Halliburton)	"Point-the-bit"	Висока швидкість обробки 1000 вимірів/с для прецизійного контролю. Покращені матеріали та герметизація для підвищеної довговічності	Висока механічна міцність, розрахована на складні умови.	Довгі свердловини (латерали) у жорстких та абразивних формаціях, де критично важливі автоматизація та надійність
Magnus RSS (Weatherford)	"Push-the-bit"	Міцна модульна конструкція для високопродуктивного буріння. Три незалежні опори для пропорційного керування. Режим автопілота для утримання курсу.	Висока інтенсивність набору кривизни для якісної побудови профілю.	Стандартні та екстремальні умови, вертикальні, криволінійні та горизонтальні ділянки, де потрібна комбінація швидкості та точності.

Модель (Виробник)	Тип системи	Ключові переваги та особливості	Технічні характеристики	Основна сфера застосування
AutoTrak RSS (Baker Hughes)	"Push-the-bit"	Висока інтенсивність набору кривизни (до 15°/100 фт) для раннього потрапляння в цільовий пласт. Покращена інтеграція з каротажем (LWD) для точного геонаведення. Усуває необхідність режиму "слайд", покращує очищення вибою.	Сумісність з повним набором LWD-інструментів Baker Hughes.	Нетрадиційні (сланцеві) та конвенційні свердловини, складні 3D-профілі, де ключові фактори – швидкість проходки та точність потрапляння в цільову зону

2.3.2. Аналіз переваг та недоліки застосування RSS

У контексті пошуку оптимальних технологій для інтенсифікації видобутку на виснажених родовищах України, особливу увагу заслуговує комплексна оцінка роторно-керованих систем (RSS). Проведений порівняльний аналіз принципів роботи RSS та гвинтових вибійних двигунів (ГВД) виявив суттєві відмінності в їх технологічній концепції. Ці відмінності безпосередньо формують широкий спектр експлуатаційних переваг RSS, які наочно систематизовано на рис. 2.9.

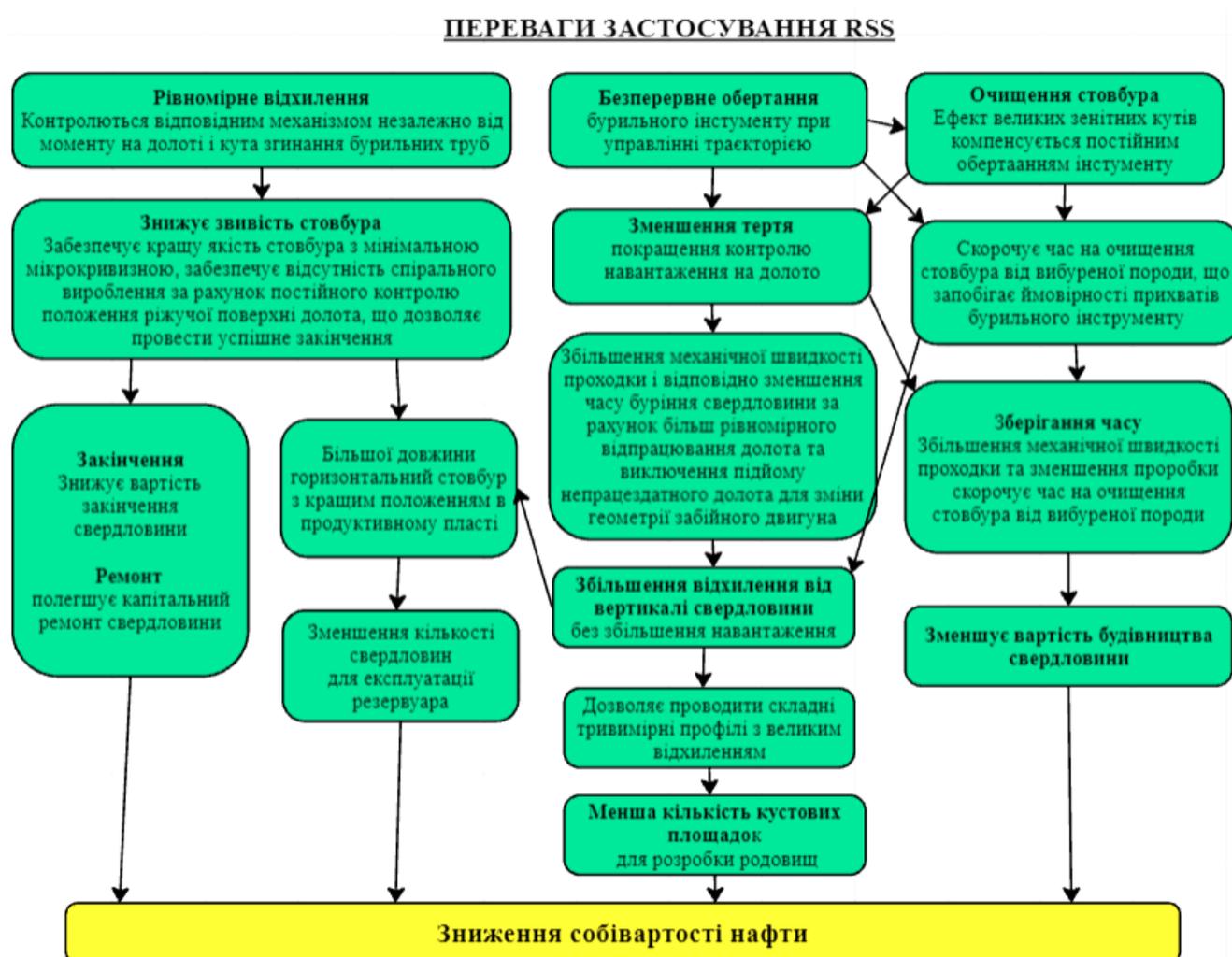


Рис. 2.9. Переваги застосування RSS

Отже при застосуванні RSS створюється додаткова енергія для обертання долота за рахунок гідравлічної енергії бурового розчину. При цьому збільшується швидкість буріння. За рахунок обертання всіх зовнішніх елементів із швидкістю

обертання бурильної колони технологія RSS забезпечує вищу швидкість буріння, скорочуючи загальний час на буріння. Вони добре 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 швидкості 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.

Завдяки можливостям автономного керування, інструменти RSS забезпечують неперевершену точність розміщення стовбура свердловини, зменшуючи ймовірність дорогих помилок. Також при використанні RSS спотрегігається покращена якість стовбура свердловини та зниження звивості. Оберткові керовані системи створюють більш гладкі стовбури свердловин, мінімізуючи потребу в додаткових операціях (очищення, шаблонування, обробка). Забезпечує плавне проходження стовбура свердловини за розміром і контролює торець долота, що забезпечує більш точне керування напрямком і відповідно меншу звивистість. До складу входять підсистеми, що відхиляються, які поєднують у собі переваги використання ГВД. Вони 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 системи мають деякі недоліки (рис.2.10).

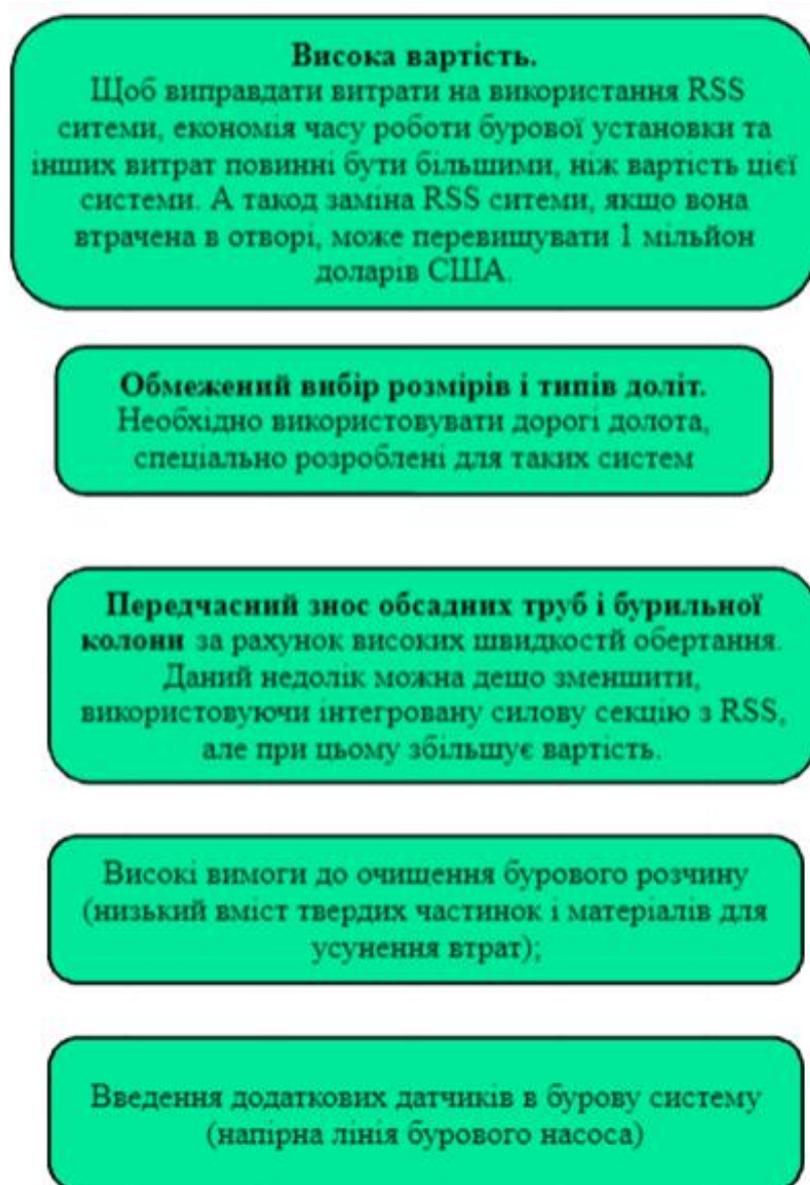


Рис. 2.10. Недоліки застосування RSS

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

Проведений аналіз світових технологій скерованого буріння дозволяє зробити наступні ключові висновки:

1. Сучасне скероване буріння базується на комплексному застосуванні систем MWD/LWD, гвинтових вибійних двигунів (ГВД/PDM) та роторно-керованих систем (RSS), а також програмних засобів планування і супроводу буріння.

2. Встановлено, що ГВД залишаються основним і найбільш поширеним інструментом для реалізації скерованого буріння в Україні, зокрема при забурюванні бічних стовбурів, що зумовлено їх простотою та відносною економічністю. Водночас необхідність роботи в режимі «слайд» обмежує їх ефективність, погіршує якість стовбура та підвищує ризик ускладнень при бурінні довгих горизонтальних інтервалів.

3. Аналіз сучасних моделей ГВД провідних світових виробників (Wenzel, Halliburton, Weatherford, SLB, Baker Hughes, Visco, Tianhe) показав, що основний напрям їх розвитку полягає у підвищенні надійності, ресурсу та можливості виконання складних інтервалів «за один спуск». Проте навіть найсучасніші конструкції не усувають фундаментальних обмежень, пов'язаних із самою технологічною схемою керування траєкторією.

4. Доведено, що роторно-керовані системи (RSS) представляють якісно новий етап розвитку технологій скерованого буріння. Дані системи усувають недоліки режиму «слайд» та забезпечують вищу швидкість проходки, відмінне очищення стовбура, формування гладкого профілю з мінімальною звивистістю, точне геонаведення та зниження ризиків заклинювання. RSS є незамінними для реалізації найскладніших проектів: буріння ультра-довгих горизонтальних ділянок, потрапляння у вузькі цільові пласти, спорудження багатостовбурових свердловин та робота в нестабільних породах.

5. На основі аналізу систем PowerDrive (SLB), iCruise X та GeoPilot (Halliburton), Magnus (Weatherford) та AutoTrak (Baker Hughes) встановлено, що

світова практика орієнтується на широке впровадження RSS у проектах підвищеної складності, де критичними є точність, мінімізація кількості спусків та зниження ризиків аварій.

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЙ СКЕРОВАНОГО БУРІННЯ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУТКУ НА ВИСНАЖЕНИХ РОДОВИЩАХ УКРАЇНИ

3.1. Критерії вибору технології скерованого буріння при реалізації проєктів капітального ремонту свердловин з бурінням бічних стовбурів

На основі результатів аналізу сучасного стану розробки виснажених і малодобітних родовищ України, а також систематизації світового досвіду застосування технологій скерованого буріння, виконаних у попередніх розділах роботи, у даному розділі здійснюється узагальнююче техніко-технологічне обґрунтування вибору інструментів для реалізації проєктів забурювання бічних стовбурів.

Забурювання бічних стовбурів розглядається як один із методів інтенсифікації видобутку за рахунок залучення до розробки залишкових запасів без спорудження нових свердловин. Водночас практична реалізація таких проєктів значною мірою залежить від правильного вибору технології скерованого буріння з урахуванням конкретних геолого-технічних умов.

З огляду на те, що основними технологічними рішеннями для керування траєкторією є застосування гвинтових вибійних двигунів та роторно-керованих систем, у цьому підрозділі сформульовано систему критеріїв вибору між цими технологіями, яка базується на результатах попередніх досліджень і спрямована на забезпечення технічної та економічної ефективності проєктів інтенсифікації видобутку на виснажених родовищах України.

Узагальнюючи результати попередніх розділів, можна виділити основні техніко-технологічні критерії, які повинні враховуватися при виборі технології скерованого буріння для забурювання бічних стовбурів:

- гірничо-геолічні умови буріння;
- геометрія та складність траєкторії свердловини;

- протяжність бічного стовбура;
- конструкція свердловини;
- технічні обмеження бурового обладнання
- технологічні ризики та ймовірність ускладнень;
- вимоги до якості стовбура;
- наявність сервісу та технічної підтримки в регіоні;
- досвід персоналу та технологічна готовність підрядника;
- техніко-економічні показники.

Таким чином, вибір між застосуванням ГВД і RSS при забурюванні бічних стовбурів повинен здійснюватися на основі комплексної оцінки геолого-технічних умов, складності траєкторії та економічної доцільності проекту, а не лише з огляду на початкову вартість технології.

3.2. Порівняння ефективності використання ГВД та RSS при реалізації проектів капітального ремонту свердловин з бурінням бічних стовбурів

Вибір технології скерованого буріння для проведення капітального ремонту є ключовим фактором, що визначає як операційну успішність, так і загальну економічну ефективність проекту. Порівняльний аналіз ГВД та RSS демонструє складну динаміку між капітальними витратами, продуктивністю та ризиками.

Гірничо-геологічні умови ДДЗ є первинним фактором. Якщо розріз представлений відносно м'якими та стабільними породами (наприклад, аргілітами або глинами) з нормальними температурними режимами, це сприяє використанню ГВД. Однак наявність аномальних пластових тисків (АВПТ/АНПТ), тріщинуватих, абразивних або твердих порід (пісковики, вапняки) різко збільшує технічні ризики для ГВД через знос робочої пари та проблеми з очищенням стовбура. У таких випадках RSS з її здатністю до безперервного обертання колони та кращого контролю над процесом стає значно кращим.

Використання ГВД добре апробованою технологією на аналогічних проектах в Україні для простих J- або S-подібних профілів з бічним стовбуром довжиною до 500 м. Натомість за даними аналізу в попередніх розділів RSS демонструє свою повну потужність у складних 3D-траєкторіях або наддовгих стовбурах (ERD), де її переваги можуть бути неповною мірою реалізовані, що робить інвестицію менш виправданою.

Суттєвим критерієм порівняння слугує загальна собівартість проходження похило-скерованого інтервалу бічного стовбура. Незважаючи на те, що середньодобова вартість роботи з використанням RSS (приблизно 1 млн грн) у п'ять разів перевищує аналогічні витрати при використанні ГВД (близько 200 тис. грн), кінцевий фінансовий результат кардинально відрізняється. Це прямий наслідок експоненціальної різниці в продуктивності: швидкість буріння з RSS досягає 21 м/год, тоді як для ГВД цей показник в середньому становить лише 5 м/год. Таким чином, час, необхідний для виконання однакового обсягу робіт, скорочується з 8,43 діб (ГВД) до 2,18 діб (RSS). У підсумку, загальна кошторисна вартість робіт з використанням RSS складає близько 4,56 млн грн, тоді як при використанні ГВД вона зростає до 18,49 млн грн. Економія від застосування сучасної технології в даному випадку наближується до 14 млн грн, що є вагомим аргументом на її користь.

Крім прямої економії, RSS забезпечує непрямі фінансові переваги через поліпшення якості стовбура свердловини (рис. 3.1). Безперервне обертання колони запобігає формуванню місцевих звивин (пальцевих профілів), забезпечує ефективніше очищення вибою та зменшує ризик диференційного прихоплення бурильної колони. Це сприяє успішному спуску експлуатаційної колони та знижує ймовірність дорогих аварійних ситуацій у процесі буріння. Хоча вартість втрати інструменту в свердловині для RSS (близько 1,49 млн дол. США) значно вища, ніж для ГВД (близько 0,22 млн дол. США), статистично нижча ймовірність таких інцидентів для RSS рівноважить цей ризик.

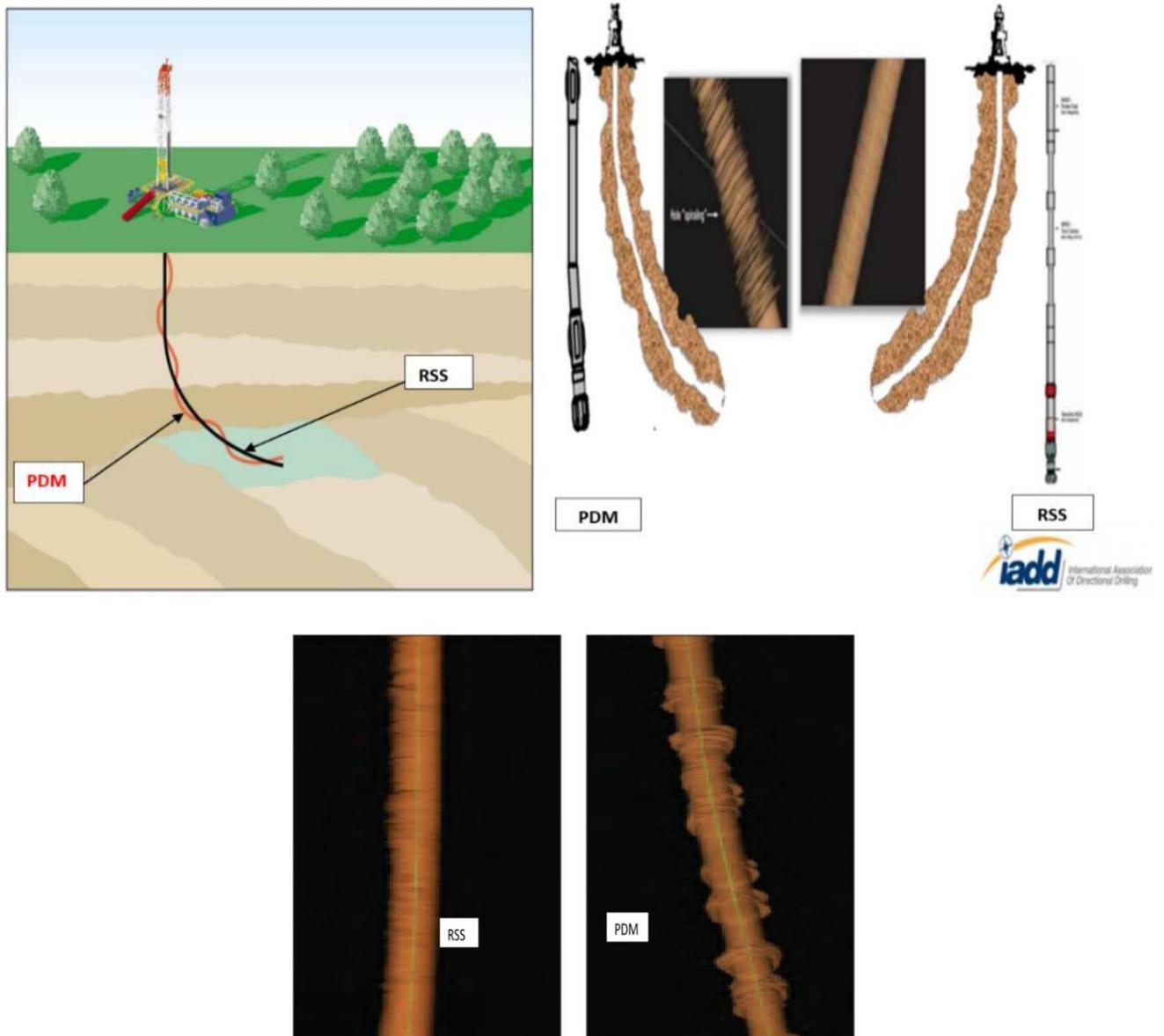


Рис.3.1. Якість стовбура свердловини ГВД проти RSS

При вищих добових витратах на RSS (у 3-5 разів), загальна вартість проекту може бути нижчою на 50% завдяки скороченню часу буріння. Однак для невеликих або низькобюджетних проектів ремонту використання ГВД єдиним життєздатним варіантом.

Для проектів капітального ремонту з бурінням довгих (понад 500 м) або геологічно складних горизонтальних ділянок бічних стовбурів RSS є економічно вигідним рішенням. Її впровадження забезпечує скорочення календарного терміну робіт і суттєве зниження загальної кошторисної вартості проекту.

Наявність сервісу, досвід персоналу та технічна готовність є критичними практичними обмеженнями, особливо в Україні. ГВД має перевагу: це стандартна, широко доступна технологія з численними підрядниками та досвідченими буровиками. Обслуговування та ремонт значно простіші. Для RSS ситуація протилежна: обмежена кількість постачальників, дефіцит кваліфікованих інженерів для її обслуговування та програмування, висока залежність від імпорту обладнання та спеціалістів створює значні логістичні та операційні ризики для проекту.

Тому, при плануванні робіт з використанням RSS необхідно заздалегідь проаналізувати ринок сервісних послуг в Україні, забезпечити наявність кваліфікованого персоналу та розглянути питання страхування ризику втрати дорогого інструменту.

ГВД сумісні з переважною більшістю бурових установок, тоді як для RSS часто потрібні сучасні установки (більш потужні) зі стабільною системою циркуляції, високоякісною телеметрією та передовою системою контролю.

В табл. 3.1 наведено порівняння ГВД та RSS.

Таким чином, остаточний вибір технології має базуватися на комплексному техніко-економічному обґрунтуванні для кожного конкретного об'єкту, що враховує довжину та складність профілю бічного стовбура, гірничо-геологічні умови, бюджетні рамки та операційні можливості підрядних організацій.

Таблиця 3.1 – Порівняння ГВД та RSS

Критерій вибору	Гвинтовий вибійний двигун (ГВД / PDM)	Роторно-керована система (RSS)	Аналіз та практичні рекомендації
Принцип дії та управління	Напрямок буріння задається фіксованим викривлювачем у складі КНБК. Керування траєкторією здійснюється шляхом чергування двох режимів роботи: обертального та слайд-режиму, при якому обертання бурильної колони припиняється, а КНБК орієнтується у заданому напрямку	Забезпечує безперервне обертання бурильної колони з одночасним активним керуванням напрямком буріння. Коригування траєкторії здійснюється автоматично внутрішніми керуючими елементами системи без переходу в слайд-режим	ГВД – технологія переривчастого керування. RSS – технологія безперервного та точного керування в реальному часі
Гірничо-геологічні умови	Ефективний у стабільних, м'яких, середньої твердості породах. Еластомерний статор чутливий до високих температур (>150°C) та абразивних розчинів	Краще підходить для різномірних, тріщинуватих, абразивних та твердих порід. Металева конструкція стійкіша до агресивних умов	Для складних геологічних умов, де потрібна стійкість обладнання, RSS має перевагу
Геометрія траєкторії	Оптимальний для простих 2D-профілів (J- або S-подібних)	Найкращий вибір для складних 3D-траєкторій, плавних кривих великого радіусу. Забезпечує мінімальну звивистість та точність ($\pm 0.1^\circ$)	Для простих цілей достатньо ГВД. Для проходження вузьких геологічних цілей та мінімізації тертя – краще RSS
Протяжність бічного стовбура	Обмеження через зростання тертя. Ризик зашламування. Оптимально до 1000 м	Безперервне обертання колони значно зменшує тертя, що дозволяє бурити довгі горизонтальні ділянки стовбури (>10 км)	Для довгих та наддовгих горизонтальних ділянок RSS є єдиним ефективним рішенням
Технічні параметри та продуктивність	Забезпечує високий крутний момент при відносно невеликих обертах долота. Продуктивність залежить від властивостей бурового розчину та стану еластомера. У слайд-режимі механічна швидкість буріння та якість стовбура знижуються	Забезпечує стабільні високі оберти та високу механічну швидкість буріння. Продуктивність практично не знижується під час керування траєкторією	Для коротких і простих інтервалів достатньо можливостей ГВД. Для довгих або складних профілів RSS забезпечує значно вищу та стабільнішу продуктивність
Якість стовбура та очищення	Якість стовбура гірша через слайд-режим. Очищення вибою та стовбура погіршується на інтервалах керування. Існує ризик диференційного прихоплення. Стовбур має	Формує гладкий, стабільний стовбур. Забезпечує постійно ефективне очищення за рахунок безперервного обертання колони. Спрощує подальші операції	Для проектів з високими вимогами до якості стовбура та спуску обсадних колон доцільно застосовувати RSS

Критерій вибору	Гвинтовий вибійний двигун (ГВД / PDM)	Роторно-керована система (RSS)	Аналіз та практичні рекомендації
	значну нерівність		
Технологічні ризики	Вищий ризик прихопленя та зашламування. Знос еластомера статора може призвести до раптової поломки	Нижчий ризик механічних ускладнень. Головні ризики пов'язані з відмовами дорогої електроніки та складного механізму	У свердловинах із високими ризиками ускладнень доцільно надавати перевагу RSS
Вимоги до обладнання та персоналу	Проста, механічна конструкція. Нижча вартість обладнання та ремонту. Досвід роботи з орієнтуванням інструменту. Сумісна зі стандартними буровими установками та MWD. Значний досвід в Україні	Висока технологічна складність (електронні, механічні та гідравлічні компоненти). Вартість оренди в 3–4 рази вища, ніж у ГВД. Потреба у висококваліфікованих інженерах для обслуговування, програмування та моніторингу. Персонал має розуміти роботу складних систем керування та телеметрії	ГВД – перевірена та надійна технологія для стандартних операцій. RSS потребує технологічної готовності підрядника та наявності кваліфікованої підтримки. Наявність обладнання та досвід бригади часто визначають технологічну доступність
Наявність сервісу	Широка доступність сервісу. Велика кількість підрядників	Обмежений сервіс	Доступність ГВД є ключовою перевагою
Економіка проекту	НИЖЧІ капітальні витрати на обладнання. МОЖЛИВА ВИЩА собівартість метра на складних об'єктах через нижчу швидкість проходки та ризики ускладнень	ВИЩІ капітальні витрати (оренда). Часто НИЖЧА собівартість метра на складних об'єктах завдяки високій швидкості, меншому часу буріння та уникненню ускладнень	ГВД: економія на старті проекту. RSS: інвестиція в ефективність та передбачуваність, що окупається на складних об'єктах.
Обмеження	Деградація еластомера/корозія (розчин). Конфлікт швидкості та крутного моменту. Нерівномірність стовбура свердловини. Ризик прихоплення та поломок в режимі «слайд»	Вартість та складне технічне обслуговування	Обмеження ГВД вимагають ретельного підбору режимів буріння та розчину. В умовах підвищених ризиків та складної траєкторії більш надійним рішенням є застосування RSS

3.4. Висновки до розділу 3

1. Вибір між ГВД/PDM та RSS при забурюванні бічних стовбурів дійсно повинен базуватися на ретельній оцінці низки взаємопов'язаних факторів, що виходять далеко за рамки простої порівняльної вартості оренди обладнання. Стратегічне рішення формується на перетині технічної доцільності, операційних ризиків та загальної економіки проекту.

2. RSS є інвестицією в ефективність, яка окупається на великих та складних об'єктах. Для невеликих або простих проектів капітального ремонту з обмеженим бюджетом ГВД залишається економічно виправданим рішенням.

3. Основним обмежувальним фактором для RSS є їхня екстремально висока вартість оренди та відсутність на ринку доступних українських підрядників. Послуги з надання RSS в Україні практично монополізовані кількома великими міжнародними сервісними компаніями.

4. Практичний досвід України підтверджує, що ГВД є надійним, економічно обґрунтованим і технологічно доступним рішенням для більшості проектів зі спорудження бічних стовбурів на виснажених родовищах. Вони дозволяють ефективно відновлювати видобуток із старих свердловин, максимально використовуючи наявну інфраструктуру. Однак технологічні обмеження, пов'язані з режимом «слайд», визначають межу їх ефективного застосування. Для найскладніших завдань, де критично важливими є довжина горизонтальної ділянки, якість стовбура або точність попадання в ціль, доцільним є розгляд впровадження роторно-керованих систем (RSS) як наступного кроку в підвищенні ефективності скерованого буріння.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі вирішена наукова задача з обґрунтування доцільності та перспектив застосування технологій скерованого буріння для підвищення ефективності розробки виснажених і малодебітних родовищ України. На основі проведеного аналізу зроблено такі головні висновки.

1. Аналіз сучасного стану розробки виснажених і малодебітних родовищ України виявив низку критичних проблем: стрімке падіння пластових тисків і дебітів, високу обводненість продукції, збіднення традиційних пластів-колекторів та технічну зношеність фонду свердловин.

2. Найбільш ефективним рішенням є впровадження технологій скерованого буріння, зокрема буріння бічних стовбурів. Цей напрямок дозволяє інтенсифікувати видобуток на зрілих родовищах шляхом розкриття нових пластів через існуючу свердловинну інфраструктуру, що є ключем до їх подальшої рентабельної експлуатації.

3. Сучасне скероване буріння є високотехнологічним процесом, що базується на комплексному застосуванні телеметричних систем (MWD/LWD), вибійних двигунів (ГВД/PDM) та роторно-керованих систем (RSS), підтриманому програмними засобами для проектування та моніторингу в реальному часі.

4. Проведений порівняльний аналіз ГВД та RSS є ключовим для обґрунтування вибору технології. Протиставлення переривчастого керування ГВД безперервному керуванню RSS дає чіткі критерії для визначення найефективнішої методики. Отже, остаточне рішення має ґрунтуватися на детальному техніко-економічному моделюванні для конкретних умов, а не на узагальнених підходах.

5. RSS є інвестицією в ефективність, яка окупається на великих та складних об'єктах. Для невеликих або простих проєктів капітального ремонту з обмеженим бюджетом ГВД залишається економічно виправданим рішенням.

6. Практичний досвід України підтверджує, що ГВД є надійним, економічно обґрунтованим і технологічно доступним рішенням для більшості

проектів зі спорудження бічних стовбурів на виснажених родовищах. Вони дозволяють ефективно відновлювати видобуток із старих свердловин, максимально використовуючи наявну інфраструктуру. Однак технологічні обмеження, пов'язані з режимом «слайд», визначають межу їх ефективного застосування. Для найскладніших завдань, де критично важливими є довжина горизонтальної ділянки, якість стовбура або точність попадання в ціль, доцільним є розгляд впровадження роторно-керованих систем (RSS) як наступного кроку в підвищенні ефективності скерованого буріння.

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. Расцветаев ; 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. Ігнатов ; 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. Розробка та впровадження комплексу технічних засобів і технологій буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин (для умов нафтогазових родовищ України) / Дисертація. – 2013.
7. 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

8. 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>
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Офіційний сайт компанії «APS-TECH» <https://www.aps-tech.com/systems/suresteer-drilling-systems/suresteer-rss-rotary-steerable-system/>
14. Офіційний сайт компанії «Baker Hughes»: <https://www.bakerhughes.com>
15. Офіційний сайт компанії «DENIMEX» <http://www.denimex.us/>
16. Офіційний сайт компанії «Gyrodata»: <http://www.gyrodata.com>
17. Офіційний сайт компанії «Halliburton»: <http://www.halliburton.com>
18. Офіційний сайт компанії «Schlumberger»: <https://www.slb.com>
19. Офіційний сайт компанії «Tianhe Oil Group» <https://www.tianheoil.com/>
20. Офіційний сайт компанії «Weatherford»: <https://www.weatherford.com>

21. Офіційний сайт компанії «Wenzel Downhole Tools»
<https://wenzeltools.com/>
22. Офіційний сайт компанії ТОВ «Бурова техніка»
23. 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
24. 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.
25. 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
26. 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
27. 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>
28. 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>
29. Banna AL, Taher A, Kaiser MS, Rahman Cho GH. Application of Artificial Intelligence in Predicting Earthquakes: State-of-the-Art and Future Challenges. 2021

30. 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>
31. 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
32. Drilling Engineering. Towards Achieving Total Sustainability Sustainable Oil and Gas Development Series. – 2021, Pages 317-382
33. 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>
34. 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
35. 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.
36. Hossein Yavari, Jafar Qajar, Bernt Sigve Aadnoy, Rasool Khosravian 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>
37. 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
38. 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>

39. 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.
40. 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>
41. The Guidance Systems Used in Directional Drilling. <https://utilitiesone.com/the-guidance-systems-used-in-directional-drilling>
42. Sharma D, Kumar NA. Review on machine learning algorithms, tasks and applications. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. 2017;
43. 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
44. Warren, T., 2019. Technology gains momentum: Rotary-steerable technology Part 1. [Online] Available at: <http://images.pennwellnet.com/ogj/images/ogj2/9651jwa02.gif>