

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми
Харченко М.О.

«22» _____ 2026 року

Завідувач кафедри буріння та геології
Винников Ю.Л.

«22» 01 Листопада 2026 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Порівняльний аналіз технічних засобів для буріння похило-направлених свердловин

Пояснювальна записка

Керівник

Д.т.н., професор

кафедри буріння та геології

Гошовський С.В.

посада, наук. ступінь, ПІБ

підпис, дата

Виконавець роботи

студент група 601-НБ

Вусик Костянтин Миколайович

студент, ПІБ

підпис, дата,

Консультант за 1 розділом

Д.т.н., професор кафедри буріння та геології

С.В. Гошовський

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 2 розділом

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

О.В. Матяш

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 3 розділом

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

О.В. Матяш

посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Дата захисту 23.01.2026р.

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 2025 року *Ю. Винник*

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Вусик Костянтин Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Порівняльний аналіз технічних засобів для буріння похило-направлених свердловин
2. Керівник роботи проф. кафедри буріння та геології, проф., д.т.н. Гошовський С.В.

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

затверджені наказом вищого навч. закладу від « 3 » 09 2025 року № 105-фа

3. Строк подання студентом роботи 13.01.2026р

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

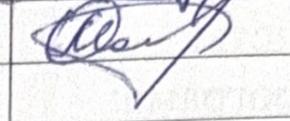
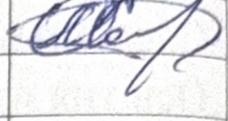
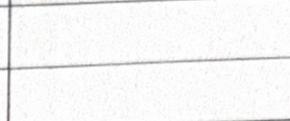
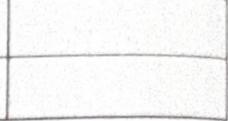
Список використаних джерел

Додатки (за необхідності)

6. Перелік графічного матеріалу

Презентація із основними результатами кваліфікаційної роботи

7. Консультанти розділів роботи

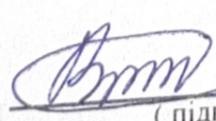
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	д.т.н., проф. Гошовський С.В.		
2	к.т.н., доц. Матем О.В.		
3	к.т.н., доц. Матем О.В.		

8. Дата видачі завдання 3.09.2025г.

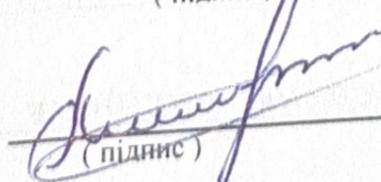
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ 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) Бусел К.М. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

 (підпис) Гошовський С.В. (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ANOTATION	4
ВСТУП.....	5
INTRODUCTION.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1 Історичні передумови розвитку похило-спрямованого буріння.....	9
1.2 Класифікація видів та способів буріння похило-спрямованих свердловин .	11
1.3 Технічні засоби контролю за процесом викривлення.....	16
1.4 Технічні засоби для похило-спрямованого буріння.....	21
1.5 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження.....	48
РОЗДІЛ 2 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПОХИЛО-НАПРАВЛЕНОГО БУРІННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РІЗНИХ СИСТЕМ.....	51
2.1 Порівняння ГВД і РКС при похило-направленому бурінні.....	51
2.2 Аналіз набору параметрів кривизни	52
2.3 Контроль та зняття інклінометричних вимірів	54
2.4 Аналіз впливу бурового розчину на роботу систем.....	55
2.5 Порівняння середньої швидкості проходки при бурінні похило-направлених свердловин з використанням ГВД та РКС.....	57
2.6 Оцінка геометричної однорідності та якісних характеристик стовбура свердловини при використанні ГВД і РКС	59
2.7 Вплив технології буріння на відхилення свердловини від гирла	60
2.8 Економічна ефективність застосування ГВД та РКС при похило-направленому бурінні	61
2.9 Порівняльний аналіз ефективності гвинтових вибійних двигунів та роторних керованих систем.....	62
2.10 Висновки до розділу 2	64
РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ СВЕРДЛОВИНИ	66

3.1 Аналіз геологічних даних досліджуваного родовища	66
3.2 Аналіз конструкції свердловини	72
3.3 Обґрунтування вибору обладнання для проводки свердловини	75
3.4 Оцінка економічної та техніко-технологічної ефективності застосування бурових систем	80
3.5 Висновки по розділу 3	82
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	84
GENERAL CONCLUSIONS ON THE WORK	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88

АНОТАЦІЯ

Вусик К.М. Порівняльний аналіз технічних засобів для буріння похило-направлених свердловин. Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава; Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – 2026.

Магістерська робота присвячена комплексному порівняльному аналізу технологій похило-направленого буріння (ПНБ) із застосуванням гвинтових вибійних двигунів (ГВД) та роторних керованих систем (РКС) для обґрунтування оптимального вибору обладнання.

Розділ 1 представляє аналіз історичного розвитку, класифікації видів та технічних засобів ПНБ. Розглянуто еволюцію від простих механічних відхилювачів до сучасних автоматизованих систем, детально описані принципи дії, конструкції та застосування ключових інструментів, зокрема ГВД і різних типів РКС ("Push the Bit", "Point the Bit").

Розділ 2 містить детальний порівняльний аналіз ефективності ГВД та РКС за сукупністю критеріїв. Встановлено, що РКС забезпечують вищу механічну швидкість проходки, кращу якість стовбура, більше відхилення від гирла, безперервний контроль траєкторії та меншу залежність від параметрів бурового розчину.

Розділ 3 присвячений техніко-економічному обґрунтуванню вибору обладнання на прикладі конкретного родовища. На основі аналізу геологічного розрізу з аномально високими тисками та температурою, а також конструкції свердловини з горизонтальним закінченням, запропоновано оптимальну компоновку та режими буріння. Підтверджено, що застосування РКС дозволяє скоротити час буріння на 10-15% та знизити витрати матеріалів на 15-20%.

Ключові слова: похило-направлене буріння, гвинтовий вибійний двигун (ГВД), роторна керована система (РКС), траєкторія свердловини, інтенсивність викривлення, буровий розчин, механічна швидкість проходки, якість стовбура, економічна ефективність, горизонтальна свердловина.

ANOTATION

Vusik K.M. Comparative analysis of technical means for drilling directional wells. Master's thesis in the specialty 185 'Oil and Gas Engineering and Technology'. – Poltava; Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic National University. – 2026.

The master's thesis is devoted to a comprehensive comparative analysis of directional drilling technologies using screw downhole motors (SDM) and rotary steerable systems (RSS) to justify the optimal choice of equipment.

Chapter 1 presents an analysis of the historical development, classification of types and technical means of DTH. The evolution from simple mechanical deflectors to modern automated systems is considered, and the principles of operation, design and application of key tools, in particular DBMs and various types of RCS (Push the Bit, Point the Bit), are described in detail.

Section 2 contains a detailed comparative analysis of the effectiveness of GWD and RCS based on a set of criteria. It has been established that RCS provide higher mechanical drilling speed, better shaft quality, greater deviation from the wellhead, continuous trajectory control and less dependence on drilling fluid parameters.

Section 3 is devoted to the technical and economic justification for the choice of equipment using the example of a specific field. Based on the analysis of a geological section with abnormally high pressures and temperatures, as well as the design of a well with a horizontal termination, the optimal configuration and drilling modes are proposed. It has been confirmed that the use of RCS allows to reduce drilling time by 10-15% and reduce material costs by 15-20%.

Keywords: directional drilling, screw downhole motor (SDM), rotary steerable system (RSS), wellbore trajectory, deviation intensity, drilling fluid, mechanical running speed, wellbore quality, economic efficiency, horizontal well.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток нафтогазової галузі характеризується переходом до розробки важкодоступних родовищ із складними геологічними умовами, що вимагає застосування технологій похило-направленого буріння для ефективного розкриття продуктивних горизонтів. Традиційні гвинтові вибійні двигуни, які широко використовувались протягом десятиліть, дедалі частіше виявляють свої обмеження при спорудженні складних свердловин із протяжними горизонтальними ділянками та високими вимогами до точності траєкторії.

Впровадження роторних керованих систем відкриває нові можливості для підвищення ефективності буріння, однак відсутність комплексного порівняльного аналізу цих технологій ускладнює вибір оптимального обладнання для конкретних геологічних умов. Особливо актуальним це питання стає при роботі в екстремальних термобаричних умовах із пластовими тисками до 271 кгс/см^2 та температурами до 96°C , де технологічні помилки можуть призвести до значних економічних втрат та аварійних ситуацій. Систематизація переваг і недоліків різних систем буріння дозволить оптимізувати процес спорудження свердловин, скоротити час будівництва та підвищити якість розкриття продуктивних пластів.

Метою роботи є порівняння технологій похило-направленого буріння з використанням гвинтових вибійних двигунів та роторних керованих систем для обґрунтування оптимального вибору обладнання при спорудженні свердловин із складними профілями.

Задачі дослідження:

- Проаналізувати історичний розвиток та сучасний стан технічних засобів похило-направленого буріння.
- Провести порівняльний аналіз технологічних характеристик ГВД та РКС за критеріями інтенсивності викривлення, швидкості проходки, якості стовбура, впливу бурового розчину та точності контролю траєкторії.

- Оцінити економічну ефективність застосування ГВД та РКС.
- Розробити техніко-економічне обґрунтування вибору обладнання для конкретних геологічних умов родовища.

Об'єктом дослідження є процес буріння похило-направленого буріння нафтових і газових свердловин.

Предметом дослідження є технологічні та економічні аспекти застосування гвинтових вибійних двигунів та роторних керованих систем при спорудженні похило-направлених свердловин.

Наукова новизна роботи – отримано нові дослідні дані щодо ефективності застосування гвинтових вибійних двигунів та роторних керованих систем з урахуванням специфіки геологічних умов родовища з аномально високими термобаричними параметрами.

Практична цінність роботи полягає у тому, що результати дослідження дозволяють обґрунтовано вибирати оптимальне обладнання для похило-направленого буріння, що забезпечує істотне скорочення термінів будівництва свердловин, підвищення механічної швидкості проходки та зниження витрат на бурові роботи.

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

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Робота викладена на 90 сторінках, у тому числі 86 сторінках основного тексту, 26 рисунків, 18 таблиць, 4 сторінок списку використаних джерел.

INTRODUCTION

Relevance of the topic. The current development of the oil and gas industry is characterised by a shift towards the development of hard-to-reach fields with complex geological conditions, which requires the use of directional drilling technologies for the effective opening up of productive horizons. Traditional screw downhole motors, which have been widely used for decades, are increasingly showing their limitations in the construction of complex wells with long horizontal sections and high trajectory accuracy requirements.

The introduction of rotary steerable systems opens up new opportunities for improving drilling efficiency, but the lack of a comprehensive comparative analysis of these technologies makes it difficult to select the optimal equipment for specific geological conditions. This issue is particularly relevant when working in extreme thermobaric conditions with formation pressures of up to 271 kgf/cm² and temperatures of up to 96°C, where technological errors can lead to significant economic losses and emergencies. Systematising the advantages and disadvantages of different drilling systems will optimise the well construction process, reduce construction time and improve the quality of productive formation exposure.

The aim of the work is to compare the technologies of directional drilling using screw downhole motors and rotary steerable systems to justify the optimal choice of equipment for the construction of wells with complex profiles.

Research objectives:

- Analyse the historical development and current state of technical means of directional drilling.
- Conduct a comparative analysis of the technological characteristics of PDMs and RCSs according to the criteria of curvature intensity, drilling speed, wellbore quality, drilling fluid impact and trajectory control accuracy.
- To evaluate the economic efficiency of using PDMs and RCSs.
- To develop a technical and economic justification for the selection of equipment for specific geological conditions of the field.

The object of the study is the process of directional drilling of oil and gas wells.

The subject of the study is the technological and economic aspects of the use of screw downhole motors and rotary steerable systems in the construction of directional wells.

The scientific novelty of the work is a comprehensive comparative study of the effectiveness of using screw downhole motors and rotary steerable systems, taking into account the specifics of the geological conditions of the field with abnormally high thermobaric parameters.

The practical value of the work lies in the fact that the results of the study allow for a well-founded selection of the optimal equipment for directional drilling, which ensures a significant reduction in well construction time, an increase in mechanical drilling speed, and a reduction in drilling costs.

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

Structure and scope of work. The master's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions and a list of references. The work is presented on 90 pages, including 86 pages of the main text, 26 figures, 18 tables, 4 pages of the list of references.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Історичні передумови розвитку похило-спрямованого буріння

Перші спроби штучного викривлення свердловин відносяться до 1912 року. На півдні Африки, під час буріння алмазних свердловин, виникла потреба змінити напрямок осі стовбура. Для цього було застосовано спеціальний пристрій – «буровий клин». Його конструкція мала увігнуту внутрішню поверхню та загострену нижню частину, яка запобігала обертанню під час роботи. Принцип дії полягав у тому, що бурильна колона, спущена на вибій, відхилялася від початкової осі свердловини за рахунок створення бокового зусилля. Цей метод започаткував поняття «штучного викривлення свердловини» [1].

Подальший розвиток технології відбувся у 1920–1930-х роках, коли нафтогазова промисловість почала активно впроваджувати роторне буріння. Це дозволило підвищити ефективність бурових робіт та відкрило можливості для системного застосування похило-спрямованих свердловин. Основними завданнями на той час було: уникнення природного викривлення стовбура, точне потрапляння у продуктивні пласти та збільшення площі дренажу покладау.

Важливим кроком стало впровадження уїпстока – механізму для орієнтованого викривлення стовбура. Перші практичні результати продемонстрували можливість отримання значних зміщень від гирла, зокрема пробурені свердловини із zenітним кутом понад 30° і зміщенням більш як 500 метрів [2]. Незважаючи на труднощі, пов'язані з відсутністю досвіду та частими аваріями з уїпстоком, цей етап став поштовхом до подальших розробок.

Справжнім проривом у 1930–1940-х роках стало застосування турбобура разом із викривляючими пристроями. Це дозволило отримати більшу інтенсивність викривлення та забезпечити більш точний контроль над траєкторією свердловини. Згодом конструкція турбобурів була вдосконалена:

поява ексцентричних ніпелів дала змогу досягати стабільних результатів з набором кривизни до $1,5^\circ$ на 10 метрів проходки та зенітними кутами до 50° . Такі вдосконалення значно розширили практичне застосування похило-спрямованого буріння [3].

У 1950-х роках у США з'явилися нові інструменти контролю траєкторії – стаціонарні знімні клини, гіроскопічні, електричні та фотоінклінометри. Саме в цей період було закладено науково-технічну базу для створення перших систем точного контролю положення стовбура. Дослідження й розробки американських фахівців, таких як Дж. Каммінг, Р. Вудс, Д. Brentлі, А. Лубінські, стали вагомим внеском у становлення теорії та практики похило-спрямованого буріння [4].

З 1960-х років почали активно розвиватися методи буріння багатоствольних і горизонтальних свердловин. Зменшення діаметра розвідувальних свердловин, удосконалення бурових верстатів і поява нового покоління бурових інструментів забезпечили реалізацію інноваційних підходів до буріння. У цей період набули поширення гвинтові вибійні двигуни (ГВД), які поступово витіснили турбобури в ряді завдань. Спочатку їх використовували для локального коригування траєкторії та набору кривизни, однак згодом вони стали основним технічним засобом для проведення складних похило-спрямованих і ремонтно-відновлювальних робіт [5].

Наприкінці ХХ століття похило-спрямоване буріння зазнало якісного стрибка завдяки впровадженню вибійних телеметричних систем (ВТС). Ці системи дозволяли у режимі реального часу отримувати дані про кутові параметри стовбура, положення вибою та інші геофізичні характеристики. Для передавання інформації використовувалися електромагнітні, гідравлічні чи кабельні системи зв'язку. Поєднання телеметрії з гвинтовими забійними двигунами та роторними керованими системами (РКС) дозволило значно підвищити точність керування траєкторією свердловини [6].

У 1990-х роках широкого поширення набули роторні керовані системи, які забезпечували безперервне обертання бурильної колони та оперативне коригування напрямку буріння без необхідності зупинки процесу. Це стало

революційним кроком у галузі, оскільки забезпечувало високу швидкість проходки та точність контролю. Завдяки РКС стало можливим буріння наддовгих похило-спрямованих і горизонтальних свердловин, що значно розширило масштаби освоєння нафтових і газових родовищ [7].

Сьогодні похило-спрямоване буріння є невід'ємною частиною сучасних технологій освоєння вуглеводневих покладів. Його застосування дозволяє ефективно розробляти родовища, ускладнені геологічними умовами, збільшувати зону дренування, уникати аварійних ділянок та оптимізувати економіку бурових робіт. Розвиток сучасних телеметричних систем, цифрових технологій та автоматизованих систем керування траєкторією відкриває нові перспективи для підвищення ефективності буріння в усьому світі.

1.2 Класифікація видів та способів буріння похило-спрямованих свердловин

Будь-яка свердловина під час буріння, незалежно від технології, у більшій чи меншій мірі відхиляється від початково заданої траєкторії. Таке відхилення називається викривленням свердловини. Розрізняють два основних його види:

1. Природне викривлення – відхилення траєкторії свердловини, зумовлене дією природних геолого-технічних факторів.
2. Штучне викривлення – свідоме відхилення траєкторії за допомогою спеціальних технічних засобів і технологічних прийомів.

Природне викривлення свердловини

Основними факторами, що впливають на природне викривлення, є:

- різна твердість та анізотропія гірських порід;
- механічні властивості розрізу;
- конструктивні особливості та невідповідність осі свердловини і компоновки низу бурильної колони (КНБК);
- технологічні режими буріння, зокрема число обертів породоруйнівного інструменту та величина осьового навантаження.

Вертикальні свердловини часто відхиляються від проектного профілю через відсутність співвісності вежі, ротора та гирла свердловини. Це є суб'єктивною причиною, яку можна усунути завдяки правильному центруванню бурової установки, використанню обважнених бурильних труб (УБТ) та контролю прямолінійності ведучої труби.

Об'єктивні причини поділяються на:

- геологічні (анізотропія порід, розриви, зони різної твердості);
- технологічні (режими буріння);
- технічні (особливості конструкції КНБК, долота).

Цілковито уникнути природного викривлення неможливо, але застосування спеціальних КНБК (жорстких, маятникових), а також оптимальних режимів буріння дозволяє суттєво зменшити його вплив. Наприклад, у твердих породах рекомендується знижувати осьове навантаження і частоту обертання, у м'яких – збільшувати механічну швидкість проходки (МСП), а у породах, схильних до розмиву – зменшувати витрату промивальної рідини.

Відсутність контролю за природним викривленням призводить до ускладнень: підвищеного зношування елементів КНБК, аварій із бурильним інструментом, проблем під час спуску обсадних колон, що ускладнює або робить нерентабельною подальшу експлуатацію свердловини.

Штучне викривлення є основним методом спрямованого буріння. Воно дозволяє контролювати траєкторію стовбура та виводити свердловину у задану точку (рис. 1.1–1.5). Для цього застосовуються спеціальні технічні засоби – відхилячі разової та безперервної дії, які створюють відхиляюче зусилля на долоті.

Вибір профілю свердловини здійснюється з урахуванням:

- геологічних умов;
- фізико-механічних властивостей порід;
- вимог експлуатації;
- особливостей КНБК та інструменту;
- мінімізації ризиків і витрат.

Основні типи профілів (рис. 1.1–1.5):

1. Похило-направлені (двох-, трьох- та чотирьохінтервальні);
2. Пологі (рис. 1.2);
3. Радіальні (рис. 1.3);
4. Горизонтальні (рис. 1.4);
5. Багатовибійні (рис. 1.5).

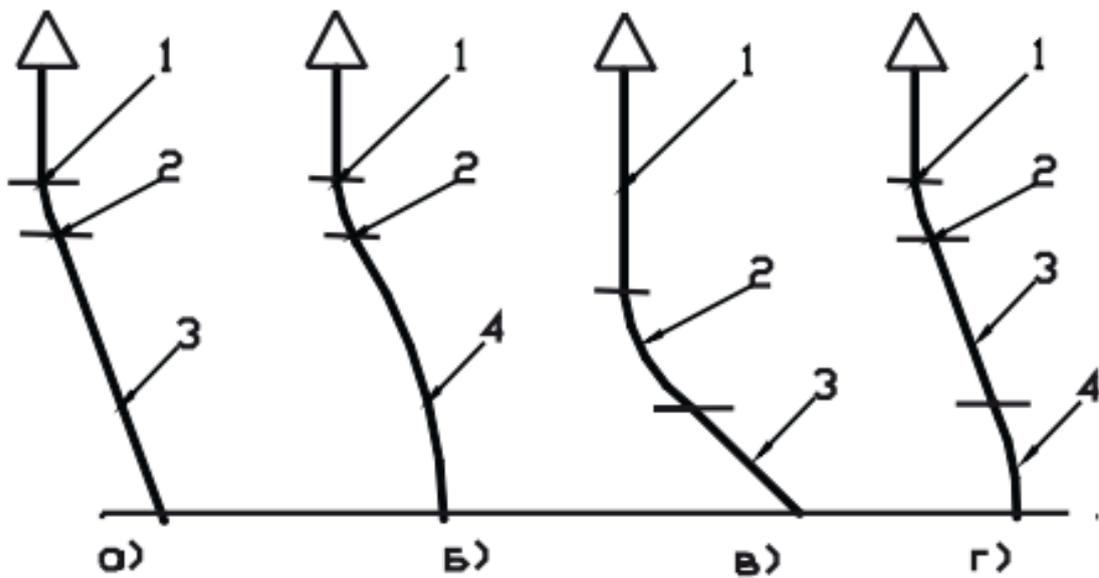


Рисунок 1.1 - Похило-направлений профіль:

а – двоінтервальний; б – триінтервальний; в - чотиринтервальний (1 - вертикальний ділянку, 2 - ділянку набору, 3 - ділянку стабілізації, 4 - ділянку зниження)

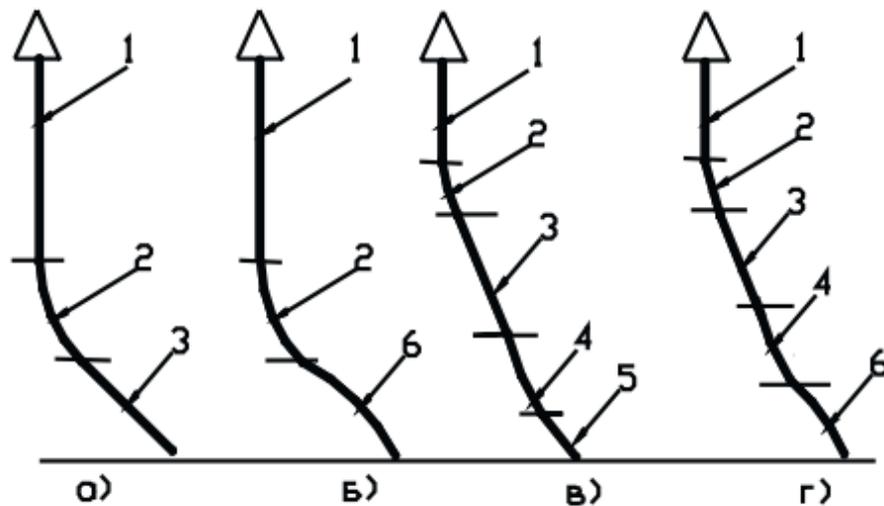


Рисунок 1.2 - Пологий профіль:

а – з ділянкою стабілізації; б – із ділянкою малоінтенсивного зменшення zenітного кута; с - з ділянкою добору параметрів кривизни та їхньої стабілізації; d – з ділянкою добору параметрів кривизни та їхнього малоінтенсивного зменшення. (1 – вертикальна ділянка; 2 – ділянка набору параметрів кривизни; 3 – ділянка стабілізації; 4 – ділянка добору параметрів кривизни; 5 – ділянка стабілізації zenітного кута; 6 – ділянка малоінтенсивного зменшення zenітного кута).

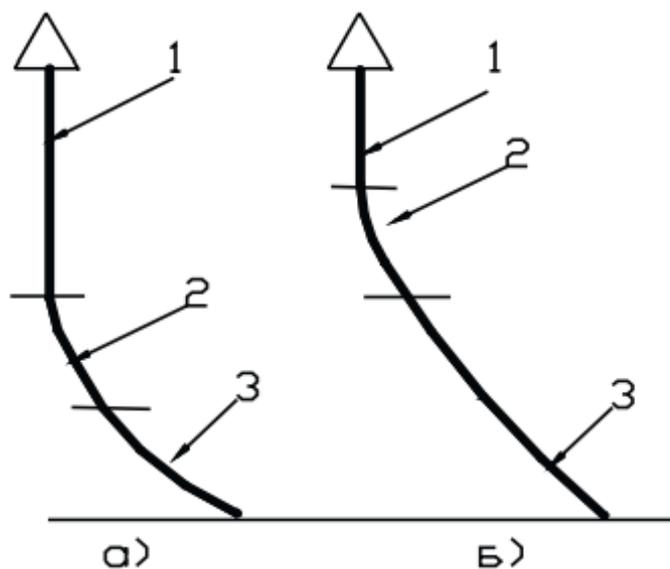


Рисунок 1.3 - Радіальний профіль:

а – з ділянкою набору параметрів кривизни нижче за зону глибинно-насосного обладнання; б – з ділянкою набору параметрів кривизни кондукторі. (1 – вертикальна ділянка; 2 – ділянка набору параметрів кривизни; 3 – ділянка малоінтенсивного збільшення zenітного кута).

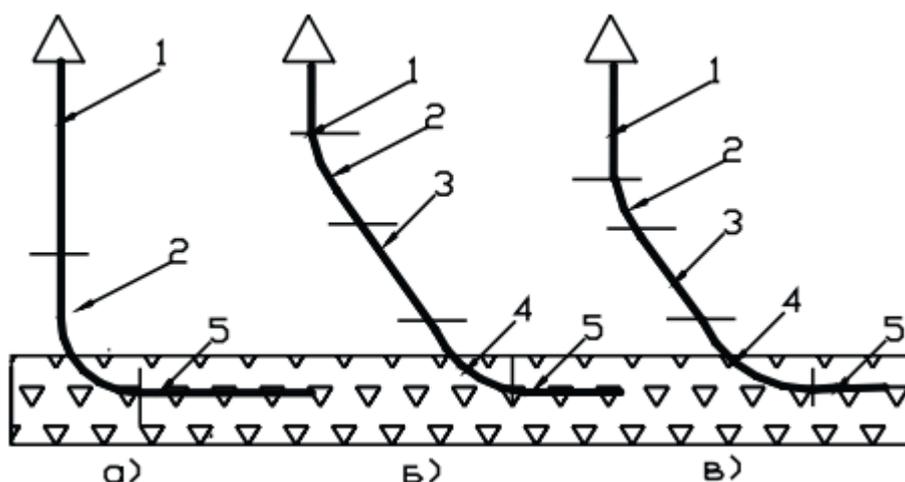


Рисунок 1.4 - Горизонтальний профіль:

а – із ділянкою набору до горизонтальної ділянки; б – з ділянкою набору та стабілізації параметрів кривизни в кондукторі; с – з ділянкою набору та стабілізації параметрів кривизни нижче зони глибинно-насосного обладнання. (1 – вертикальна ділянка; 2 – ділянка набору параметрів кривизни; 3 – ділянка стабілізації; 4 – ділянка добору параметрів кривизни; 5 – горизонтальна ділянка)

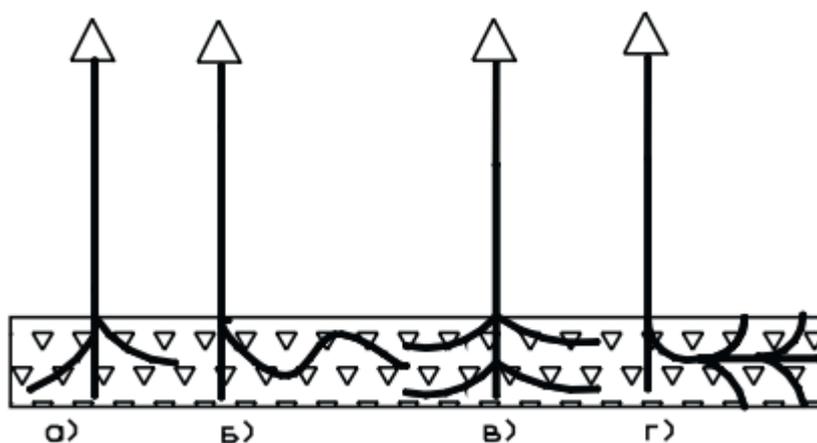


Рисунок 1.5 - Багатоствійний профіль:

а – МЗС з горизонтальними та пологими стволами; б - МЗС із хвиляподібними додатковими стволами; с – МЗС радіально-горизонтальні.

Вибір конкретного профілю здійснюється на основі аналізу досвіду буріння у даному районі, вивчення закономірностей природного викривлення на попередніх свердловинах, а також інженерних розрахунків зміщення, глибин і кутів.

Відхиляючі пристрої класифікують за принципом дії:

- зміна напрямку осьового зусилля;
- зміна форми робочої частини пристрою;
- використання ексцентричної сили ваги відносно осі свердловини.

Інтенсивність викривлення залежить від:

- геометричних параметрів КНБК;
- місця встановлення кута перекосу;
- відкритого діаметра стовбура;
- типу долота та бурильного двигуна.

Практика показує, що найбільш ефективним способом керування профілем є використання відхиляючого обладнання, розташованого безпосередньо на вибійному інструменті. Це дозволяє своєчасно контролювати траєкторію та зменшувати ризик аварій чи ускладнень.

1.3 Технічні засоби контролю за процесом викривлення

При спрямованому бурінні необхідно постійно контролювати просторове положення стовбура свердловини, а саме – визначати координати вибою та положення осі свердловини на різних глибинах. Для цього на заданих інтервалах вимірюють зенітний та азимутальний кути.

- Зенітний кут – це кут між віссю свердловини (або дотичною до неї) та вертикаллю.
- Азимут – це кут між напрямком на північ і горизонтальною проекцією осі свердловини, що вимірюється за годинниковою стрілкою.
- Кривизна свердловини – приріст кута викривлення на певній криволінійній ділянці стовбура.

Зміни азимутального та зенітного кутів характеризують інтенсивність викривлення, тобто швидкість відхилення свердловини від її початкового напрямку. Варто зазначити, що інтенсивність азимутального викривлення залежить від зенітного кута: при малих його значеннях навіть незначні зміни

азимуту можуть призводити до значних похибок у визначенні просторового положення свердловини.

Датчики для вимірювання зенітного кута поділяються на три основні групи:

1. датчики, що використовують принцип горизонтального рівня рідини;
2. датчики, що працюють на основі схилу;
3. акселерометри.

Для визначення азимуту застосовують:

1. магнітну стрілку;
2. механічні та оптичні гіроскопи;
3. магнітометри.

Комплексні вимірювання проводяться за допомогою інклінометрів – приладів для визначення просторового положення точки стовбура свердловини. Вони забезпечують вимірювання зенітного та азимутального кутів у діапазоні нахилів від 0° до 180° . Залежно від принципу дії інклінометри поділяють на кілька груп [19]:

1. Рідинні апсидоскопи – прилади, що орієнтовано спускаються у свердловину. Результати вимірювань фіксуються після підйому приладу на поверхню. Використовуються здебільшого у кернах для відбору орієнтованого керна.

2. Магнітно-гравітаційні прилади – поєднують використання магнітного поля Землі для визначення азимуту та гравітаційного поля для визначення зенітного кута. Дані датчиків перетворюються на електричний сигнал і передаються на пульт у реальному часі. Такі системи застосовуються і для оперативного контролю в окремих точках стовбура.

3. Гіроскопічні інклінометри – використовують гіроскопічний ефект диска-маховика, що обертається з великою швидкістю ($10\text{--}20$ тис. хв^{-1}). Під дією сили Коріоліса вісь гіроскопа орієнтується у напрямку географічного меридіана, що забезпечує визначення азимуту незалежно від локальних магнітних аномалій

чи впливу бурильної колони. Для вимірювання zenіту у таких приладах застосовують різні модифікації виска.

4. Інклінометри копіювального типу – вимірюють відносні зміни zenітного та азимутального кутів шляхом копіювання траєкторії стовбура. Це дозволяє поінтервально визначати просторове положення свердловини на різних глибинах.

Важливе місце у практиці буріння займають забійні телеметричні системи (ЗТС). Вони забезпечують вимірювання параметрів викривлення та контроль роботи обладнання безпосередньо під час буріння. Система складається з комплексу датчиків, що передають інформацію на поверхню для подальшої обробки та аналізу.

Принцип роботи ЗТС такий: буровий розчин, циркулюючи через внутрішній простір бурильної колони, приводить у дію турбогенератор, який виробляє електроенергію для живлення модулів. Дані датчиків перетворюються на кодові сигнали й передаються на денну поверхню різними каналами зв'язку – гідравлічним, електропровідним або електромагнітним. На поверхні сигнали приймаються апаратурою, декодуються та відображаються на комп'ютері у режимі реального часу.

До складу сучасних телеметричних систем входять:

- наземна апаратура;
- джерело живлення;
- вибійний модуль із датчиками;
- канал зв'язку «забій – устя»;
- програмно-технічне забезпечення для збору й аналізу даних.

Таким чином, використання інклінометричних і телеметричних систем дає можливість з високою точністю контролювати положення свердловини у просторі, своєчасно виявляти відхилення від проектної траєкторії та коригувати процес буріння.

У світовій практиці вимоги до вибійних телеметричних систем (ЗТС) істотно зросли. Якщо раніше вони виконували функції виключно

інклінометричних датчиків, то сьогодні такі системи оснащуються комплексом сенсорів для контролю геофізичних і технологічних параметрів. Це дає можливість вести буріння в безпосередній близькості від продуктивних горизонтів, контролювати процес проходки у проникних пластах і завчасно виявляти передумови до аварійних ситуацій.

Одним із ключових завдань під час буріння є точне визначення фактичного положення стовбура свердловини у просторі для уникнення відхилення від проектної траєкторії. З цією метою через кожні 10–50 м здійснюються вимірювання кутових параметрів. Завдання телеметричних систем умовно поділяють на три напрями: оперативний технологічний контроль режиму буріння для його оптимізації; контроль спрямування траєкторії свердловини та управління процесом спрямованого буріння; геологічні дослідження – літологічне розчленування розрізу, визначення параметрів пластів у їх природному стані, виділення пластів-колекторів і прогнозування зон аномально високих пластових тисків.

Згідно з дослідженнями [20], найбільше поширення у світі набули ЗТС з гідравлічною передачею інформації, де дані передаються безпосередньо зі свердловини на поверхню. Переваги цього методу полягають у відносній економічності, великій дальності дії та можливості організації двостороннього зв'язку. Принцип роботи базується на передачі сигналів через стовп промивальної рідини, що заповнює бурильну колону. Інформація кодується у вигляді імпульсів тиску, параметри яких (фаза, частота чи амплітуда) відповідають вимірюваним величинам. Гідравлічні системи працюють за принципом гальмування вибійного снаряда у момент випуску бурового розчину в затрубний простір. Проте наявні гідравлічні перешкоди звужують смугу пропускання, що робить цей канал найповільнішим серед існуючих.

Історично перші системи з гідравлічним каналом зв'язку з'явилися ще в 1960-х роках. Це були механічні пристрої, у яких привід був конструктивно пов'язаний з валом турбобура. До таких відносилися гідротурботахометри (ГТН-2, 3, 4, ПН), що забезпечували безперервний контроль режиму роботи турбобура.

Першою більш досконалою системою стала гідравлічна інклінометрична телесистема (ГІТ), яка дозволила здійснювати контроль кутових параметрів і напрямку дії відхиляючого пристрою. З 1982 року широкого поширення набули модернізовані системи типу «Індикатор частоти обертання валу турбобура» (ІЛТ). Нині закордонні компанії пропонують системи LWD (Logging While Drilling) із гідравлічним каналом зв'язку, здатні проводити гамма-каротаж з азимутальним скануванням, визначати відхилення долота, виконувати статичну й динамічну інклінометрію та вимірювати швидкість обертання долота. Перевагами таких систем залишаються значна дальність дії та відсутність потреби в додаткових засобах для організації каналу зв'язку, адже для цього використовується сам промивальний розчин. Водночас суттєвими недоліками є низька швидкість передачі даних, слабка стійкість до перешкод, потреба в автономному живленні, а також несумісність із аерованими рідинами та продувкою повітрям.

Розвиток альтернативних рішень призвів до появи обладнання з електромагнітним каналом зв'язку, яке нині виробляється багатьма вітчизняними та закордонними компаніями. Передача даних відбувається завдяки електромагнітним хвилям, що виникають між ізольованою ділянкою бурильної колони та породою. Сигнал приймається на поверхні у вигляді різниці потенціалів між колоною і приймальною антеною, встановленою в ґрунт. Цей метод має ряд істотних переваг: можливість організації зворотного зв'язку, простоту керування, підвищену надійність елементів, що контактують із абразивним потоком промивальної рідини, а також відносно дешевизну. Крім того, він менш вимогливий до якості бурового розчину, забезпечує більшу інформативність порівняно з гідравлічними системами та може застосовуватися там, де гідравлічний канал неефективний. Проте обмежена дальність передачі, що залежить від електропровідності порід, а також складність монтажу антен у важкодоступних місцях і низька завадостійкість зменшують ефективність цього методу.

Вітчизняна практика також має значний досвід у створенні таких систем. Так, у 1969 році розроблено обладнання КУБ-1 для електричного каротажу в процесі турбінного буріння. Згодом з'явилися системи ЗІС-1 для автоматичного контролю напрямку свердловини, а з 1991 року – ЗІС-4, що застосовувалися для буріння горизонтальних стовбурів. У 1999 році почалося серійне виробництво ЗТС54-ЕМ, спеціально призначених для буріння похило-спрямованих і горизонтальних свердловин малого діаметра.

Ще однією технологічною альтернативою є системи з електропровідним каналом зв'язку. Вони менш поширені через складність у реалізації, але мають значні переваги: високу швидкість, завадостійкість, багатоканальність і відсутність потреби в автономних джерелах живлення. Такі системи здатні працювати навіть з аерованими рідинами та при продувці повітрям, що робить їх універсальними. Водночас головними їх недоліками є необхідність прокладання кабелю всередині бурильної колони, що ускладнює процес буріння, створює ризики механічних пошкоджень і унеможливорює обертання колони. Крім того, використання кабелю обмежує можливість закриття превентора.

Таким чином, вибійні телеметричні системи пройшли тривалий шлях розвитку – від механічних пристроїв до високотехнологічних комплексів, що забезпечують контроль траєкторії, технологічних режимів і геофізичних параметрів у режимі реального часу. Вибір типу системи і каналу зв'язку залежить від конкретних геологічних умов, вимог до швидкості та точності передавання інформації, а також від економічної доцільності використання того чи іншого обладнання.

1.4 Технічні засоби для похило-спрямованого буріння

Похило-направлене буріння (ПНБ) – це метод спорудження свердловин із відхиленням стовбура від вертикалі за спеціально заданою траєкторією. Він широко застосовується як на етапі геологорозвідки, так і під час промислового видобування нафти й газу.

У світовій та вітчизняній практиці накопичено значний досвід у галузі похило-спрямованого буріння, створено численні конструкції й технічні засоби, що забезпечують його ефективне виконання. Згідно з навчальними посібниками [12; 13], технічні засоби ПНБ можна умовно поділити на кілька груп:

- обладнання для неорієнтованої зміни напрямку свердловини (використовується переважно для реалізації природного викривлення стовбура);
- пристрої й інструменти (бурові компоновання, КНБК, спеціальні породоруйнівні інструменти), призначені для зменшення інтенсивності природного викривлення свердловини;
- технічні засоби для штучного викривлення стовбура в заданому напрямку на обмеженому інтервалі буріння (відхилювачі);
- обладнання для керованого буріння на необмеженому інтервалі з можливістю точного утримання траєкторії.

Застосування ПНБ дозволяє вирішувати низку важливих завдань: скорочення витрат на облаштування родовищ завдяки кущовому бурінню; збільшення площі дренування продуктивного пласта шляхом його розтину під кутом; спорудження свердловин із морських платформ та естакад; доступ до пластів, розташованих під ділянками зі складним рельєфом (яри, гори, водні перешкоди); ліквідація аварійних ситуацій шляхом забурювання нових стволів; обхід зон тектонічних порушень та розтин пластів, перекритих соляними куполами.

Практичний досвід свідчить, що вертикально забурені свердловини нерідко відхиляються від проєктної траєкторії на десятки й сотні метрів. Це спричиняє появу різких перегинів і уступів стовбура, що ускладнює подальше кріплення та експлуатацію свердловини, а також підвищує ризик аварій. Саме тому контрольований процес викривлення став невід'ємною частиною сучасних технологій буріння.

Для створення керованого викривлення використовуються спеціальні технічні засоби. Відхиляючі пристрої формують бокову силу на породоруйнівному інструменті або створюють асиметрію між віссю

свердловини та долота. У сучасній практиці виділяють два основні підходи до ПНБ:

1. Роторний метод – переривчасте викривлення шляхом послідовних зарізок (наразі майже не застосовується).

2. Метод з використанням вибійних двигунів – безперервне викривлення із застосуванням турбінних або гвинтових двигунів у поєднанні з відхилювачами та системами роторного керування.

Класифікація відхиляючих пристроїв:

- відхилювачі разової дії (закриті та відкриті клини, вилучені та невилучені);
- відхилювачі безперервної дії (криві перевідники, турбінні та шпindelьні відхилювачі, гвинтові вибійні двигуни, роторні керовані системи).

Перші відхилювачі були досить громіздкими й трудомісткими у використанні (рис. 1.6). Наприклад, клин спускався на бурильних трубах, орієнтувався у заданому напрямку, після чого фіксувався за допомогою ваги колони або спеціальних гідравлічних якорів. Долото, ковзаючи по внутрішній поверхні клина, формувало новий напрямок свердловини. Одноразове застосування дозволяло відхилити стовбур на $3\text{--}5^\circ$, а для досягнення більшого кута клин доводилося спускати повторно. Сьогодні такі відхилювачі використовуються переважно для зарізування бокових стволів. Їхні переваги – простота конструкції, збереження діаметра свердловини та мінімальні ризики ускладнень, хоча недоліком залишаються різкі перегини траєкторії.

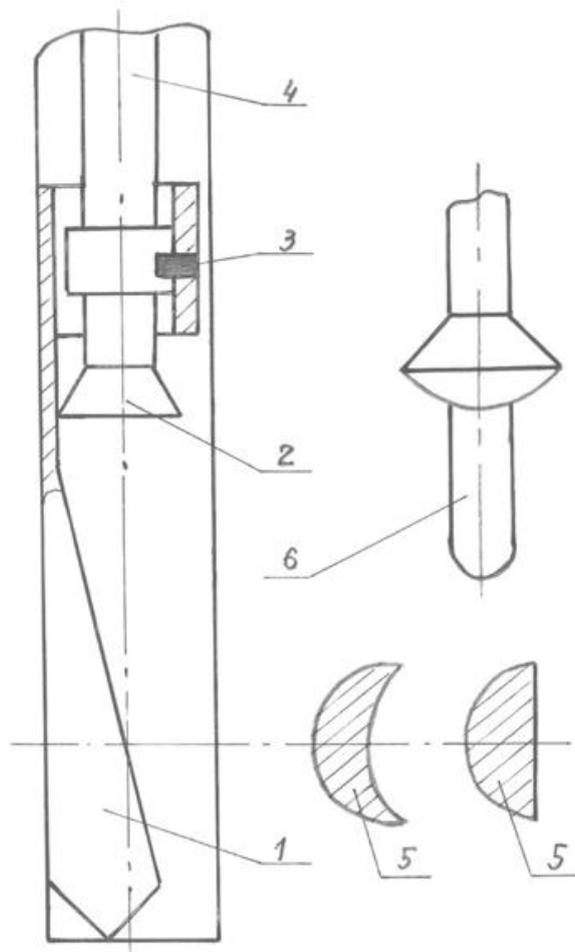


Рисунок 1.6 - Закритий клин, опускається на колоні бурильних труб
 1-клин із вузлом кріплення; 2-долото; 3-зрізний болт; 4-бурильні труби; 5 варіанти ложка
 клина; 6-розширювач пілот-свердловини.

Принцип дії такого відхилення такий самий, як і попередній. Конструктивна відмінність полягає в тому, що клин, що відхиляє, спускається на напрямних трубах. Спуск провадиться окремим рейсом. Після досягнення вибою, клин фіксується і проводиться спуск компонування для зарізування стовбура. З явних переваг такого виду спрямованого буріння це можливість забурювання кількох стовбурів без підйому інструменту. Негативними моментами є: зменшений діаметр ствола, додаткові витрати труб та збільшені витрати часу на спуско-підйомні операції (рис. 1.7).

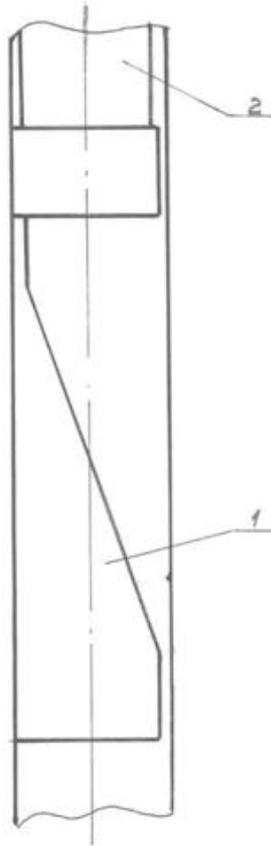


Рисунок 1.7 - Закритий клин, опускається на колоні напрямних труб

1-клин; 2-колонна напрямних труб

З допомогою такого відхиляча можливо єдино разово скривити свердловину. Клин представляє собою корпус, з внутрішньої сторони забезпечений жолобом (рис. 1.8). Складання клина проводиться на гирлі і спускається в прошаблоновану свердловину на задану глибину. Після виставлення відхилювача у потрібному напрямку його фіксують. Якір розкривається за допомогою створеного буровими насосами необхідного перепаду тиску, в інших випадках цементують. Далі йде відворот клина, або під натягом бурильного інструменту транспортний гвинт зрізається, дозволяючи зробити підйом колони, що транспортується. Після підйому проводять складання КНБК з наступним спуском на забій і зарізанням стовбура.

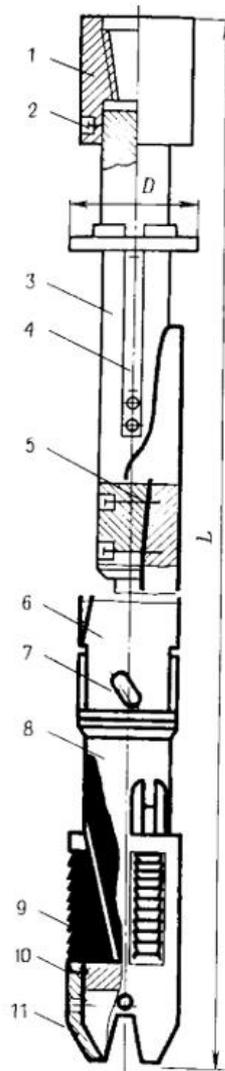


Рисунок 1.8 - Відкритий клин типу ОТЗ

1 - муфта; 2,5,10 - гвинти; 3 - спускний клин; 4 - пружина; 6 - клин-відхилювач;
7 - пальці; 8 - корпус; 9 - плашки; 11 - плашкотримач.

Відхилювач складається з двох основних вузлів – клина та опори (рис. 1.9). Опора може виконуватися у різних модифікаціях і зазвичай обладнується плашковими захватними пристроями, що забезпечують надійне закріплення її разом із клином в колоні обсадної. У нижній частині опори передбачені отвори для фіксації в цементному розчині. Конструкція відхилювача включає похилу виступну частину і Т-подібний паз, завдяки яким клин надійно з'єднується з опорою та щільно притискається до обсадної колони по всій довжині. Це створює оптимальні умови для якісного прорізання вікна в колоні.

Відкритий витягуваний клин являє собою комплект, що включає:

- суцільнометалевий відхиляючий клин;
- спеціальний орієнтовано встановлюваний штучний вибій – підп'ятник;
- гачок для вилучення жолоба клина зі свердловини.

Клин з'єднується з бурильною колоною за допомогою заклепок або штифтів, які при спуску на вибій зрізаються. При цьому осьове навантаження для зрізання кріплень повинно бути у 1,5 раза більшим за зусилля, необхідне для розкріплення фіксуючого механізму, що забезпечує надійність роботи інструмента.

Принцип роботи відкритого витягнутого клина включає такі етапи:

1. У свердловині встановлюється штучний вибій – підп'ятник, що є металевою пробкою з гідравліко-механічним розпірним пристроєм.
2. На свинцевий друк, який жорстко з'єднаний із перехідником та подовжувачем з орієнтатором, наноситься відбиток для визначення орієнтації.
3. Орієнтатор разом із друком витягується на поверхню, після чого за відбитком визначають положення підп'ятника відносно апсидальної площини свердловини.
4. Встановлюється необхідний кут орієнтації жолоба клина та верхнього замка підп'ятника. Для цього жолоб (клин) закріплюється на подовжувачі за допомогою перехідника-фіксатора з контргайкою.
5. Виконується орієнтований спуск відхиляючого жолоба, який встановлюють на нижньому замку підп'ятника (суміщення деталей вузлів).
6. Після цього проводиться буріння похилого стовбура свердловини з відхиленням від основної траєкторії.

Завдяки такій конструкції відкритий витягуваний клин забезпечує відхилення стовбура на кут до 5° . Для досягнення більшого набору зенітного кута клин може встановлюватися повторно. Основною перевагою цього обладнання є збереження діаметра свердловини та мінімальний ризик ускладнень під час буріння, хоча можливими недоліками залишаються різкі перегини стовбура при неправильному застосуванні.

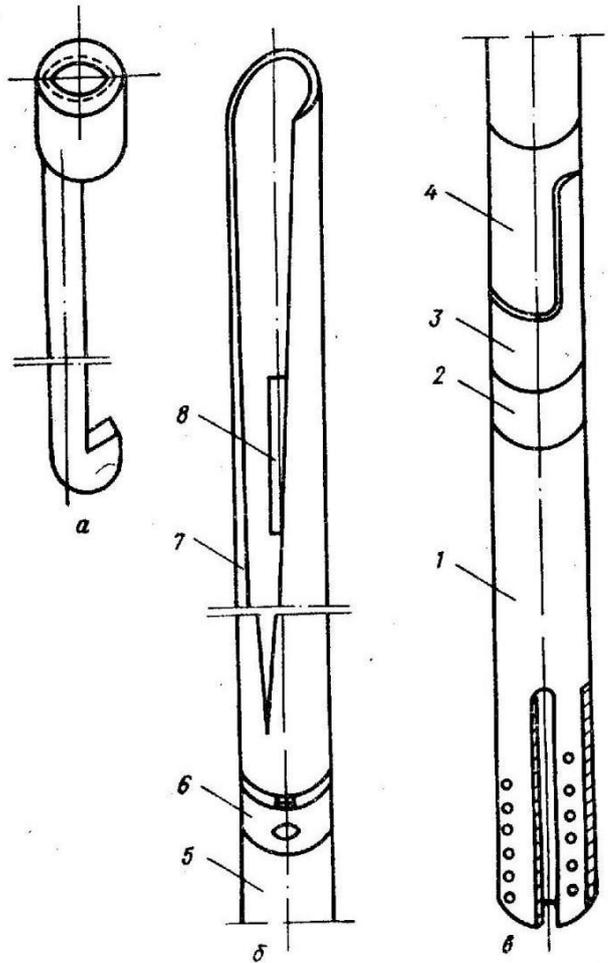


Рисунок 1.9 - Відкритий видобутий клин типу СКО

1 – під'ятник; 2 – патрубок; 3 – нижній замок кріплення під'ятника; 4 – верхній замок кріплення під'ятника; 5 – подовжувач; 6 – перехідник фіксатор; 7 – жолоб, що відхиляє; 8 – отвір.

У 1950–1960 рр., коли кероване похило-направлене буріння лише починало активно розвиватися, як основне обладнання для набору параметрів використовували кривий перевідник. Він став найбільш поширеним технічним засобом завдяки простоті виготовлення та надійності у роботі.

Кривий перевідник (рис. 1.10) являє собою товстостінний патрубок із приєднувальними різьбами, осі яких перетинаються під кутом. Це створює постійне асиметричне навантаження на долото, що призводить до поступового викривлення стовбура свердловини.

– Кут перекоосу між осями зазвичай складав 1° – 4° .

- Різьблення з перекосом, як правило, нарізали на ніпелі, рідше – на муфті.
- У ряді випадків разом із кривим перевідником у свердловину спускали гідравлічні вибійні двигуни, що підвищувало ефективність керування траєкторією.

Здатність відхилення свердловини значною мірою залежала від жорсткості бурильних труб. Серед основних недоліків застосування кривого перевідника слід виділити зависання бурильного інструменту при великих кутах перекосу, що ускладнювало процес буріння та могло призводити до аварій.

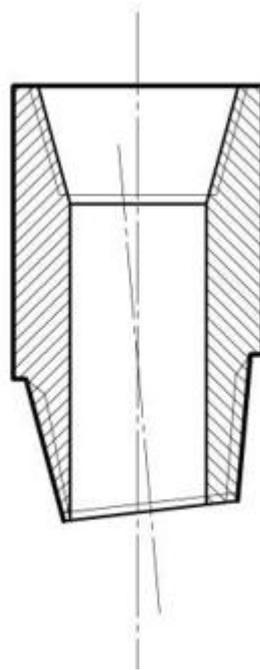


Рисунок 1.10 - Кривий перевідник

У процесі вдосконалення похило-направленого буріння було розроблено й широко застосовано гідравлічні вибійні двигуни (ГВД). Вони забезпечували можливість змінювати траєкторію безпосередньо у процесі буріння, що стало суттєвим проривом у техніці буріння.

Відомо два основних типи виконання ГВД:

1. Турбобур (турбінний двигун) – динамічний тип двигуна;
2. Гвинтовий вибійний двигун (об'ємний двигун).

Особливої популярності в середині ХХ ст. набуло буріння з використанням турбобурів, що дало змогу значно прискорити темпи розробки та видобутку нафти й газу.

Турбобур складається з таких основних елементів (рис. 1.11):

- Нерухомі частини: циліндричний корпус (основа), перевідник (для приєднання до бурильної колони), кільця п'яти, диск статора (для подачі промивної рідини), середня опора, ніпель.
- Обертові частини: диски ротора, п'яти, турбінний вал.

Принцип дії:

- У статорі промивна рідина змінює швидкість і напрямок потоку.
- У роторі, лопаті якого нахилені у протилежному напрямку, відбувається відновлення швидкості й зміна імпульсу потоку.
- При цьому виникає сила, яка діє на лопаті та формує загальний крутний момент.
- Реактивний момент у статорі сприймається корпусом турбобура (через бурильну колону), а активний момент передається через вал на долото.

Для буріння похилих свердловин часто застосовували спеціальні турбінні відхилювачі (ТО), що конструктивно виконувалися у вигляді з'єднання верхнього та нижнього вузлів через кривий перевідник, а вали з'єднувалися шарнірно.

- Пристрій забезпечував відхилення під кутом $1,5^{\circ}$ – 2° .
- Інтенсивність викривлення стовбура досягала $3^{\circ}/10$ м.

Завдяки таким рішенням бурильники змогли точніше контролювати траєкторію свердловини, зменшити ризик аварій та підвищити ефективність розкриття продуктивних горизонтів.

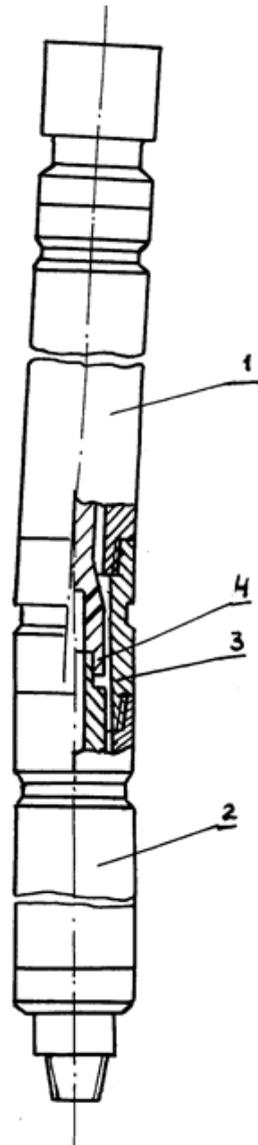


Рисунок 1.11 - Турбінний відхилювач

1 – турбінна секція; 2 – шпindelь; 3 – кривий перевідник; 4 – кулачковий шарнір.

Основні переваги буріння з турбінним відхилювачем (рис. 1.12):

1. Вплив коливань осьового навантаження на величину відхиляючої сили на долоті є незначним, завдяки чому фактичний радіус викривлення стовбура наближений до розрахункового.

2. Кривий перевідник розташований безпосередньо біля долота, що підвищує ефективність роботи відхилювача.

Конструктивні особливості:

- Турбінні відхилювачі відзначалися високою частотою обертання, що було особливо ефективним при бурінні в м'яких породах та на невеликих глибинах.

- Зі збільшенням глибин та твердості порід продуктивність зменшувалася: середня прохідка за рейс становила близько 100 м, а граничні тиски насосів і момент на долоті не дозволяли продовжувати ефективну розробку родовищ.

- Унаслідок цього турбінні відхилювачі поступово почали замінюватися низькообертковими двигунами, які забезпечували вищий крутний момент і кращу ефективність у твердих породах.

Призначення: шпindelь-відхилювач застосовується під час буріння похило-спрямованих свердловин секційним турбобуром або гвинтовим вибійним двигуном у зонах викривлення стовбура.

Конструкція:

- Складається з двох шпindelів однакового розміру, вали яких з'єднані взаємозамінними кулачковими напівмуфтами.

- Таке з'єднання дозволяє зменшити навантаження на вузли та збільшити їх довговічність у порівнянні з турбобуром майже вдвічі.

- Корпуси шпindelів з'єднуються двонипельним перевідником із приєднувальними різьбами, що перетинаються: у верхнього ніпеля – під кутом $1,5^\circ$, у нижнього – під кутом 2° .

- Верхня частина має уніфікований вузол для приєднання до турбобура будь-якої конструкції (від 1 до 5 секцій).

Переваги шпindelь-відхилювачів:

- Мала відстань між долотом і точкою перекошу знижує деформацію стовбура в цій зоні та підвищує інтенсивність викривлення.

- Можливість секційного виконання дає змогу збільшувати обертовий момент і потужність на валу турбобура.

- При зменшенні витрати промивної рідини знижується кількість обертів долота, що дозволяє гнучко регулювати режим буріння.

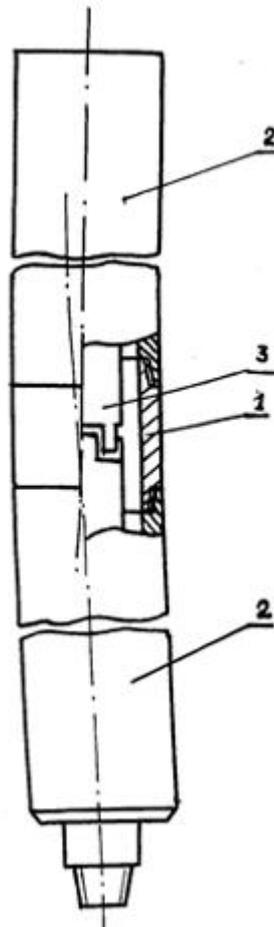


Рисунок 1.12 - Шпіндель -відхилювач

1 - кривий перевідник; 2 - роз'ємний корпус; 3 - кулачковий шарнір.

У 1960-х рр. технології буріння розвивалися дуже швидко, і широкого застосування набули гвинтові вибійні двигуни (ГВД), які стали основним інструментом для орієнтованої зміни траєкторії похилих свердловин.

Переваги ГВД:

- Збільшення частоти обертання долота з одночасним зниженням навантаження на нього.
- Підвищення механічної швидкості проходки (МСП).
- Зниження зношування бурового обладнання та втоми металу.

Основні робочі параметри ГВД [10]:

1. Витрата – діапазон об'ємної подачі промивної рідини.
2. Частота обертання долота – залежить від витрати промивної рідини (мінімальна – при найменшій витраті, максимальна – при найбільшій).

3. Максимальний перепад тиску – значення, допустиме при короткочасних перевантаженнях, що впливає на знос гвинтової пари.

4. Максимальний крутний момент – момент на долоті при максимальному перепаді тиску.

5. Холостий тиск – тиск, необхідний для подолання внутрішнього тертя й втрат у двигуні.

6. Робочий перепад тиску – різниця тисків під час штатної роботи над вибоєм і на вибої.

7. Робочий момент – крутний момент при робочому перепаді тиску.

8. Вихідна потужність – механічна потужність при номінальному перепаді тиску та максимальній витраті.

Конструкція ГВД:

- силова секція двигуна;
- вузол переливного клапана (або зворотного клапана);
- вузол з'єднання вала двигуна зі шпинделем;
- шпиндельна секція (підшипники та приводний вал).

Принцип роботи:

Потік промивної рідини, що надходить через бурильну колону, спрямовується в силову секцію, де обертає ротор усередині статора. Ротор передає крутний момент на долото, забезпечуючи його обертання без необхідності обертати всю бурильну колону. Це дозволяє бурити відповідно до заданої траєкторії.

Додаткові вузли:

- Переливний клапан – запобігає зашламовуванню двигуна і долота під час спуско-підйомних операцій, особливо при бурінні на депресії та в слабосцементованих породах (рис. 1.13).
- Зворотний клапан – запобігає зворотному руху рідини, засміченню двигуна та є важливим протифонтанним елементом (рис. 1.14).

При необхідності двигун може працювати без цих клапанів, використовуючи замість них простий перевідник із відповідними з'єднаннями.

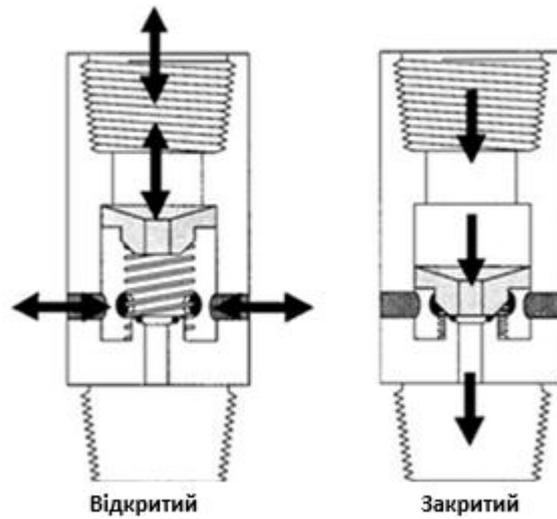


Рисунок 1.13 - Переливний клапан



Рисунок 1.14 - Зворотній клапан

Силовий агрегат гвинтового вибійного двигуна складається з ротора та статора, які утворюють так звану силову пару. Під дією тиску промивальної рідини ротор здійснює планетарний рух усередині статора (рис. 1.15). Особливість геометрії силової пари полягає у гелікоїдальному перетині каналів: кількість западин (каналів) може змінюватися від 2 до 10, при цьому ротор завжди має на один пелюсток менше. Таке конструктивне виконання забезпечує утворення герметичних камер по всій довжині силової секції, що дозволяє

ефективно перетворювати гідравлічну енергію потоку в механічну.

Швидкість обертання та крутний момент вихідного валу прямо пропорційні витраті бурового розчину й створюваному перепаду тиску. Змінюючи співвідношення кількості пелюстків ротора та статора, можна регулювати вихідні параметри двигуна. Чим вища західність (число заходів статора), тим більший крутний момент і менша частота обертання, і навпаки. При перевищенні допустимого перепаду тиску буровий розчин може прориватися між ротором і статором, що призводить до зниження моменту та швидкості, а при інтенсивних втратах промивної рідини – до «заклинювання» двигуна, тобто повної зупинки долота.

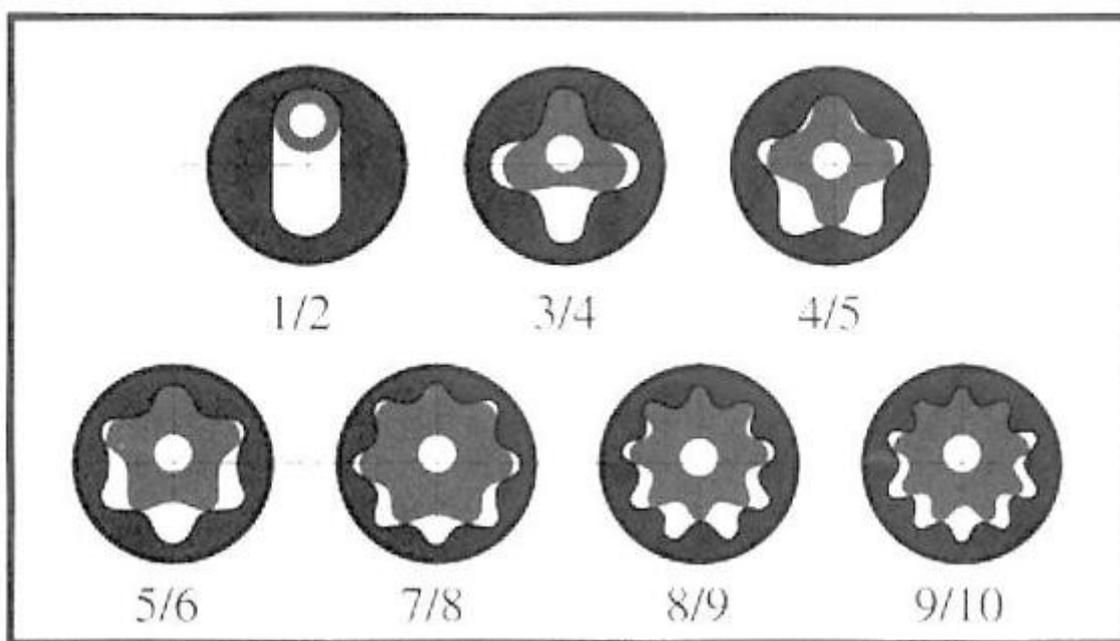


Рисунок 1.15 - Типи гелікоїдальних перерізів вибійного двигуна

Конструкція силової секції є універсальною та забезпечує роботу з різними типами промивальних середовищ: рідинами, флюїдами, стисненим повітрям чи піною, а також у широкому діапазоні температур. Це дозволяє підтримувати стабільні характеристики роботи двигуна в різних умовах експлуатації (рис. 1.16, рис. 1.17).



Рисунок 1.16 - Силова секція вибійного двигуна (статор/ротор)

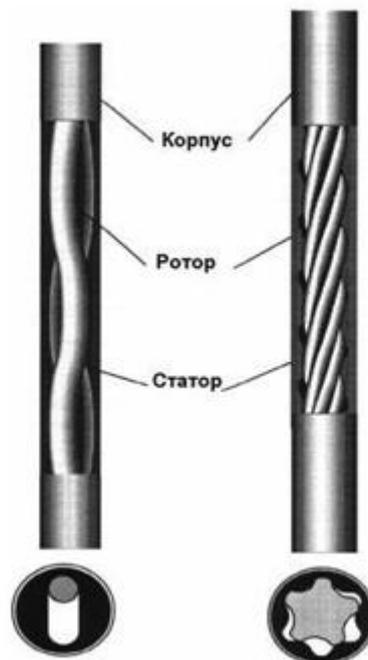


Рисунок 1.17 - Силова секція вибійного двигуна (статор/ротор)

Еластомерний статор виготовляють методом лиття під тиском із ретельним контролем однорідності матеріалу та точності профілю каналів. Ротор виробляють із високоміцних сталей на високоточних металообробних верстатах, після чого силову пару індивідуально підганяють, що забезпечує надійність та довговічність роботи навіть у складних умовах буріння [10].

Далі вихідний вал двигуна з'єднується зі шпindelною секцією за допомогою карданного або гнучкого валу, що гарантує співвісність обертання та

передачу осьового зусилля на породоруйнівний інструмент (ПРІ). Шпиндельна секція містить обмежувач потоку, набір радіально-упорних та опорних підшипників, а також приводний вал (рис. 1.18, рис. 1.19). Підшипники сприймають осьові та радіальні навантаження, працюють у середовищі бурового розчину, що одночасно виконує функції змащення та охолодження. Їхня працездатність зберігається до появи люфту в межах 5–10 мм.

Привідний вал передає на долото крутний момент і навантаження. У нижній його частині виконано різьбове з'єднання для кріплення ПРІ, що дозволяє надійно інтегрувати долото в систему.



Рисунок 1.18 - Шпиндельна секція в зборі

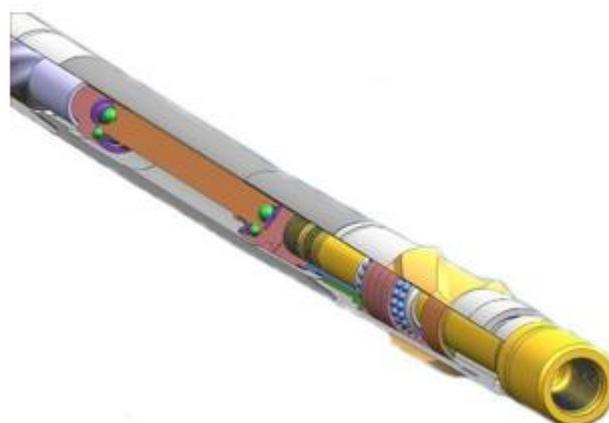


Рисунок 1.19 - Шпиндельна секція

Механізм, що з'єднує силову пару з приводним валом, виконує роль сполучної ланки між ними. У більшості конструкцій застосовують гнучкий вал, який являє собою металевий стрижень круглого перерізу з потовщеними кінцями та приєднувальними різьбленнями. Його використання забезпечує простоту конструкції, технологічність виготовлення та тривалий термін служби. Однак експлуатаційна надійність такого з'єднання істотно знижується при роботі з кутами перекосу понад $1,5^\circ$. У цих випадках замість гнучкого валу застосовують шарнірно-торсіонні сполуки, які краще працюють у складних умовах буріння (рис. 1.20).

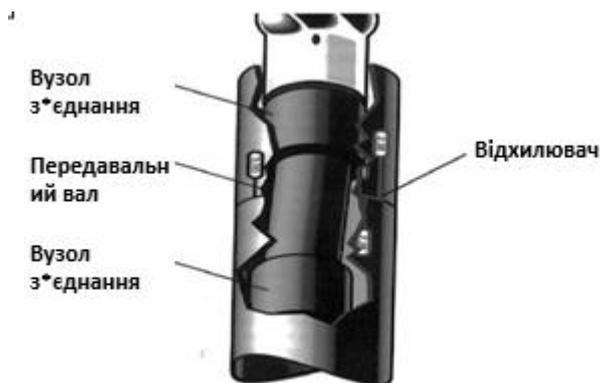


Рисунок 1. 20 - Торсіон вибійного двигуна

Для керованого буріння важливим елементом є регулятор кута перекосу, який дозволяє задавати відхилення траєкторії свердловини. Діапазон регулювання становить від 0° до 3° , що забезпечує інтенсивність викривлення стовбура на рівні $1-3^\circ/10$ м (рис. 1.21). Принцип його роботи полягає у повороті секцій відносно одна одної з можливим максимальним зміщенням до 180° від вихідного положення. Зміна кута виконується у кілька послідовних етапів: відвертають стопорну пробку спеціальним ключем, розкріплюють підтискну гайку, після чого зубчастий вінець виходить із зачеплення з перевідником. Далі шпіндельна секція повертається на потрібний кут, що фіксується за мітками на вінці, гайці та сердечнику. Після цього вінець знову заводять у зачеплення, а гайку надійно затягують механічними ключами. Для контролю правильності

положення перевіряють збіг міток, які повинні перебувати у межах 40–90°, що гарантує правильність виставленого кута. Завершальним етапом є закріплення стопорної пробки, яке запобігає самовільному зсуву положення під час буріння [6,10].



Рисунок 1.21 - Регулятор кута перекосу типу РУ1-195

1 – диск; 2 – півкільце; 3 – ущільнювальне гумове кільце; 4 – перевідник; 5 – зубчастий вінець; 6 – підтискна гайка; 7 – стопорна пробка; 8 - сердечник; 9 – мітки на зубчастому вінці; 10 – мітки на гайці; 11 - мітки на сердечнику.

Конструктивно регулятор складається з двох перевідників – верхнього та нижнього, сердечника й зубчастої муфти. Для підвищення зносостійкості робочі поверхні муфти армовані твердосплавними зубцями, що суттєво збільшує ресурс роботи обладнання навіть при бурінні у твердих породах. Загальний вигляд

регулятора подано на (рис. 1.22). Таким чином, комбінація сполучних механізмів (гнучких або торсіонних валів) зі шпindelною секцією та регулятором кута перекосу забезпечує не лише надійність роботи вибійного двигуна, а й можливість орієнтованого керування траєкторією свердловини з високою точністю.



Рисунок 1.22 - Загальний вигляд регулятора кута перекосу

При бурінні вертикальної ділянки або ділянки стабілізації використовується обертання всієї колони за допомогою ротора або верхнього силового приводу. Такий спосіб дозволяє істотно скоротити терміни будівництва свердловини, оскільки усувається потреба у додаткових підйомах для зміни КНБК. Основними перевагами застосування гвинтових вибійних двигунів є можливість контролю за інтенсивністю викривлення стовбура, забезпечення плавної кривизни траєкторії без різких перегинів і уступів, що сприяє

підвищенню стійкості стінок свердловини.

Аналіз конструкцій та особливостей гвинтових двигунів дозволяє виділити кілька основних типів: загального призначення, для відбору керна, для ремонтних робіт, а також для похило-спрямованого та горизонтального буріння. Застосування ГВД у компонованні низу бурильної колони (КНБК) стало типовим рішенням для всіх ділянок спрямованого буріння.

Подальший розвиток технологій призвів до створення роторних керованих систем (РКС), які забезпечують безперервне обертання як КНБК, так і всієї бурильної колони при одночасному русі за заданою траєкторією. Це рішення дозволило значно покращити очищення стовбура свердловини, мінімізувати ризики прихватів та забезпечити буріння довших інтервалів у порівнянні з ГВД. Перші промислові розробки таких систем з'явилися у 1990-х роках. Незважаючи на високу вартість, вони швидко знайшли застосування на свердловинах зі складними профілями, де традиційні гвинтові двигуни виявлялися недостатньо ефективними (рис. 1.23).

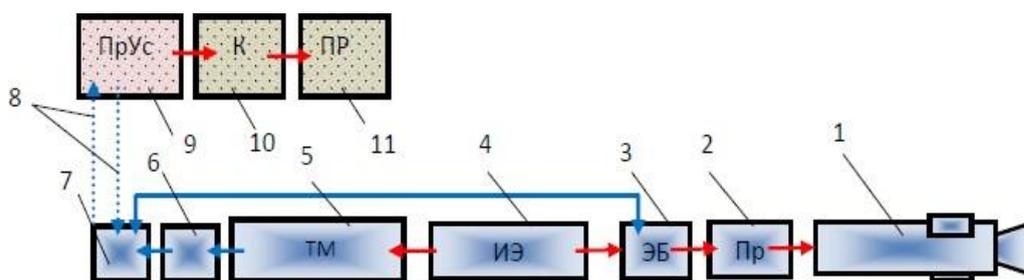


Рисунок 1.23 - Блок-схема вибійної відхиляючої системи

1 – механізм викривлення; 2 – приводний механізм викривлення; 3 – електронний блок управління приводом механізму викривлення; 4 – джерело електроенергії (тубіногенератор або акумуляторні батареї); 5 – блок телеметричної системи; 6 – електронний блок телеметрії; 7 – система перетворення сигналу; 8 – канал зв'язку (електромагнітний чи гідравлічний); 9 – приймальний пристрій та підсилювач сигналу; 10 – спеціальне програмне забезпечення (комп'ютер); 11 – прилад для візуального контролю процесу буріння на буровому

Маючи автономне джерело живлення (4), така система управляється з денною поверхні при допомозі спеціального програмного забезпечення (10).

Сигнал передається двосторонньо, шляхом електромагнітного або гідравлічного каналу зв'язку (8). Електронний блок (3) і приводні системи (2) механізму відхилення (1) орієнтують систему в заданому напрямі. При цьому блок телеметричної системи (5) здійснює постійне зчитування параметрів кривизни за допомогою електронного блоку (6) та системи перетворення сигналу (7). Відправляє координати на денну поверхню блок приймання і посилення сигналу (9), далі сигнал зчитується на спеціалізованому софті (10). Після цього проводиться коригування траєкторії стовбура свердловини оператором (11).

Ефективність працездатності РКС формулюється такими факторами:

1. Якість винесення шламу збільшується через відсутність звужених інтервалів стовбура;
2. Зменшується ризик диференційних і механічних прихватів, оскільки всі елементи свердловинного обладнання перебувають у постійному РКСі;
3. Збільшення швидкості буріння та довжини горизонтального стовбура через зменшення впливу сили тертя між стінками свердловини та бурильною колоною, внаслідок постійного обертання БК;
4. Збільшення швидкості механічної проходки, тому що шлам не осаджується через його ефективного винесення.

Згідно з авторами [10,19], РКС можна класифікувати за способом управління зсувом долота:

1. «Push the bit» - відштовхування від стінки свердловини всієї компонування або більшої частини відносно осі, що викликає тиск на бічну поверхню долота в певному напрямку. До цього типу можна віднести системи AutoTrak компанії Baker Hughes INTEQ і PowerDrive компанії Schlumberger.

Роторні керовані системи такого типу складаються з нерухомого (не обертового) базового блоку, блоку контролю за процесом буріння і модуля телесистеми MWD. Базовий блок є напрямні лопаті, розподільчий клапан і навігаційні сенсори. Блок контролю - Це внутрішньосвердловини і автономне джерело живлення (літєві батареї, або турбінний генератор). При

безпосередньому бурінні внутрішньоскважинний комп'ютер аналізує дані з модуля MWD з проектними значеннями. У разі виникнення відхилень від проектної траєкторії, комп'ютер при допомоги сенсорів навігації перекладає інформацію в розподільчий клапан, який направляє гідродинамічну енергію бурової промивної рідини на напрямні лопаті, далі ті висуваються з корпусу. В результаті відбувається коригування траєкторії шляхом відштовхування компонування від свердловини стінки в заданому напрямку.

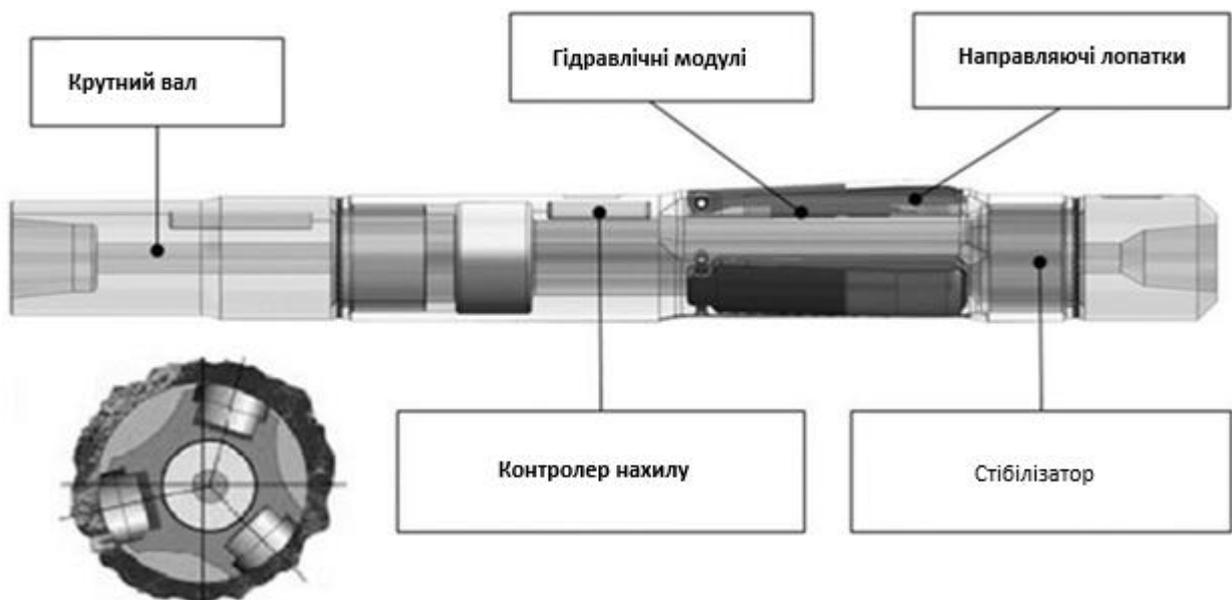


Рисунок 1.24 - «Push the Bit»

Привід лопаток (1) гідралічний, який здійснюється за рахунок послідовної подачі бурового розчину у відповідні гідрокамери. Для збільшення кута відхилення кожна лопатка (1), провертаючись і перебуваючи в нижній частині ствола, натискає на нижню сторону ствола, а для зменшення кута кожна лопатка (1) натискає на верхню частину ствола. Команди, що направляються за допомогою телеметрії гідромоніторним і електромагнітним каналами зв'язку, визначають час і силу спрацьовування черевика (1). Блок управління (3), розташований над блоком відхилення (5), приводить у дію поворотну заслінку (6), яка закриває або відкриває канал для подачі бурового розчину камери з лопатками (1) відповідно до повороту бурильної колони. Система синхронно

змінює інтервал впливу та зусилля, з яким лопатка (1) впливає на стінку свердловини, тим самим спрямовуючи долото (4) в необхідному напрямі. Долото (4) забезпечує відхилення ствола фрезеруванням стінки свердловини бічним озброєнням. Отже, значна роль процесі викривлення даним типом РКС відводиться долоту, що має відповідати певним вимогам.

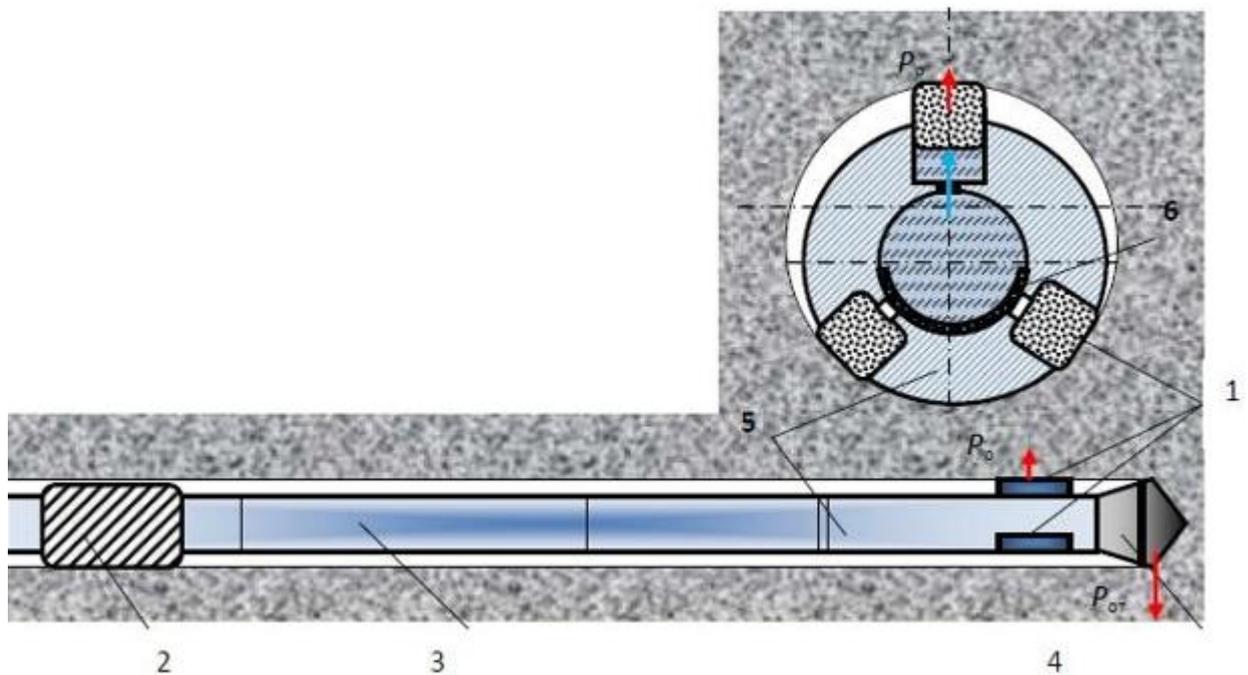


Рисунок 1.25 - Схема роторній керованою системи з відхиленням долота
1 – висувні лопатки; 2 – стабілізатор; 3 – блок управління; 5 – блок відхилення; 4 – долото; 6 – засувка.

2. "Point the bit" - позиціонування долота. Досягається усуненням приводного валу щодо компонування, або зміною його кривизни, що викликає зміну кута. До цього типу можна віднести: "Geo-Pilot" компанії Halliburton Sperry Drilling Services, "Well-Guide" компанії Gyrodata Western Hemisphere. Також до point the bit можна віднести систему Dart компанії Andergauge Drilling System.

Дані системи - це наддолотний стабілізатор, обладнаний апаратурою, зібраний з трьох елементів: обтяжений корпус, що не обертається, приводний вал (кручена мандрель) і ексцентрикова внутрішня втулка. Принцип роботи полягає в відхиленні долота в заданому напрямі, шляхом контролю над

напрямом ексцентрикової внутрішньої втулки, що зміщує приводний вал. Положення корпусу в режимі реального часу контролюється комп'ютером, який керує системою та автоматично коригує становище ексцентрикової внутрішньої втулки за допомогою двигуна постійного струму з надвисоким моментом, що крутить (працюючим від турбінного генератора або літєвих батарей), для збереження орієнтації долота.

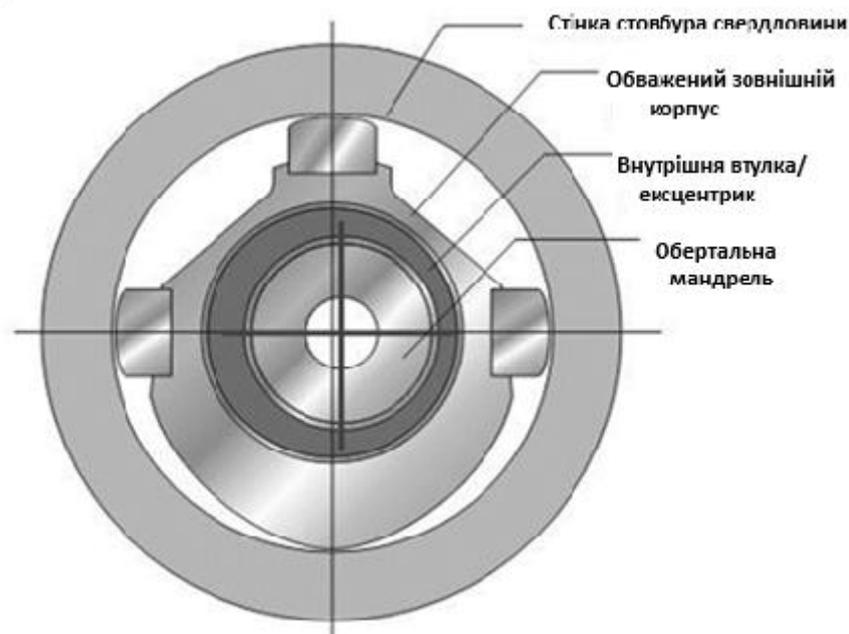


Рисунок 1.26 - «Point the Bit»

Схеми роботи РКС з позиціонуванням долота: а - положення системи, що визначає прямолінійний напрямок буріння; б, в – положення системи, що визначає зміну напрямку буріння; 1 – ексцентрикова втулка; 2 – корпус-статор; 3 – вал-ротор; 4 – висувні плашки; 5 – долото; 6 – напрямок викривлення свердловини; 7 - схема РКС при прямолінійному бурінні; 8, 9 - схеми РКС при зміні.

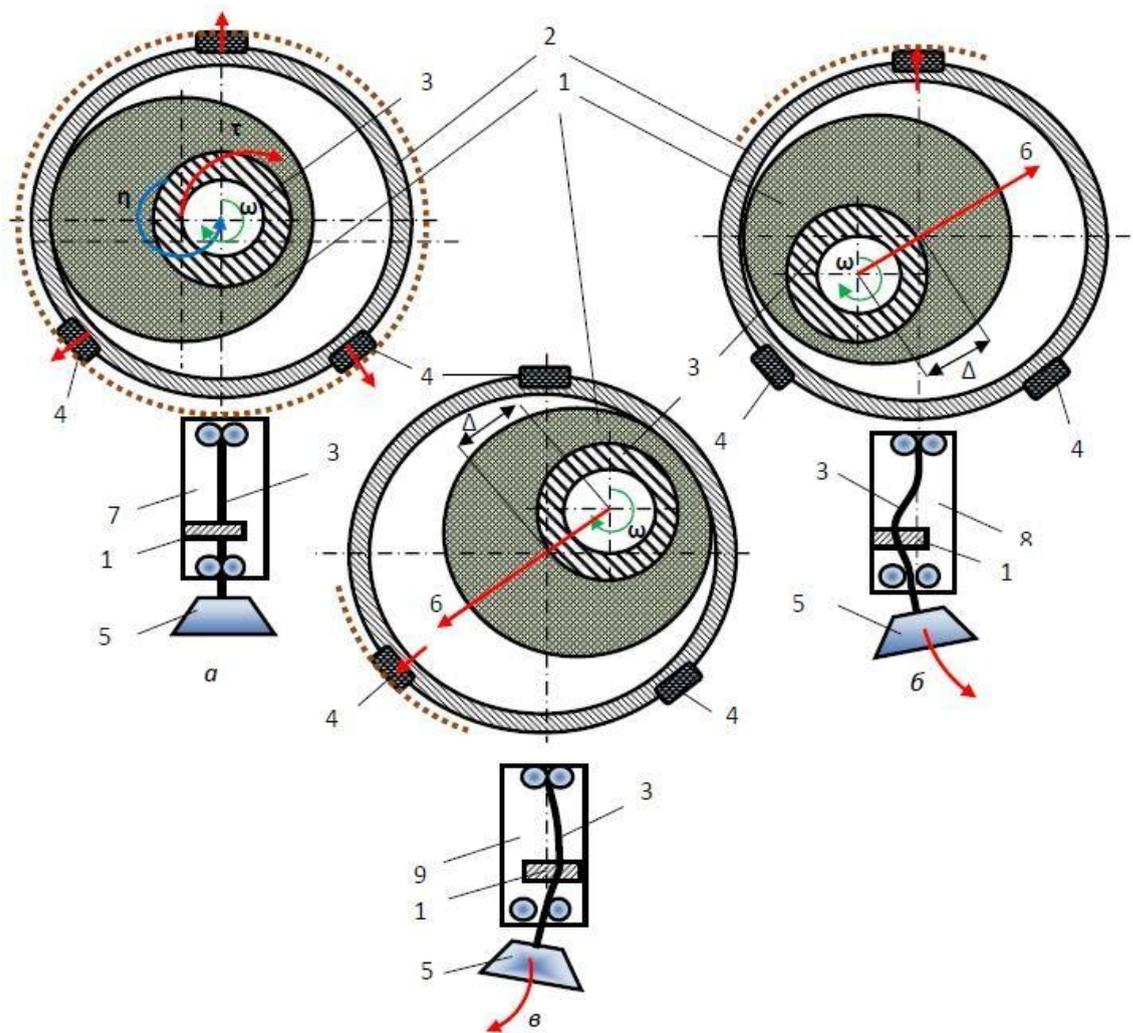


Рисунок 1.27 - Схеми роботи РКС з позиціонуванням долота

а - положення системи, що визначає прямолінійний напрямок буріння; б, в - положення системи, що визначає зміну напряму буріння; 1 – ексцентрикова втулка; 2 – корпус-статор; 3 – вал-ротор; 4 – висувні плашки; 5 - долото; 6 – напрямок викривлення свердловини; 7 – схема РКС при прямолінійному бурінні; 8, 9 - схеми РКС при зміні

Роторна керована система (РКС) фіксується у свердловині шляхом висунення плашок (4), які забезпечують надійну стабілізацію інструменту в стовбурі. Ключовим елементом конструкції є ексцентрикова втулка (1), положення якої регулюється сервомеханізмом. Його робота контролюється електронним блоком, що отримує сигнали від поверхневого комп'ютера. При обертанні втулки відбувається зміщення осі валу-ротора (3) відносно центральної осі корпусу (2) на величину зазору Δ . Це зумовлює перекіс долота (5) у вибрану сторону, внаслідок чого формується необхідне викривлення

траєкторії свердловини.

У випадку буріння без викривлення (схема а) ексцентрикова втулка (1) встановлена таким чином, що її внутрішній отвір співвісний корпусу (2), а вал (3) і долото (5) не мають перекосу ($\Delta=0$). При зміні положення втулки (схеми б, в) відбувається вигин валу (3), що забезпечує відхилення долота (5) і коригування напрямку буріння відповідно до вибраної програми (позиція б). Така система дає змогу здійснювати плавне та контрольоване викривлення стовбура свердловини без додаткових підйомів і заміни КНБК.

До основних переваг застосування РКС належать: отримання якісного стовбура без різких перегинів і уступів; можливість ефективного буріння в ускладнених геологічних умовах; формування стабільної, менш звивистої траєкторії; забезпечення протяжних горизонтальних ділянок довжиною понад 10 км; зниження ризику аварій і прихватів завдяки безперервному обертанню бурильної колони. Додатковими позитивними факторами є підвищення швидкості механічної проходки за рахунок зменшення сил тертя та кращого очищення вибою від шламу, а також можливість дистанційного керування траєкторією свердловини в режимі реального часу.

1.5 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження

1. Історичний розвиток похило-спрямованого буріння пройшов шлях від простих механічних пристроїв, таких як "буровий клин" 1912 року, до складних електронних систем. Ключовими етапами стали поява турбобурів у 1930-40-х роках з інтенсивністю викривлення до $1,5^\circ/10$ м, розвиток гвинтових двигунів у 1960-х та впровадження роторних керованих систем у 1990-х, що дозволило здійснювати безперервний контроль траєкторії.

2. Сучасна класифікація похило-направленого свердловин охоплює різноманітні профілі - від простих похило-направлених до складних багатовибійних систем, що дозволяють оптимально враховувати геологічні умови та максимізувати ефективність розробки родовищ. Вибір конкретного

профілю ґрунтується на комплексному аналізі природного викривлення, властивостей порід та технічних можливостей обладнання для мінімізації ризиків і витрат.

3. Сучасний контроль траєкторії свердловини забезпечується складними телеметричними системами, що використовують різні канали зв'язку - гідравлічний, електромагнітний та електропровідний. Кожен метод має свої переваги: гідравлічний відрізняється простотою та дальністю дії, електромагнітний менш вимогливий до якості розчину, а електропровідний забезпечує найвищу швидкість передачі даних.

4. Технічні засоби похило-направленого буріння еволюціонували від простих механічних відхилювачів до складних систем керованого буріння. Сьогодні перевага надається методам з використанням вибійних двигунів та роторних керованих систем, які забезпечують безперервне викривлення та точне утримання траєкторії на протяжних інтервалах, що є ключовим для ефективного розкриття продуктивних пластів.

5. Прогрес у технологіях буріння призвів до розвитку гідравлічних вибійних двигунів, зокрема турбінних відхилювачів, які забезпечували інтенсивність викривлення до $3^{\circ}/10$ м. Ці системи, що поєднували криві перевідники з турбінними секціями, дозволили значно підвищити точність контролю траєкторії та ефективність розкриття продуктивних горизонтів, особливо в м'яких породах на невеликих глибинах.

6. Поява гвинтових вибійних двигунів (ГВД) у 1960-х роках стала революційним кроком, оскільки вони забезпечили збільшення механічної швидкості проходки та гнучкість у керуванні траєкторією за рахунок обертання лише долота без необхідності обертання всієї бурильної колони. Конструкція ГВД, що включала переливні та зворотні клапани, значно підвищила надійність та безпеку процесу буріння, особливо при роботі в складних геологічних умовах.

7. Роторні керовані системи (РКС) представляють революційний підхід, поєднуючи безперервне обертання бурильної колони з точним контролем траєкторії через два основні принципи дії: "Push the Bit" (відштовхування від

стілки свердловини) та "Point the Bit" (позиціонування долота). Ця технологія забезпечує якісний стовбур без різких перегинів, зменшує ризик прихватів і дозволяє бурити горизонтальні ділянки довжиною понад 10 км, що робить її незамінною для складних свердловин.

Метою роботи є порівняння технологій похило-направленого буріння з використанням гвинтових вибійних двигунів та роторних керованих систем для обґрунтування оптимального вибору обладнання при спорудженні свердловин із складними профілями.

Задачі дослідження:

- Проаналізувати історичний розвиток та сучасний стан технічних засобів похило-направленого буріння.
- Провести порівняльний аналіз технологічних характеристик ГВД та РКС за критеріями інтенсивності викривлення, швидкості проходки, якості стовбура, впливу бурового розчину та точності контролю траєкторії.
- Оцінити економічну ефективність застосування ГВД та РКС.
- Розробити техніко-економічне обґрунтування вибору обладнання для конкретних геологічних умов родовища.

РОЗДІЛ 2 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПОХИЛО-НАПРАВЛЕНОГО БУРІННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РІЗНИХ СИСТЕМ

2.1 Порівняння ГВД і РКС при похило-направленому бурінні

Застосування похило-направленого буріння з використанням гвинтових вибійних двигунів (ГВД) історично стало важливим етапом розвитку технологій у бурінні нафтових і газових свердловин. Використання ГВД виявилось достатньо ефективним з економічної точки зору, особливо на початкових етапах їх упровадження, коли основним завданням було забезпечення можливості відхилення стовбура від вертикалі. Проте практика експлуатації виявила низку істотних технологічних і технічних ускладнень, які призводять до значних часових та фінансових втрат.

Найбільш поширеними проблемами при використанні ГВД є нерівномірне руйнування гірських порід, що знижує якість стовбура свердловини та ускладнює процес подальшого спуску обсадних колон. Крім того, при бурінні протяжних горизонтальних ділянок і в зонах з великими зенітними кутами зростає ризик прихватів бурильної колони. Додатково слід враховувати вплив бурового розчину на робочі параметри двигуна, що ускладнює процес підтримання стабільних умов буріння.

Роторні керовані системи (РКС), на відміну від ГВД, усувають низку зазначених обмежень. Вони працюють без режиму слайдування, що забезпечує постійне обертання бурильної колони та запобігає прояву «баклінг-ефекту». Завдяки цьому підвищується стабільність траєкторії та якість стовбура свердловини. Суттєвою перевагою РКС є можливість безперервного автоматичного зняття вимірів, що дозволяє в режимі реального часу контролювати параметри кривизни та коригувати напрямок буріння. Це забезпечує високу точність управління траєкторією та можливість досягнення більших відходів свердловини від гирла, що є особливо актуальним при спорудженні горизонтальних та багатовідвідних свердловин.

Незважаючи на вищу вартість обладнання та складність обслуговування, РКС поступово витісняють ГВД з ринку та займають провідні позиції у сфері похило-спрямованого буріння. Це пояснюється значно кращими техніко-економічними показниками, що підтверджується порівняльним аналізом їх характеристик (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Порівняння характеристик ГВД і РКС

Критерії	ГВД	РКС
1. Набір параметрів кривизни	3,5-6 град/10м	до 15 град/10м
2. Зняття вимірів	Статичне / не постійне	Автоматичне / безперервне
3. Вплив бурового розчину	так	ні
4. Середня швидкість проходки	25	79
5. Якість ствола свердловини	низька	висока
6. Відхід свердловини від гирла	~ 2000м	~ 4000 м
7. Економічна вигода	Залежить від свердловини	Залежить від свердловини

2.2 Аналіз набору параметрів кривизни

Вибір конкретного обладнання – гвинтового вибійного двигуна (ГВД) чи роторної керованої системи (РКС) – при бурінні похило-скерованих свердловин визначає можливість змінювати параметри кривизни траєкторії.

Застосування великих кутів перекосу секції ГВД, що відхиляє, забезпечує більш інтенсивний набір параметрів кривизни. Однак це накладає певні обмеження на частоту обертання бурильної колони, що може впливати на ефективність процесу.

На практиці, за даними різних виробників, при використанні максимального кута перекосу $2-3^{\circ}$ досягається інтенсивність викривлення стовбура свердловини на рівні $3,5-6^{\circ}/10$ м. Водночас майже у всіх модифікацій ГВД існують обмеження на режим обертання, що знижує гнучкість у керуванні траєкторією.

Для зміни кутових характеристик під час роботи з ГВД застосовують вибійні інклінометричні системи, які дозволяють у режимі реального часу

контролювати zenітний та азимутальний кути. Корекція траєкторії виконується шляхом зупинки обертання бурильної колони і виконання слайдування у заданому напрямку.

Основним недоліком використання ГВД є неможливість зміни кута перекосу під час буріння без підйому компоновання на поверхню. Це значно знижує оперативність керування траєкторією.

На відміну від ГВД, при застосуванні роторних керованих систем коригування стовбура свердловини здійснюється при безперервному обертанні бурильної колони. Це дозволяє змінювати кут перекосу без зупинки процесу буріння та забезпечує більш високу точність керування траєкторією.

Максимальна інтенсивність викривлення стовбура при використанні РКС становить $6\text{--}15^\circ/10$ м, що залежить від конкретного типу та конструктивних особливостей системи (табл. 2.2).

Порівняльний висновок

- ГВД забезпечує меншу інтенсивність викривлення (до $6^\circ/10$ м), але вимагає зупинок та підйомів для зміни кута перекосу.
- РКС дозволяє працювати безперервно з більшою інтенсивністю викривлення (до $15^\circ/10$ м) та оперативним керуванням траєкторією.
- Таким чином, РКС значно ефективніші для буріння довгих горизонтальних ділянок та свердловин складної конфігурації, тоді як ГВД залишаються доцільними у менш складних умовах або при обмеженому бюджеті.

Таблиця 2.2 - Показники набору параметрів кривизни на досліджуваному родовищі

Параметр	РКС	ГВД
Максимальна планова інтенсивність, град/10м	2,0	2,0
Максимальна фактична інтенсивність, град/10м	4,48	4,02
Середня фактична інтенсивність, град/10м	1,87	1,94
Довжина горизонтального ствола, м	583	387

Таким чином, використання РКС дозволяє бурити свердловини з

високими. просторовими інтенсивностями без незапланованих СПО та збільшеною порівняно з ГВД механічною швидкістю проходки, що призводить до значного скорочення термінів буріння.

В основному, при проектуванні свердловин спочатку закладається максимальна інтенсивність викривлення, яка становить 1,5-2 град/10 м, що дозволяє застосовувати обидва типи обладнання з однаковим ефективністю.

2.3 Контроль та зняття інклінометричних вимірів

Інклінометрія кутових параметрів у процесі буріння є одним із ключових елементів контролю траєкторії свердловини. Визначення фактичного положення стовбура в просторі дозволяє своєчасно коригувати технологію буріння, уникати значних відхилень від проєктної траєкторії та забезпечувати якість профілю свердловини.

При бурінні секцій із застосуванням гвинтових вибійних двигунів (ГВД) зняття вимірів здійснюється за допомогою вибійних інклінометричних систем, інтегрованих у компоновку низу бурильної колони. Середній час передачі даних становить 70–90 секунд, що забезпечує оперативний контроль за зміною параметрів траєкторії.

Контрольні телеметричні виміри виконуються після пробуреного інтервалу перед нарощуванням бурильного інструменту. Отримання даних можливе як перед виконанням операції нарощування, так і безпосередньо після неї. У зонах інтенсивного набору параметрів кривизни контрольні телеметричні виміри здійснюють у вибраних точках відповідно до оперативної обстановки та геологічних особливостей.

Порядок отримання даних перед нарощуванням бурильного інструменту включає такі етапи:

1. перед виконанням контрольного виміру інструмент проходить увесь пробурений інтервал;

2. після розходжування та очищення долото фіксується на відстані 1–4 м над вибоєм при ввімкнених бурових насосах; інструмент утримується у нерухомому положенні до моменту стабілізації показань;

3. здійснюється вимкнення бурових насосів на період не менше ніж 40 секунд, при цьому інструмент залишається нерухомим;

4. після паузи проводиться повторне вмикання насосів із заданою витратою промивальної рідини для формування якісного гідравлічного сигналу; одночасно запускається обертання ротора або верхнього приводу без поступального руху;

5. після отримання повної або мінімально необхідної послідовності даних телеметрії виконується нарощування бурильного інструменту.

Основним недоліком застосування даного методу є необхідність періодичних зупинок буріння для проведення замірів, що впливає на загальну механічну швидкість проходки.

На відміну від ГВД, роторні керовані системи (РКС) обладнані триосьовими системами датчиків, які безперервно реєструють відхилення від заданої траєкторії в процесі обертального буріння. У разі відхилення РКС автоматично визначає необхідний напрямок корекції та формує відповідний сигнал для стабілізації положення.

Дані про просторове положення КНБК на вибої постійно передаються на денну поверхню у режимі реального часу, що дозволяє уникати зупинок для зняття вимірів та забезпечує більш високу ефективність буріння. Це особливо важливо при бурінні протяжних горизонтальних та багатовідхилених свердловин, де точність і оперативність контролю відіграють вирішальну роль.

2.4 Аналіз впливу бурового розчину на роботу систем

Робочі характеристики бурового розчину мають безпосередній вплив на ефективність і довговічність свердловинного обладнання, зокрема гвинтових вибійних двигунів (ГВД) та роторних керованих систем (РКС). Правильний

вибір складу і параметрів бурової промивної рідини є ключовим фактором забезпечення стабільного функціонування систем керування траєкторією свердловини.

Гвинтові вибійні двигуни експлуатуються в умовах жорстких обмежень щодо властивостей бурових розчинів. Допустимі параметри включають:

- густина бурового розчину – не більше 2000 кг/м³;
- допустимі типи рідин – аеровані розчини, піни, розчини на водній або гідрофобній основі;
- вміст піску – до 1 % за масою;
- граничний розмір твердих частинок – до 1 мм;
- максимальна робоча температура на вибої – до 103 °С.

Відхилення від цих параметрів може призвести до інтенсивного абразивного зношування статора та ротора, підвищення гідравлічного опору та зниження ККД двигуна. Особливо критичним є надлишковий вміст твердих частинок, який спричиняє ерозію еластомерних елементів та значно скорочує термін служби ГВД.

На відміну від ГВД, роторні керовані системи є менш залежними від властивостей бурових розчинів. Конструктивні особливості РКС дозволяють використовувати практично будь-який тип промивальної рідини, придатної для конкретних гірничо-геологічних умов. Завдяки відсутності еластомерних елементів, що безпосередньо контактують із розчином, РКС демонструють вищу стійкість до впливу абразивних частинок і стабільно працюють у широкому діапазоні густин та температур бурових рідин.

Ця універсальність є важливою перевагою при бурінні в складних геологічних умовах, де параметри бурового розчину часто змінюються, а його склад вимагає оперативного коригування (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз впливу бурового розчину на роботу систем

Параметр	Гвинтові вибійні двигуни (ГВД)	Роторні керовані системи (РКС)
Густина розчину	$\leq 2000 \text{ кг/м}^3$	Практично без обмежень (у межах, придатних для конкретних геол. умов)
Типи бурових рідин	Вода, аеровані розчини, піни	Будь-які, що відповідають умовам буріння
Вміст піску	$\leq 1 \%$ за масою	Не є критичним фактором
Розмір твердих частинок	$\leq 1 \text{ мм}$	Допустимий широкий діапазон
Максимальна температура	До $103 \text{ }^\circ\text{C}$	Значно вищий робочий діапазон
Стійкість до абразивного зносу	Низька (чутливість до частинок)	Висока (відсутність еластомерів у критичних вузлах)
Залежність від параметрів рідини	Висока	Низька

2.5 Порівняння середньої швидкості проходки при бурінні похило-направлених свердловин з використанням ГВД та РКС

Порівняльний аналіз показує, що використання роторних керованих систем (РКС) під час похило-направленого буріння забезпечує суттєве збільшення механічної швидкості проходки (МШП) порівняно з гвинтовими вибійними двигунами (ГВД). Так, на нафтогазоконденсатному родовищі середня швидкість проходки на чотирьох свердловинах, виконаних із застосуванням РКС, становила близько 16 м/год, що вдвічі перевищує показники при використанні ГВД [14]. Це зростання МШП дозволяє скоротити загальний цикл будівництва свердловин із горизонтальним закінченням приблизно на три доби.

Приклад ефективного застосування РКС зафіксовано у 2014 році, коли було пробурено свердловину із секцією під експлуатаційну колону довжиною 2500 м. Завдяки впровадженню роторної керованої системи механічна швидкість проходки збільшилася на 21 % у порівнянні з аналогічними ділянками, виконаними за допомогою ГВД [17] (рис. 2.1).

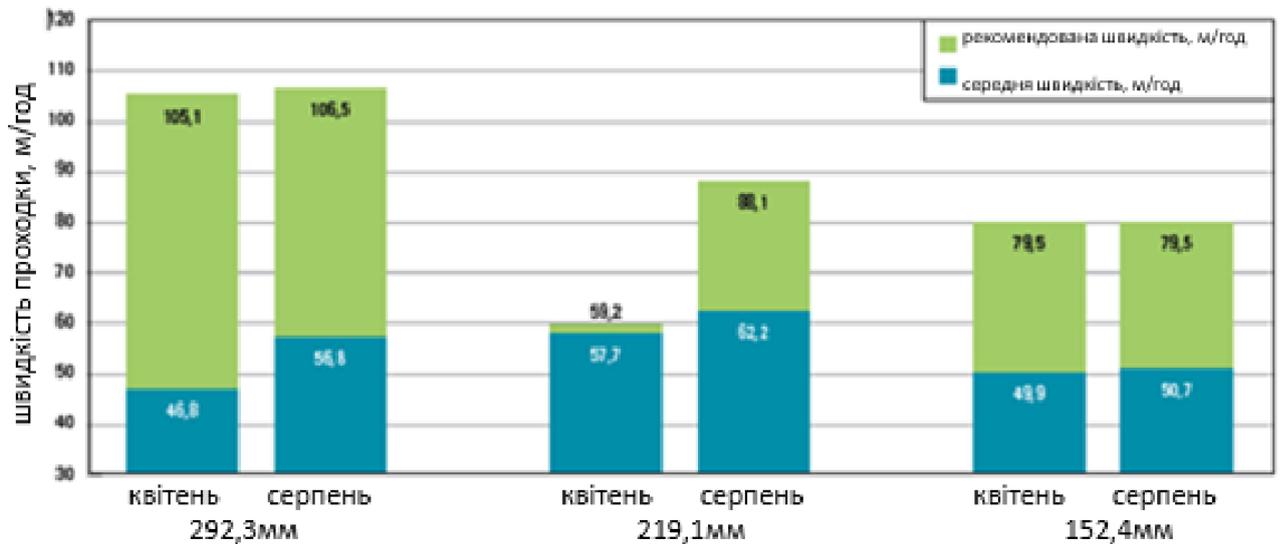


Рисунок 2.1 - Графік швидкості проходки РКС

У випадку використання ГВД вітчизняного виробництва, дослідно-промислові роботи на експлуатаційних свердловинах показали МШП у межах 23–26 м/год, що перевищувало планові показники в середньому на 17 %. Слід зазначити, що режим комбінованого буріння «слайд/ротатор» значною мірою впливає на механічну швидкість проходки, оскільки в режимі «слайд» бурильна колона обмежена у обертанні, що знижує МШП, а режим «ротатор» дозволяє повне обертання, підвищуючи ефективність буріння (рис. 2.2).

Таким чином, застосування РКС забезпечує не лише збільшення МШП, а й покращує якість ствола свердловини та оптимізує час виконання робіт на довгих похило-направлених ділянках.

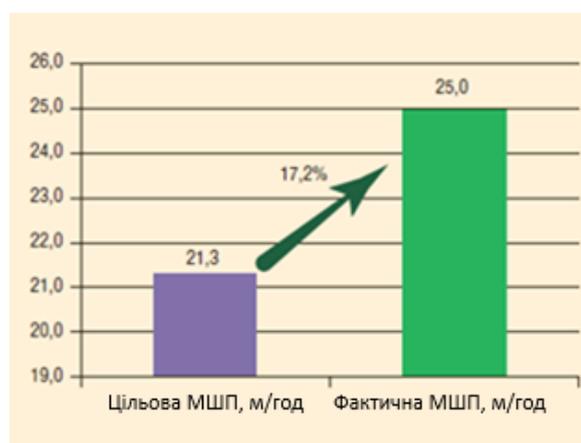


Рисунок 2.2 - Графік швидкості проходки ГВД

2.6 Оцінка геометричної однорідності та якісних характеристик стовбура свердловини при використанні ГВД і РКС

Геометрична однорідність стовбура свердловини є ключовим критерієм ефективності технології похило-направленого буріння та безпеки подальших операцій, таких як спуск обсадних колон і проведення закладних робіт. При використанні гвинтових вибійних двигунів (ГВД) спостерігається значна нерівномірність профілю стовбура: хвилеподібні форми, локальні мікрокаверни та різкі перегини. Такі дефекти утворюються через нерівномірне руйнування гірської породи та зміну діаметра свердловини під час чергування обертального та спрямованого режимів буріння. В умовах роботи ГВД відсутнє постійне обертання бурильної колони, що спричинює контакт її стінок із стінками свердловини. Як наслідок, циркуляція бурового розчину погіршується, ефективність винесення шламу знижується, а стовбур стає більш нерівномірним.

Буріння з використанням роторних керованих систем (РКС) дозволяє підтримувати постійне обертання бурильної колони під час роботи. Це забезпечує рівномірне руйнування породи, зменшує ймовірність утворення каверн і локальних перегинів, підвищує однорідність стовбура та якість його профілю. Постійне обертання також сприяє більш ефективній циркуляції бурового розчину, оптимальному винесенню шламу на поверхню та стабілізації гідродинамічних умов у свердловині.

Порівняння даних, отриманих за допомогою кавернометрії, демонструє суттєву різницю між технологіями: стовбур свердловини, пробурений ГВД, характеризується хвилеподібними нерівностями та локальними кавернами, тоді як свердловина, пробурена РКС, має більш плавний, рівномірний та технологічно придатний профіль (рис. 2.3). Таким чином, застосування РКС дозволяє підвищити технологічну надійність буріння, знизити ризик аварійних ситуацій і забезпечити умови для більш довготривалих горизонтальних ділянок свердловини..



Рисунок 2.3 - Якість ствола свердловини, збудованого по даними каверномірів: зверху - ГВД, знизу – РКС

2.7 Вплив технології буріння на відхилення свердловини від гирла

Вибір технології похило-направленого буріння суттєво впливає на відхилення кінцевої точки свердловини від гирла. Перевагу в цьому аспекті мають роторні керовані системи (РКС), оскільки їх конструктивні особливості забезпечують постійне обертання бурильної колони, стабільну механічну швидкість проходки та рівномірну геометрію стовбура свердловини. Завдяки цим факторам РКС дозволяють пробурювати більш протяжні горизонтальні ділянки, а середнє відхилення кінцевої точки від гирла під час їх використання досягає близько 4000 м, що істотно перевищує можливості гвинтових вибійних двигунів (ГВД).

Буріння довгих горизонтальних ділянок із використанням ГВД характеризується підвищеною трудомісткістю та складністю контролю траєкторії. В умовах роботи ГВД бурильна колона не обертається, а буровий розчин перебуває у практично статичному стані. Це знижує ефективність винесення бурового шламу на поверхню, що призводить до його накопичення навколо бурильної колони та підвищує ризик диференційного прихвату. Додатково, у міру подовження горизонтальної ділянки контроль відхилення

двигуна ускладнюється, а сила тертя між бурильною колоною та стінками свердловини збільшується.

На відміну від цього, РКС забезпечують безперервне обертання бурильної колони під час роботи, що виключає статичне накопичення шламу та знижує контактні тертя. Як наслідок, досягається точніше дотримання проектної траєкторії, зменшується ймовірність аварій та забезпечується можливість прокладання більш довгих горизонтальних ділянок свердловини без додаткових підйомів або зупинок для корекції положення долота. Таким чином, РКС суттєво підвищують технологічну ефективність похило-направленого буріння та знижують ризики ускладнень при будівництві свердловин з великим відходом від гирла.

2.8 Економічна ефективність застосування ГВД та РКС при похило-направленому бурінні

Використання гвинтових забійних двигунів (ГВД) характеризується меншою середньою механічною швидкістю проходки порівняно з роторними керованими системами (РКС). Це призводить до подовження циклу будівництва свердловин і, відповідно, до зростання витрат ресурсів та робочого часу.

Застосування РКС дозволяє скоротити час буріння на 25–30 %, що забезпечує значну економію коштів та підвищує загальну ефективність будівництва свердловин. Безперервне обертання бурильної колони, висока точність підтримання проектної траєкторії та ефективне видалення бурового шламу підвищують рейсову швидкість буріння, зменшують ризики аварійних ситуацій і дозволяють будувати стовбури свердловин більшої протяжності без додаткових підйомів або зупинок.

Додатковими економічними перевагами РКС є підвищення якості стовбура свердловини та точне дотримання проектного профілю, що зменшує витрати на ремонтні та відновлювальні роботи. Таким чином, роторні керовані системи демонструють вищу технологічну ефективність та економічну вигоду при

бурінні похило-направлених і горизонтальних свердловин у порівнянні з гвинтовими вибійними двигунами.

2.9 Порівняльний аналіз ефективності гвинтових вибійних двигунів та роторних керованих систем

Для комплексної оцінки технологічних та економічних характеристик похило-направленого буріння виконано порівняльний аналіз гвинтових вибійних двигунів (ГВД) та роторних керованих систем (РКС) за основними критеріями: інтенсивність кривизни, якість стовбура свердловини, середня швидкість проходки, відхилення кінцевої точки від гирла, залежність від параметрів бурового розчину та економічна ефективність.

Таблиця 2.2 – Порівняльні характеристики ГВД і РКС

Критерій	ГВД	РКС
Інтенсивність кривизни	3,5–6°/10 м	6–15°/10 м
Зняття вимірів	Статичне, не постійне	Автоматичне, безперервне
Вплив бурового розчину	Значний	Незначний
Середня швидкість проходки	23–26 м/год	50–79 м/год
Якість стовбура свердловини	Середня/низька (хвилеподібний стовбур, мікрокаверни)	Висока (рівномірна поверхня, мінімальні дефекти)
Відхилення від гирла	~2000 м	~4000 м
Економічна ефективність	Обмежена; залежить від свердловини	Висока; скорочення часу буріння

Для наочного відображення переваг РКС над ГВД побудовано графіки основних технологічних показників:

1. Середня швидкість проходки (м/год) – демонструє приріст продуктивності при використанні РКС (рис. 2.4).

2. Якість стовбура свердловини – ілюструє зменшення хвилеподібності та дефектів при бурінні РКС (рис. 2.5).

3. Відхилення від гирла (м) – відображає можливість пробурювання більш протяжних горизонтальних ділянок (рис. 2.6).

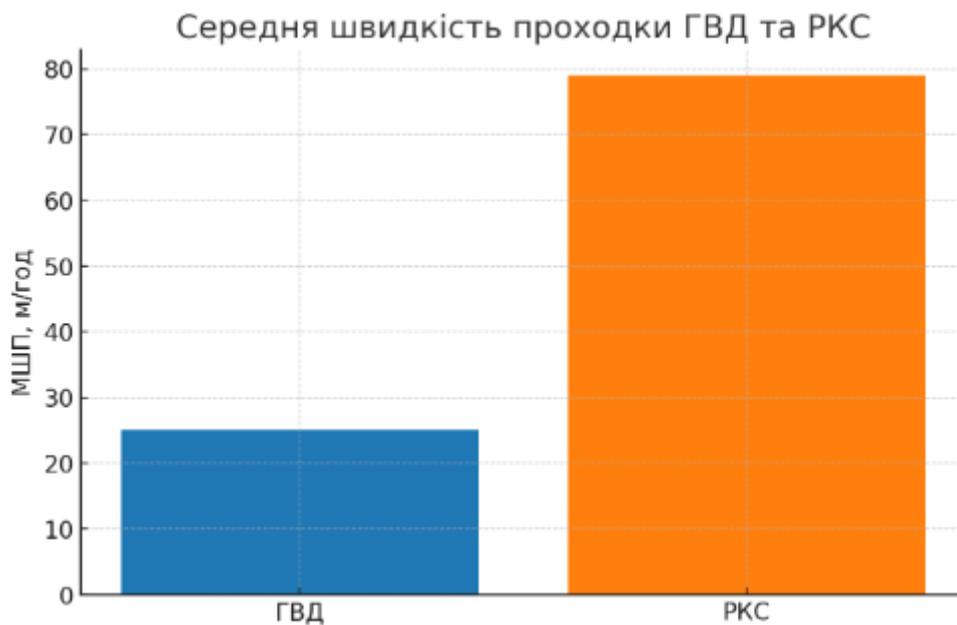


Рисунок 2.4 – Порівняння середньої швидкості проходки.

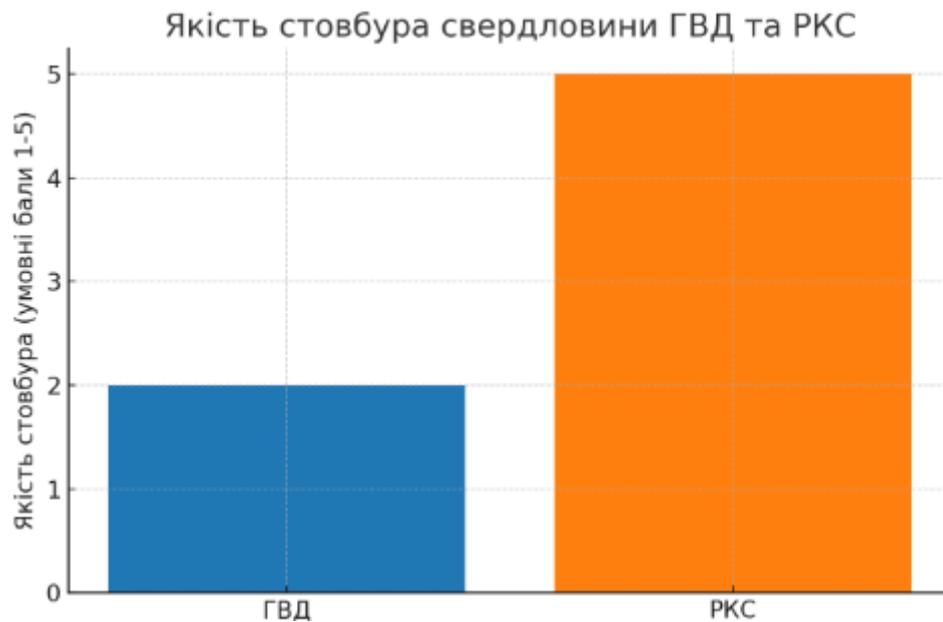


Рисунок 2.5 – Порівняння якості стовбура свердловини.

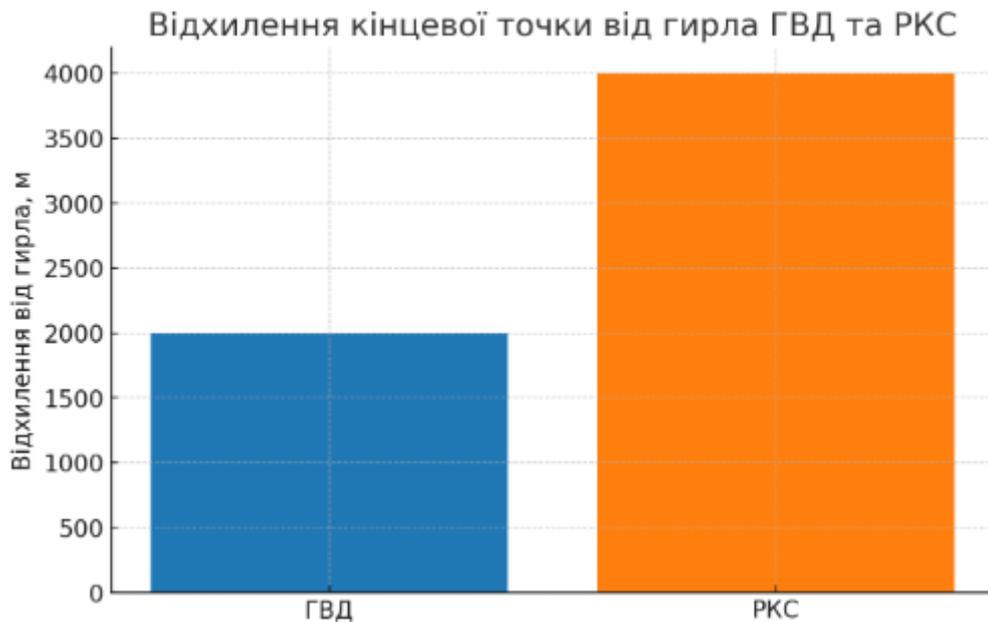


Рисунок 2.6 – Порівняння відхилення від гирла.

2.10 Висновки до розділу 2

1. Гвинтові вибійні двигуни (ГВД), незважаючи на економічну доцільність для простих профілів, мають низку суттєвих технологічних недоліків. Ці недоліки, такі як нерівномірне руйнування породи, ризик прихватів та залежність від параметрів бурового розчину, обмежують їх ефективність при спорудженні складних свердловин.

2. Роторні керовані системи (РКС) забезпечують значно вищу оперативність та точність керування траєкторією завдяки безперервному обертанню колони та автоматичному зняттю вимірів у реальному часі. Це дозволяє досягати більшої інтенсивності викривлення, бурити протяжніші горизонтальні ділянки та значно підвищує механічну швидкість проходки.

3. Буровий розчин суттєво обмежує ефективність гвинтових вибійних двигунів (ГВД), оскільки вони чутливі до густини, вмісту абразивних частинок і температури, що призводить до їхнього швидкого зносу. На противагу цьому, роторні керовані системи (РКС) мають значно меншу залежність від параметрів розчину завдяки відсутності вразливих еластомерних елементів, що робить їх універсальнішими для складних геологічних умов.

4. Застосування РКС забезпечує приблизно вдвічі вищу механічну швидкість проходки порівняно з ГВД, що значно скорочує загальний час будівництва свердловини. Ця перевага досягається завдяки постійному обертанню бурильної колони, яке усуває необхідність чергування режимів «слайд» та «ротор», характерних для ГВД.

5. Якість стовбура свердловини, пробуреної з використанням РКС, є значно вищою через рівномірне руйнування породи та відсутність різких перегинів, що унеможливує безпечний спуск обсадних колон при використанні ГВД. Постійне обертання колони забезпечує оптимальну циркуляцію розчину та формування гладкого, технологічного профілю свердловини.

6. Роторні керовані системи (РКС) дозволяють досягати значно більшого відхилення свердловини від гирла – до 4000 м порівняно з приблизно 2000 м у гвинтових вибійних двигунів (ГВД). Ця перевага обумовлена постійним обертанням бурильної колони, яке зменшує силу тертя та запобігає накопиченню шламу, що є критичним для буріння довгих горизонтальних ділянок.

7. Застосування РКС забезпечує вищу економічну ефективність за рахунок скорочення часу буріння на 25-30% та зниження ризиків аварійних ситуацій. Незважаючи на вищу початкову вартість обладнання, ці переваги разом із можливістю спорудження більш протяжних і якісних свердловин роблять РКС більш вигідними у довгостроковій перспективі.

Радіус допуску до точки закінчення траєкторії становить 50 м, а коридор відхилення по вертикалі – ± 1 м, що вимагає точного дотримання параметрів керованого буріння.

Конструкція свердловини передбачає багатоколонну систему кріплення (табл. 3.7), яка забезпечує надійну ізоляцію гідрогеологічних горизонтів та стійкість стовбура на всіх етапах:

- Напрямна колона $\varnothing 323,9$ мм встановлюється до глибини 50 м для ізоляції верхніх пухких відкладів та запобігання обвалам.

- Кондуктор $\varnothing 244,5$ мм спущений до глибини 1014 м з метою перекриття неогенових і палеогенових водоносних горизонтів, що запобігає міжпластовим перетіканням.

- Експлуатаційна колона (ЕК) $\varnothing 168,3$ мм встановлюється до глибини 2990 м, забезпечуючи кріплення основної частини стовбура та ізоляцію продуктивних пластів.

- Хвостовик $\varnothing 114$ мм розміщений у інтервалі 2915–3690 м, що дозволяє безпосередньо розкрити цільовий горизонт і створює умови для ефективної експлуатації свердловини.

Таблиця 3.6 - Дані по свердловині

Призначення свердловини		Експлуатаційна
Тип		Похило-направлена з горизонтальним закінченням
Альтитуда столу ротора, м		+ 142,15м
Альтитуда землі, м		+ 131,45м
Геологічні дані		
Покрівля проектного горизонту	Глибина по стовбуру, м	2990,4
	Верт. глибина, м	2680,45
Запланована загальна глибина	Глибина по стовбуру, м	3690,4
	Верт. глибина, м	2685,18
Пластовий тиск, кгс/см ²		271
Характеристики цілі		
Проектний горизонт		васюганська почет Ю ₁ ³⁻⁴
Радіус допуску до Т ₁ , м		50
Коридор позначки по вертикалі Т ₂ , м		± 1

Таблиця 3.7 - Конструкція свердловини

№	Тип колони	Обсадна колона		
		Діам. долота, мм	Діам. колони, мм	Глибина спуску, м
1	Направлення	393,7	323,9	50
2	Кондуктор	295,3	244,5	1014
3	ЕК	220,7	168,3	2990
4	Хвостовик	142,9	114	2915-3690

Така схема кріплення дозволяє забезпечити:

- ізоляцію водоносних і газоносних пластів;
- надійність розробки продуктивного горизонту;
- мінімізацію ризиків виникнення аварійних ситуацій;
- підвищення довговічності та експлуатаційної надійності свердловини.

свердловини.

На рисунку 3.1 наведено вертикальну проекцію свердловини, яка демонструє конструкцію обсадних колон та глибинні відмітки їх спуску. На рисунку 3.2 подано горизонтальну проекцію з розгорткою траєкторії стовбура, що відображає особливості керованого буріння та вихід на продуктивний горизонт у межах допусків.

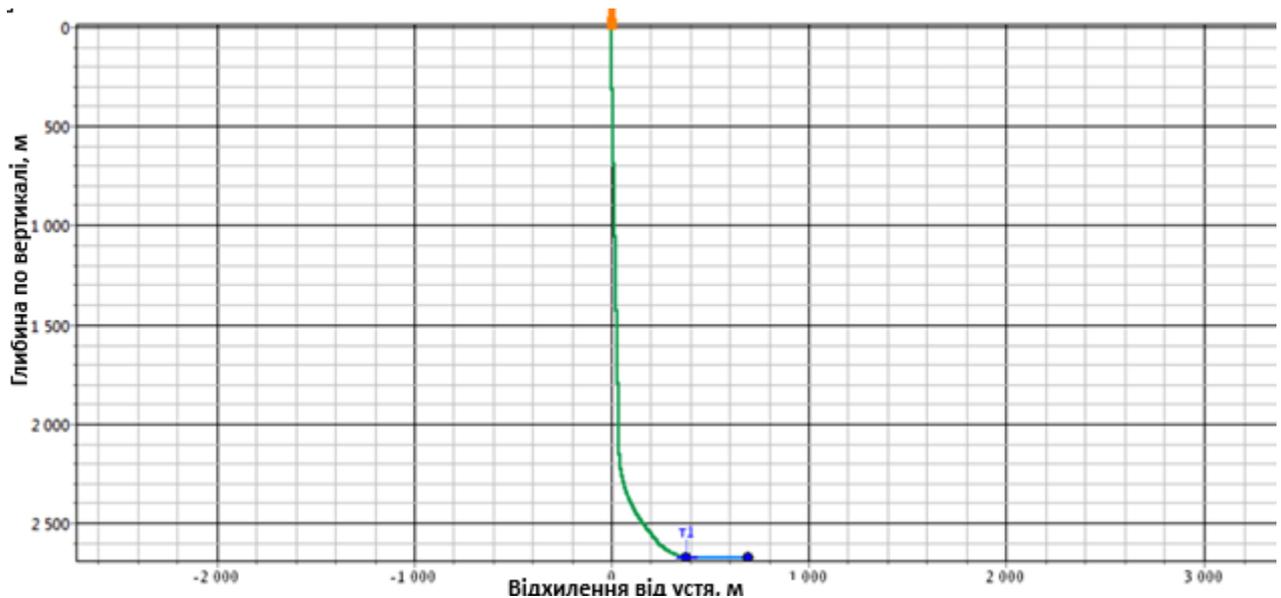


Рисунок 3.1 - Вертикальна проекція - розгортка

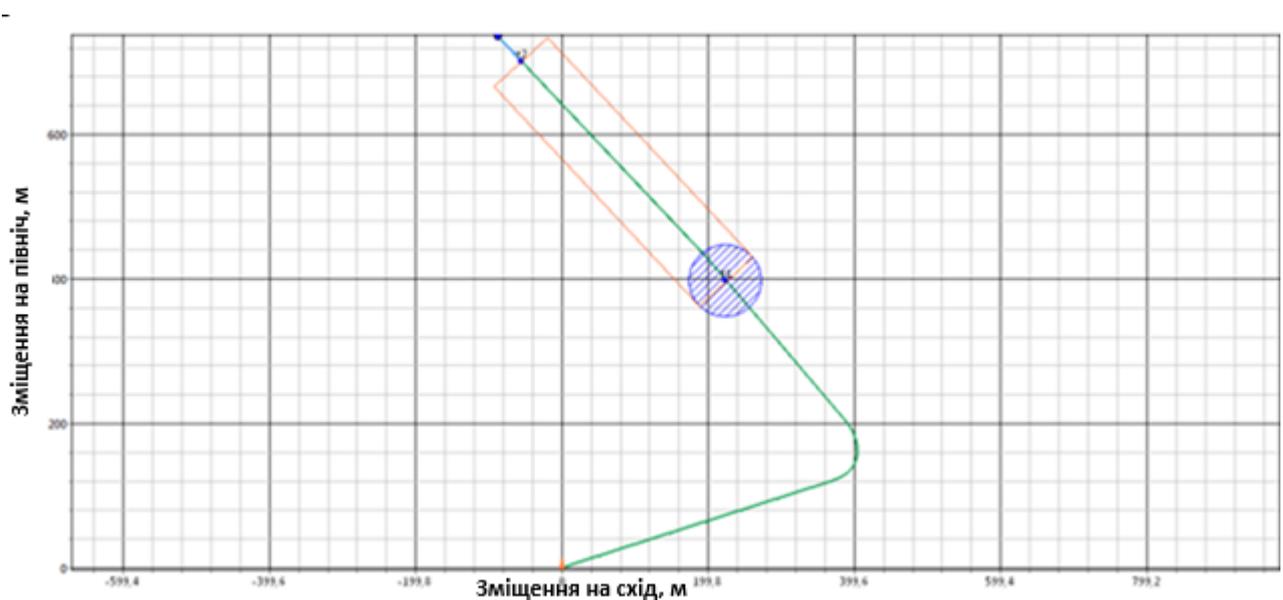


Рисунок 3.2 - Горизонтальна проекція

3.3 Обґрунтування вибору обладнання для проводки свердловини

Одним із ключових етапів проектування є вибір оптимального обладнання для буріння, зокрема – вибір компоновки низу бурильної колони (КНБК). Правильний вибір КНБК дозволяє забезпечити необхідну траєкторію свердловини, стабільність стовбура, високу механічну швидкість буріння та зниження ризиків виникнення аварійних ситуацій.

Буріння секції під нахил здійснюється із застосуванням роторного КНБК, що є найбільш доцільним для верхніх пухких відкладів і забезпечує стабільність стовбура. У свою чергу, буріння інтервалу під кондуктор виконується за допомогою КНБК з гвинтовим вибійним двигуном (ГВД), який дозволяє підвищити керованість траєкторії та забезпечити точне дотримання проектних параметрів.

Основне завдання постає при виборі КНБК для буріння інтервалу хвостовика, де особливе значення мають як геологічні умови, так і вимоги до точності профілю свердловини. Для цього розглянуто два основні варіанти компоновок:

- КНБК із застосуванням роторно-керованої системи (РКС) (табл. 3.8);
- КНБК з гвинтовим вибійним двигуном (ГВД) (табл. 3.10).

Обидва варіанти компоновок враховують специфіку буріння у складних гірничо-геологічних умовах регіону з низькими температурами та підвищеними пластовими тисками, що підтверджується досвідом раніше пробурених свердловин.

У таблиці 3.8 наведено детальну схему КНБК з використанням РКС Autotrack. Система містить калібратори, перевідники, вимірювальний модуль (MWD), стабілізатори та долото PDC Ø142,9 мм. Така компоновка забезпечує:

- високу точність підтримання траєкторії;
- можливість корекції відхилень у режимі реального часу;
- зниження інтенсивності кривизни профілю, що важливо при проходженні через чергування глинистих та піщаних порід.

Режими буріння для цієї компоновки (табл. 3.9) передбачають навантаження на долото 8–12 т, частоту обертання 100–150 об/хв та продуктивність бурових насосів 32 л/с при тиску 11–13 МПа. Це дозволяє досягти стабільної механічної швидкості буріння при збереженні стійкості стовбура свердловини.

У таблиці 3.10 представлена схема КНБК із застосуванням гвинтового двигуна ДРУ-120 з кутом перекосу $0,75^\circ$. Дана компоновка включає в себе бурильні труби, стабілізатори, калібратори та PDC-долото Ø142,9 мм.

Режими буріння (табл. 3.11) передбачають навантаження на долото 8–10 т, частоту обертання 100–150 об/хв, продуктивність насосів 14–18 л/с при робочому тиску 12–16 МПа.

Використання ГВД дозволяє:

- забезпечити високу інтенсивність набору зенітного кута (приблизно 2° на 10 м при 100% спрямованому бурінні);
- ефективно виконувати кероване буріння на похилих та горизонтальних ділянках;
- враховувати природну тенденцію КНБК до зниження кута, яка становить близько $0,15^\circ$ на 10 м у геологічних умовах родовища.

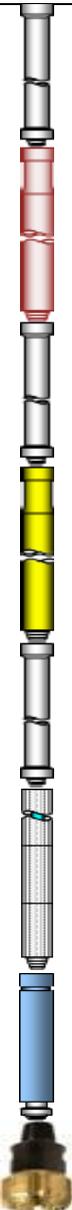
Таблиця 3.8 - Схема КНБК з застосуванням РКС.

Ескіз	№	Елемент	Зовнішній діаметр, мм	Внутрішній діаметр, мм	Довжина, м
	16	ТБПК-88, 9х9, 35	88,9	70,2	До гирла
	15	ТБТ-88, 9х15, 9	88,9	57,1	24
	14	Яс -120	125,5	56	6,7
	13	ТБТ-88, 9х15, 9	88,9	57,1	24
	12	ТБПК-88, 9х9, 35	88,9	70,2	650
	11	Перевідник	121,6	68	1
	10	НУ -127	127	82	1,83
	9	БТ компресіон	89	68,8	8,55
	8	Калібратор	120,7	60	2,15
	7	Перевідник	121,6	68	0,77
	6	БТС	120,7	38	3,37
	5	Калібратор	127,5	38	1
	4	MWD	120,7	38	7,15
	3	Калібратор	120,7	38,2	10
	2	РКС Autotrack	120,7	29	10
1	PDC V613DG1X	142,9		0,33	

Таблиця 3.9 - Режим буріння

Долото	142,9 PDC
Спосіб буріння	Турбінно-роторний
Навантаження на долото - буріння	8-12 тн
Частота обертання (ГВД)	100-150 про/хв.
Продуктивність бурових насосів	32 л/сек
Тиск	11-13 МПа

Таблиця 3.10 - Схема КНБК з застосуванням ГВД

Ескіз	Елемент	Зовнішній діаметр, мм	Внутрішній діаметр, мм	Довжина, м
	ТБПН- 89 * 9	89	80	До гирла
	Яс - 120	120,5	67	6
	ТБПН- 89 * 9	89	71	400
	УБТ -120	120	80	45
	ТБПН- 89 * 9	89	71	600
	ЗТС АТС -120	121	60	8
	Двигун ДРУ-120 (кут перекоосу 0,75 ⁰)	122		9
	Долото PDC 142,9 E6813 S096U	142,9		0,3

Таблиця 3.11 - Режими буріння

Долото	PDC 142,9 E6813 S096U
Спосіб буріння	Турбінно-роторний
Навантаження на долото - буріння	8-10 тн
Частота обертання (ГВД)	100-150 про/хв.
Продуктивність бурових насосів	14-18 л/сек
Тиск	12-16 МПа

Графіки будівництва профілю свердловини при використанні різних типів КНБК наведені на рис. 3.3 та рис. 3.4.

– Рисунок 3.3 демонструє траєкторію свердловини при бурінні за допомогою ГВД. Видно більш різке нарощування зенітного кута та гнучкість у керуванні траєкторією.

– Рисунок 3.4 ілюструє будівництво свердловини при використанні РКС. У цьому випадку профіль має більш плавний характер, що підвищує стабільність траєкторії та точність виходу у проектну точку.

Порівняльний аналіз двох варіантів компоновки (табл. 3.8–3.11) та графічних матеріалів (рис. 3.3–3.4) дозволяє зробити такі висновки:

1. Використання РКС забезпечує більш високу точність керування траєкторією та доцільне у випадках, коли необхідне плавне нарощування кута і мінімізація ризику відхилень.

2. ГВД є ефективним інструментом для буріння похило-спрямованих та горизонтальних ділянок, де потрібно забезпечити значний набір зенітного кута у короткому інтервалі.

3. В умовах родовища доцільним є комбіноване застосування обох варіантів: початкове спрямоване буріння за допомогою ГВД з подальшим використанням РКС для точного виходу у проектну точку.

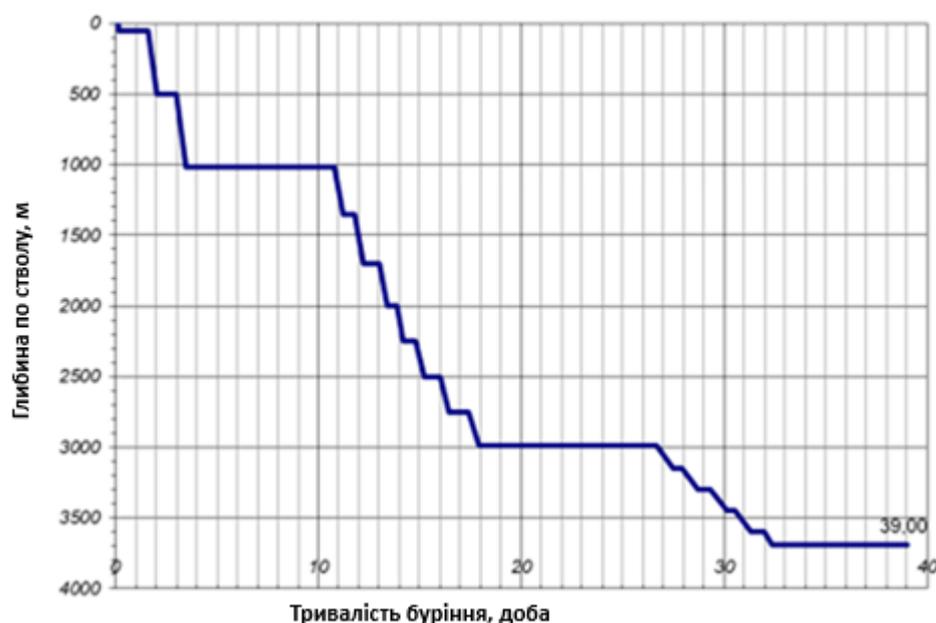


Рисунок 3.3 - Графік будівництва свердловини при бурінні ГВД

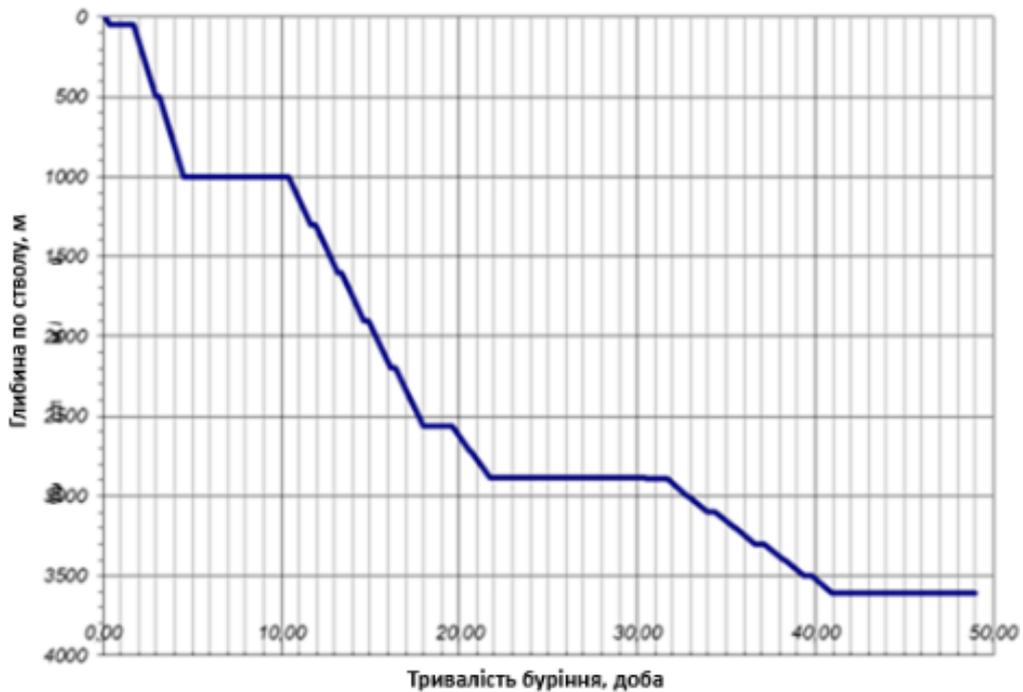


Рисунок 3.4 - Графік будівництва свердловини при бурінні РКС

3.4 Оцінка економічної та техніко-технологічної ефективності застосування бурових систем

Загальний економічний ефект від впровадження роторних керованих систем (РКС) у практику буріння оцінити у повному обсязі досить складно через значну кількість змінних факторів, що впливають на кінцевий результат (геологічні умови, технічні характеристики обладнання, кваліфікація персоналу тощо). Проте, спираючись на середньостатистичні показники, отримані у процесі буріння аналогічних свердловин, можна спрогнозувати наступні тенденції:

- скорочення календарного часу на будівництво свердловини на 10–15 %, що безпосередньо знижує витрати на експлуатацію бурової установки;
- економія електроенергії на рівні 5–10 % за рахунок більш раціонального режиму роботи насосів та механізмів;
- зменшення витрат бурового розчину та хімічних реагентів на 15–20 % завдяки покращеному контролю траєкторії свердловини та зниженню кількості аварійних ситуацій;

– підвищення рейсової швидкості проходки у середньому на 20–25 % у порівнянні з класичними системами з використанням гвинтових забійних двигунів (табл. 3.8–3.11, рис. 3.3–3.4).

Аргументований та технічно виважений вибір між гвинтовим вибійним двигуном (ГВД) і РКС має вирішальне значення для досягнення максимальної ефективності. Так, використання ГВД виправдане у потужних пластах при мінімальній потребі у спрямованому бурінні, тоді як РКС є доцільними у складних гірничо-геологічних умовах і при проходці інтервалів із жорсткими вимогами до просторового положення стовбура свердловини.

Вибір того чи іншого обладнання має ґрунтуватися на комплексному проектуванні, яке враховує:

- геологічні особливості району робіт;
- конструкцію свердловини;
- технічні характеристики бурової установки;
- прогнозовані навантаження на долото;
- інтенсивність кривизни траєкторії та допустимі відхилення.

Таким чином, впровадження РКС дозволяє не лише підвищити якість профілювання свердловини, але й знизити аварійність, оптимізувати витрати матеріально-технічних ресурсів та підвищити загальну економічну рентабельність бурових робіт. У той час як застосування ГВД залишається доцільним для умов, де немає необхідності у високоточному керуванні траєкторією, проте вимагається висока механічна швидкість буріння.

Порівняння основних економічних та технологічних показників застосування різних типів КНБК наведено у табл. 3.12. Як видно з даних, впровадження РКС дозволяє досягти суттєвої економії ресурсів та підвищити якість будівництва свердловини, тоді як ГВД залишається доцільним у випадках, де пріоритетом є висока швидкість проходки при мінімальній потребі в коригуванні траєкторії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено важливу науково-технічну задачу щодо підвищення ефективності похило-направленого буріння шляхом комплексного порівняльного аналізу технологічних та економічних показників застосування гвинтових вибійних двигунів та роторних керованих систем.

1. Еволюція технологій похило-направленого буріння пройшла шлях від простих механічних пристроїв до високотехнологічних систем, де сучасні роторні керовані системи (РКС) забезпечують безперервний контроль траєкторії та значно вищі техніко-економічні показники. Зокрема, РКС демонструють інтенсивність викривлення до $15^{\circ}/10$ м порівняно з $3,5-6^{\circ}/10$ м у ГВД, що дозволяє формувати складніші траєкторії свердловин.

2. Технологічна перевага РКС підтверджується кількісними показниками: вони забезпечують механічну швидкість проходки до 79 м/год проти 25-26 м/год у ГВД, а також дозволяють досягати відхилення від гирла понад 4000 м порівняно з приблизно 2000 м при використанні гвинтових двигунів.

3. Економічна ефективність РКС проявляється у скороченні часу буріння на 25-30% та зниженні витрат бурового розчину на 15-20%, що компенсує їхню вищу початкову вартість. Додатково, підвищення рейсової швидкості проходки на 20-25% забезпечує значну економію коштів при будівництві складних свердловин.

4. Геологічні умови родовища із складним розрізом та екстремальними термобаричними параметрами (пластовий тиск до 271 кгс/см², температура 96°C) вимагають спеціального підходу до вибору бурового обладнання та технологій.

5. Оптимальна стратегія буріння передбачає комбіноване використання обладнання: ГВД з інтенсивністю набору кута $2^{\circ}/10$ м для початкових етапів, та РКС для точного виходу в цільову точку з радіусом допуску 50 м.

6. Якісні характеристики стовбура, пробуреного з використанням РКС, значно вищі за рахунок рівномірного руйнування породи та відсутності різких

перегинів, що забезпечує успішний спуск обсадних колон та довготривалу експлуатацію свердловини.

7. Сучасні системи контролю траєкторії забезпечують передачу даних з вибою з продуктивністю до 32 л/с для РКС, що дозволяє здійснювати оперативне коригування параметрів буріння в режимі реального часу та гарантувати дотримання проектного профілю свердловини.

GENERAL CONCLUSIONS ON THE WORK

The work solves an important scientific and technical problem of improving the efficiency of directional drilling through a comprehensive comparative analysis of the technological and economic indicators of the use of screw downhole motors and rotary steerable systems.

1. The evolution of directional drilling technologies has gone from simple mechanical devices to high-tech systems, where modern rotary steerable systems (RSS) provide continuous trajectory control and significantly higher technical and economic indicators. In particular, RCS demonstrate a curvature intensity of up to $15^{\circ}/10$ m compared to $3.5-6^{\circ}/10$ m in HDD, which allows for the formation of more complex well trajectories.

2. The technological advantage of RCS is confirmed by quantitative indicators: they provide a mechanical drilling speed of up to 79 m/hour compared to 25-26 m/hour in HDD, and also allow for a deviation from the wellhead of more than 4000 m compared to approximately 2000 m when using screw motors.

3. The economic efficiency of RCS is manifested in a 25-30% reduction in drilling time and a 15-20% reduction in drilling fluid consumption, which compensates for their higher initial cost. In addition, a 20-25% increase in trip drilling speed provides significant cost savings in the construction of complex wells.

4. The geological conditions of the field with a complex section and extreme thermobaric parameters (formation pressure up to 271 kgf/cm², temperature 96°C) require a special approach to the selection of drilling equipment and technologies.

5. The optimal drilling strategy involves the combined use of equipment: HDD with an angle gain intensity of $2^{\circ}/10$ m for the initial stages, and RCS for accurate exit to the target point with a tolerance radius of 50 m.

6. The quality characteristics of the wellbore drilled using DCT are significantly higher due to the uniform destruction of rock and the absence of sharp bends, which ensures successful casing run-in and long-term operation of the well.

7. Modern trajectory control systems provide data transmission from the bottom of the hole with a capacity of up to 32 l/s for RCS, which allows for real-time

adjustment of drilling parameters and ensures compliance with the design profile of the well.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білецький В.С. Основи нафтогазової інженерії: підруч. для студ. спец. 185 «Нафтогазова інженерія та технології» / Білецький В.С., Орловський В.М., Вітрик В.Г.; НТУ «ХПІ», ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2018. – 415 с.
2. Боровик М. В., Гордійчук М. В., Кобзар Ю. Б., Ліхван В. М. Термосолестійкі бурові розчини для буріння глибоких свердловин з АВПТ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 4(49). – С. 149–158.
3. Буріння свердловин: навч. посіб. / Є.А. Коровяка, В.Л. Хоменко, Ю.Л. Винников, М.О. Харченко, В.О. Расцветаєв; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 292 с.
4. Винников Ю.Л. Методологія науково-дослідних робіт: конспект лекцій для студентів спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології. Ступінь вищої освіти – магістр / Ю.Л. Винников. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022 – 70 с.
5. Дудля М.А. Промивальні рідини в бурінні [Текст] : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М. А. Дудля ; Держ. вищ. навч. закл. "Нац. гірн. ун - т". - Вид. 3-тє, допов. - Д. : НГУ, 2011. - 542 с
6. Загибайло , Г.Т. Промивка свердловин [Текст] / Г.Т. Загибайло, С.М. Башлик . – К.: Знання України, 2006. – 200 с.
7. 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.
8. Мислюк , М.А. Буріння свердловин [Текст]: довідник / М.А. Мислюк, І.Й. Рибчич , Р.С. Яремійчук . – К.: Інтерпрес ЛТД, 2002. – Т. 2 . – 303 с.
9. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурові промивальні рідини та тампонажні суміші: Підручник. – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – 296 с.

10. Політучий О.І. Буріння нафтових і газових свердловин: навч. посібник / О.І. Політучий. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 170 с.
11. Промивальні рідини в бурінні: Підручник для студентів спеціальностей 184 «Гірництво» та 185 «Нафтогазова інженерія та технології» / Є.А. Коровяка, Ю.Л. Винников, А.О. Ігнатов, О.В. Матяш, В.О. Расцветаєв; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка», 4-те вид., доп. – Дніпро : Журфонд, 2023. – 420 с.
12. Технологія і техніка буріння / В.С. Войтенко, В.Г. Вітрик, Р.С. Яремійчук, Я.С. Яремійчук. – Львів: Центр Європи, 2012. – 708 с.
13. Яремійчук Р. С., Качмар Ю. Д., Семак О. С. Відкриття, розвідка та експлуатація нафтових і газових родовищ. – Львів: Центр Європи, 2003. – 450 с.
14. Austin E.H. Drilling engineering handbook. Springer Science & Business Media, 2012. 300 p.
15. Bourgoyne A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., Young, F.S. Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers, 2014. 1707 p.
16. Caenn R., Darley H.C.H., Gray G.R. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Gulf Professional Publishing; 6th edition, 2011. 720 p.
17. Gabolde G., Nguyen J.P. Drilling Data Handbook. Editions Technip; 8th edition, 2006. 600 p.
18. Guan Z., Chen T., Liao H. Theory and Technology of Drilling Engineering. Springer; 1st edition, 2020. 789 p. 27. Lopez J.C., Lopez J.E., Javier F. Drilling and blasting of rocks. CRC Press Taylor & Francis, 2017. 408 p.
19. Jeffery W.H. Deep Well Drilling: The Principles and Practices of Deep Well Drilling, and a Hand Book of Useful Information for the Well Driller. Palala Press, 2018. 538 p. 32.
20. Jiang Zhen, Yun cable. Anshan Iron ore waste rock field ecological environment governance plan and technical method [J]. Jiangxi Journal of Agricultural Sciences. Environ Sci Technol. 2003;37(14):3152–3157
21. Mitchell R.F., Miska S.Z. Fundamentals of Drilling Engineering (Spe Textbook Series). Society of Petroleum Engineers, 2010. 696 p.

22. Ochrona środowiska w aspekcie źródeł energii [Text] / N. Dudla, W. Gorecki, G. Piwniak i inni. – Kraków: Wyd. Tow. Geosynoptyków GEOS, 1996. – 261 s.
23. Sharma K.K., Sharma L.K. A Textbook of Physical Chemistry, 6th Edition. Vikas Publishing, 2016. 864 p.
24. Speight, J.G. Rules of Thumb for Petroleum Engineers. Wiley-Scrivener; 1st edition, 2017. 762 p.
25. Venvolden K.A., Cooper C.K.. Natural seepage of crude oil into the marine environment. Geo-Marine Letters, 2003. P. 140-146 27. Рідкі нафтошлами відкритого зберігання: вебсайт: <http://www.afuelsystems.com/ru/trga/s110.html> –
26. Zięba A. Charakterystyka zanieczyszczeń atmosfery substancjami z procesu spalania paliw kopalnych [Text] / A. Zięba, D. Stasko, N.Dudla // Nafta i Gaz. – 2001. – Zeszyt. 18/1. – S. 17 – 25.