

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра гірничої справи

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

В'ячеслав КАМЕНЕЦЬ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Новітні технології розробки родовищ корисних копалин»
за спеціальністю 184 Гірництво

на тему «Зниження витрат на підготовку гірських порід до
виймання шляхом вдосконалення організації буропідбивних робіт
в умовах ПРАТ «ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК»»

Керівник роботи

Консультант від
бази практики

Ігор ГРИГОР'ЄВ

Олександр ГЕРАСИМЧУК

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

Здобувач

Олексій СИСТЄРОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Валерій СЛОБОДЯНЮК

Кривий Ріг 2024

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»	
Факультет	Гірничо-металургійний
Кафедра	гірничої справи
Ступінь вищої освіти	магістр
Спеціальність	184 Гірництво
ОПП	Новітні технології розробки родовищ корисних копалин

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

_____ В'ячеслав
КАМЕНЕЦЬ

«25» грудня 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Систєрова Олексія Валерійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Зниження витрат на підготовку гірських порід до виймання шляхом вдосконалення організації буропідризних робіт в умовах ПРАТ «ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК»

керівник роботи Григор'єв Ігор Євгенійович, доцент, канд. техн. наук,

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

затверджені наказом Університету від 29.08. 2023 р. №137.1/29.08.2023

2. Термін подання роботи 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з відкритих гірничих робіт, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики підготовки гірських порід до виймання, технологічні інструкції, дані ПРАТ «ІнГЗК» м. Кривий Ріг, результати експериментів та досліджень тощо

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Вивченність питання і аналіз досвіду вдосконалення технології проектування буропідризних робіт на кар'єрах 2. Аналіз основних факторів, що впливають на ефективність технологічного процесу шарошкового буріння на кар'єрах 3. Дослідження впливу технологічних параметрів процесу буріння на механічну швидкість та прохідку на долото. Висновки. Перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Розділ 2	Герасимчук О.М. Генеральний директор ПрАТ «ІНГЗК»

7. Дата видачі завдання 05.12.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Вивченність питання і аналіз досвіду вдосконалення технології проектування буропідливних робіт на кар'єрах	25.12.2023 – 28.12.2023
2	Розділ 2. Аналіз основних факторів, що впливають на ефективність технологічного процесу шарошкового буріння на кар'єрах	25.12.2023 – 28.12.2023
3	Розділ 3. Дослідження впливу технологічних параметрів процесу буріння на механічну швидкість та прохідку на долото	28.12.2023 – 07.01.2024
4	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	07.01.2024 – 08.01.2024
5	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	08.01.2024 – 10.01.2024
6	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	10.01.2024 – 16.01.2024
7	Рецензування завершеної роботи. Захист	16.01.2024 – 24.01.2024

Здобувач

(Олексій СИСТЄРОВ)

Керівник роботи



(Ігор ГРИГОР'ЄВ)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
Розділ 1 Вивченність питання і аналіз досвіду вдосконалення технології проектування буропідливних робіт на кар'єрах	9
1.1. Особливості технології буріння на кар'єрах та сучасний стан бурової техніки.....	11
1.2. Аналіз вітчизняного та світового досвіду вдосконалення режиму буріння при реалізації проектних рішень	15
1.3. Методика оптимізації режиму буріння на основі базових залежностей ...	17
1.4. Метод, заснований на математичному моделюванні процесу буріння...	21
1.5. Аналіз методик оптимізації режимів буріння та досвіду їх застосування під час оперативного управління бурінням.....	28
1.6. Структура управління процесом буріння породного масиву.....	30
1.7. Аналіз систем керування процесом шарошкового буріння.....	35
1.8. Сучасний стан способів керування параметрами режиму буріння.....	37
1.9. Аналіз методів розрахунку параметрів шарошкового буріння.....	41
Розділ 2 Аналіз основних факторів, що впливають на ефективність технологічного процесу шарошкового буріння на кар'єрах.....	48
2.1. Аналіз критеріїв оптимізації процесу буріння.....	48
2.2. Процес буріння як об'єкт управління	51
2.3. Встановлення функціональних зв'язків між параметрами моделі процесу шарошкового буріння як об'єкта управління	55
2.4. Обґрунтування фізичної сутності моделі функціональних зв'язків параметрів процесу буріння	60
2.5. Вплив технологічних параметрів процесу буріння на зношування вузлів долота	63
Розділ 3 Дослідження впливу технологічних параметрів процесу буріння на механічну швидкість та прохідку на долото.....	64
Загальні висновки та рекомендації.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена детальному аналізу та оптимізації технологій буропідричних робіт на кар'єрах, акцентуючи увагу на вдосконаленні процесів проектування та управління. У першому розділі розглядаються особливості технології буріння на кар'єрах, стан бурової техніки, аналіз вітчизняного та світового досвіду в оптимізації режимів буріння, а також різні методики та підходи до математичного моделювання процесу буріння. Також включено детальний огляд структури управління процесом буріння та аналіз систем керування шарошковим бурінням.

Другий розділ зосереджується на аналізі основних факторів, що впливають на ефективність технологічного процесу шарошкового буріння. В цьому контексті розглядаються критерії оптимізації процесу, процес буріння як об'єкт управління, функціональні зв'язки між параметрами моделі процесу, фізична сутність цих зв'язків, та вплив технологічних параметрів на зношування вузлів долота.

Третій розділ роботи охоплює дослідження впливу технологічних параметрів процесу буріння на механічну швидкість і прохідку долота, що є ключовим для підвищення ефективності ведення буропідричних робіт. Особлива увага приділена методам розрахунку оптимальних параметрів буріння, що забезпечують максимальну продуктивність і економічну ефективність процесу.

ВСТУП

Актуальність теми. В технології відкритої розробки родовищ особливе місце посідають питання буріння вибухових свердловин, підвищення ефективності експлуатації бурових верстатів, підвищення надійності та вдосконалення конструкції виконавчих механізмів. Збільшення обсягів видобутку неминуче тягне збільшення обсягів бурових робіт, отже, довговічність роботи бурового верстата залежить від якості і періодичності проведених ремонтів.

Основу парків бурового обладнання кар'єрів України складають верстати шарошкового буріння. Такими верстатами виконується до 85% всіх обсягів буріння, тоді як верстатами обертального способу з різцевими коронками – близько 15,7% та верстатами ударного буріння – до 1%. Інші 0,8% припадають на верстати термічного буріння.

Незважаючи на значущість та чисельність досліджень, пов'язаних з розвитком бурової техніки, у них недостатньо уваги приділено питанням оптимального та своєчасного регулювання режимів шарошкового буріння, адаптивних систем усунення критичних навантажень при бурінні складноструктурних породних масивів стосовно проблеми підвищення ресурсу бурового інструменту та механічної швидкості буріння.

Буровий верстат функціонує в умовах високої невизначеності, що викликана головним чином випадковими чергуваннями гірських порід, що розробляються, внаслідок чого машиніст бурового верстата часто не в силах забезпечити оптимальність режимів буріння. Він змушений приймати важливі технологічні рішення (призначати режими буріння, визначати час роботи долота та його заміни, вибирати тип долота тощо), перебуваючи у стані інформаційної невизначеності. Неоптимальні дії машиніста можуть призводити до негативних наслідків

у всіх залежних ланцюжках робіт, оскільки буріння є невід'ємною частиною всього комплексу буропідричних робіт.

Тому зниження витрат на підготовку гірських порід до виймання шляхом вдосконалення організації буропідричних робіт є актуальною в теоретичному плані та має важливе значення.

Постановка проблеми. Проблема дослідження полягає у необхідності оптимізації технологічних процесів буріння на кар'єрах, зокрема в удосконаленні проектування буропідричних робіт і впливу технологічних параметрів на ефективність та економічність цього процесу. Ключовими аспектами є розробка та впровадження новітніх методів управління бурінням, включаючи математичне моделювання та аналіз систем керування, для підвищення продуктивності та зниження зношування обладнання.

Мета й завдання роботи. Основною метою магістерської роботи є аналіз стану науково-методичної бази з питання оптимізації режиму буріння свердловин верстатами шарошкового буріння при відкритій розробці родовищ корисних копалин, а також пошук шляхів вдосконалення організації буропідричних робіт в умовах ПРАТ «Інгулецький ГЗК».

Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані **основні задачі дослідження**:

1. Виконати аналіз сучасних досліджень стосовно шляхів вдосконалення організації буропідричних робіт.
2. Дослідити вплив технологічних параметрів процесу буріння на механічну швидкість та проходку на долото.
3. Сформулювати основні напрямки подальших досліджень.

Об'єкт дослідження – технологічний процес підготовки гірських порід до виймання

Предмет дослідження - методи та підходи до оптимізації процесу буріння, зокрема проектування буропідливних робіт та аналіз технологічних параметрів, що впливають на ефективність і економічність буріння

Результати дослідження: - виконано аналіз сучасного стану бурової техніки та технологічних процесів буріння на кар'єрах, який включає оцінку вітчизняного та світового досвіду;

- визначено ключові технологічні параметри, які впливають на ефективність буропідливних робіт, та проведено їх оптимізацію на основі розробленої методики;

- встановлено нові функціональні зв'язки між параметрами процесу буріння, що сприяє глибшому розумінню фізичної сутності процесу та впливу різних факторів на його ефективність.

РОЗДІЛ 1

ВИВЧЕННІСТЬ ПИТАННЯ І АНАЛІЗ ДОСВІДУ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ НА КАР'ЄРАХ

Значна частина мінеральної сировини, що видобувається відкритим способом, представлена скельними породами, які екскавуються лише після попереднього вибухового подрібнення. Вибухова відбійка гірських порід є дуже відповідальною та дорогою операцією, від якої залежить ефективність усіх подальших процесів гірничих робіт та збагачення. Скельні масиви гірських порід дуже мінливі за структурою і властивостями міцності, тому витрата буріння і вибухових речовин на відбійку 1м³ породи може змінюватися в широких межах. Додаткові складнощі викликає зміна структурних та міцностних властивостей гірських порід під впливом гірничих робіт. При неправильному виборі параметрів буровибухових робіт (БВР) відбувається порушення масивів гірських порід за межами запланованих контурів відбійки. Це призводить до аварійних ситуацій, суттєвого ускладнення технології гірничих робіт та БВР зокрема.

У загальній технології відкритих гірничих розробок буріння вибухових свердловин є одним із основних, трудомістких та дорогих процесів.

Найбільшого поширення на кар'єрах і розрізах набув шарошковий спосіб буріння, яким виконується до 85% всіх обсягів робіт. В Україні на сьогоднішній день 15% парку бурових верстатів, що експлуатуються на відкритих гірничих розробках, складають верстати шарошкового буріння трьох основних типорозмірів: СБШ-200 (10%), СБШ - 250 (85%) та СБШ-320 (5%).

Незважаючи на значущість та численність досліджень, пов'язаних з розвитком бурової техніки, у них недостатньо уваги

приділено питанням оптимального та своєчасного регулювання режимів шарошкового буріння, адаптивних систем усунення критичних навантажень при бурінні складноструктурних породних масивів стосовно проблеми підвищення ресурсу бурового інструменту та механічної швидкості буріння.

Підвищення показників роботи доліт з допомогою вибору оптимального режиму буріння призводить до значної економії витрат за буріння свердловин. Водночас традиційні методи вдосконалення режимів буріння, як свідчить досвід, є недостатньо ефективними. Математичні моделі при пошуку оптимальних режимів буріння не знайшли належного розвитку та застосування, що змушує процес удосконалення технології поглиблення вести виключно емпіричними методами.

Буровий верстат функціонує в умовах високої невизначеності, викликаній головним чином мінливими фізико-механічними властивостями гірських порід, що розробляються, внаслідок чого машиніст бурового верстата часто не в силах забезпечити оптимальність режимів буріння. Він змушений приймати важливі технологічні рішення (призначати режими буріння, визначати час роботи долота та його заміни, вибирати тип долота тощо), перебуваючи у стані інформаційної невизначеності. Неоптимальні дії машиніста можуть призводити до негативних наслідків у всіх залежних ланцюжках робіт, оскільки буріння є невід'ємною частиною всього комплексу буропідривних робіт.

Досвід використання бурових верстатів на кар'єрах показує, що машиніст не в змозі оперативно визначати ефективні за прийнятими критеріями значення керуючих впливів, що знижує якість управління процесом буріння та шарошечним верстатом і призводить до дострокового виходу з бурового інструменту (шарошкового долота).

Нерідко параметри буріння, що призначаються машиністом бурового верстата, виявляються помилковими, що призводить до поломки долота, яке не підлягає ремонту та відновленню. При бурінні вибухових свердловин необхідно призначати такі параметри управління буровим верстатом, за яких повністю використовуються ресурсні можливості долота.

Тому зниження витрат на підготовку гірських порід до виймання шляхом вдосконалення організації буропідбивних робіт є актуальною в теоретичному плані та має важливе значення.

1.1. Особливості технології буріння на кар'єрах та сучасний стан бурової техніки

Верстати шарошкового буріння призначені для проходження вибухових вертикальних і похилих свердловин діаметром 160-320 мм і глибиною до 60 м на кар'єрах, при будівництві гідротехнічних споруд, встановленні паль у скельних і багаторічномерзлих масивах, у промисловому та цивільному будівництві, в гірських породах з коефіцієнтом (f) за шкалою проф. М.М. Протод'яконова до 20.

Один із перших верстатів для буріння вибухових свердловин шарошковими долотами був випробуваний у 40-ті роки на кар'єрах США.

В даний час верстати шарошкового буріння є найбільш поширеними при підготовці гірничої маси до виймання на відкритих гірничих роботах, зважаючи на їх універсальність, що забезпечує ефективне буріння свердловин у найрізноманітніших гірничо-геологічних умовах. З їх допомогою виконується до 85% обсягів бурових робіт на кар'єрах.

За роки розвитку бурової техніки, як у нашій країні, так і за кордоном, позначилися такі напрямки вдосконалення бурових верстатів:

- збільшення енергоозброєності основних систем верстатів;
- підвищення надійності та ремонтпридатності, розробка засобів діагностики стану всіх систем бурового верстата;
- розробка систем, що знижують динамічні навантаження на верстат, а також засобів захисту персоналу від впливу вібрації;
- автоматизація управління процесом буріння, а також повна механізація та автоматизація виконання допоміжних операцій;
- оптимізація параметрів режиму буріння;
- підвищення міцності та зносостійкості бурового інструменту;
- підвищення автономності та мобільності бурових верстатів.

Реалізація ідей збільшення енергоозброєності основних систем верстатів дозволила створити бурові верстати масою до 170 т та діаметром свердловин до 560 мм. Однак укрупнення бурових верстатів не призвело до очікуваного збільшення експлуатаційної продуктивності та зниження собівартості буріння, що пояснюється значним подорожчанням верстатів та збільшенням часу на їх переміщення від свердловини до свердловини.

Крім того, відмічено погіршення якості подрібнення породи за блоком, що обурюється, в цілому. На сьогоднішній день найбільш раціональним вважають буріння свердловин діаметром від 200 до 320 мм буровими верстатами з достатньою потужністю приводу обертання бурового ставу, покращеним очищенням свердловини від продуктів руйнування та збільшеною швидкістю пересування.

В Україні 75% парку бурових верстатів, що експлуатуються на кар'єрах та розрізах, складають верстати шарошкового буріння трьох основних типорозмірів: СБШ-200 (10%), СБШ-250 (85%) та СБШ-320

(5%) [1]. Крім цього експлуатуються також верстати СБШ-250МНА-32, СБШ-250-55, 2СБШ-200-32, 2СБШ-200-40, 4СБШ-200-40, 3СБШ-200-60.

Широку популярність у всьому світі та в Україні отримали верстати 49-R, 60-R (Бюсайрус – Ipi), М-4 (Маріон), ДМ-М, ДМ-Н (Інгерсол-Ренд), GD – 100, GD-120 (Garden Denver), усі виробництва США.

Діалектика розвитку техніки взагалі, та верстатів шарошкового буріння зокрема [2], вказує на неминучість переходу кількісних досягнень в окремих галузях розвитку в якісні перетворення, реалізація яких дозволить підняти технічний рівень бурових верстатів у цілому.

Розвиток бурової техніки на базі накопиченого вітчизняного та зарубіжного досвіду буріння, експериментів та досліджень призвели до створення бурових верстатів третього покоління, якісними ознаками яких є нові функціональні та технологічні особливості.

До функціональних особливостей відносяться: автоматизовані системи керування процесом буріння з рядом пристроїв, що дозволяють забезпечити високі техніко-економічні показники. До таких пристроїв відносять: пристрої управління процесом буріння, пристрої автоматизації допоміжних операцій, регульовані приводи основних механізмів верстата.

До технологічних особливостей відносять: інформаційні та інформаційно-керуючі системи автоматизованого та автоматичного управління, що реалізуються із застосуванням мов програмування високого рівня.

Реалізація ідей автоматизації управління процесом буріння сучасними буровими верстатами, що експлуатуються в умовах, що змінюються випадковим чином, є сукупністю складних завдань аналізу, синтезу, оптимізації, які можна вирішити лише на основі сучасних засобів і методів автоматики та комп'ютерної техніки.

Шарошкове буріння здійснюється перекочуванням шарошки по вибою при обертанні долота. Зуби шарошки, набігаючи на забій, руйнують його ударом та різанням. «Математичний опис дійсного процесу впровадження шарошки в породу, що супроводжується руйнуванням останньої, з урахуванням пружних деформацій породи та зубів шарошки, в силу значної міри невизначеності протікання фізичних явищ, дуже важкий» [12].

Основними параметрами, що характеризують режим буріння, є: осьове зусилля подачі, P_{oc} ; частота обертання бурового ставу, $\omega_{врд}$, необхідну кількість стисненого повітря, що подається у вибій для видалення продуктів руйнування, Q_e . Усі фірми-виробники доліт дають усереднені рекомендації щодо максимально допустимого осьового зусилля навантаження долота $P_{oc \max}$ і відповідної даному зусиллю граничної частоти обертання долота $\omega_{вр \max}$, за яких забезпечуються задовільні умови їх експлуатації.

«Зуби шарошки періодично стикаються з породою і під дією осьового зусилля подачі кожен з них впроваджується в останню на певну глибину h (мм). Якщо долото має Z_w шарошок, кожна з яких контактує на довжині L (мм), загальна довжина ліній одночасного контакту зубів долота з породою буде $Z_w \cdot L$ » [8].

«Внаслідок вторинного подрібнення вже відокремленої від масиву породи загальна лінія контакту зубів шарошки ще більше збільшиться і приблизно може бути прийнята рівною половині діаметра долота D (мм)» [3].

«Осьове зусилля подачі P_{oc} (кН) на долото діаметра D для руйнування породи міцністю f має вигляд» [4]:

$$P_{oc} = 6 \div 8 \cdot [\sigma_{cm}] \cdot D \cdot 10^{-3}, \quad (1.1)$$

де $[\sigma_{cm}]$ - межа міцності породи при одновісному стисканні, МПа.

При бурінні фізико-механічні властивості гірських порід змінюються випадковим чином. Для підтримки оптимальних значень параметрів режиму буріння потрібне безперервне або дискретне регулювання. Для забезпечення оптимального режиму буріння необхідно адекватно регулювати осьове зусилля та частоту обертання бурового ставу за зміни міцності порід. Реалізація змін осьового зусилля та частоти обертання бурового ставу здійснюється за допомогою ВПМ, що дозволяє вирішувати завдання автоматизованого та автоматичного керування режимом буріння.

1.2. Аналіз вітчизняного та світового досвіду вдосконалення режиму буріння при реалізації проектних рішень.

Питаннями вдосконалення режиму буріння фахівці почали займатися з виникнення способу обертального буріння. За цей час розроблено не тільки безліч нових породоруйнівних інструментів, а й безліч методик їх більш ефективного застосування. Ціль цих робіт очевидна: прискорити процес будівництва свердловин і знизити собівартість метра проходки.

Традиційні методи вдосконалення режиму буріння ґрунтуються, як правило, на обробці, аналізі та узагальненні досвіду буріння, який може бути пасивним (статистичний аналіз роботи доліт за пробуреними свердловинами) або активним (результати спеціально спланованих випробувань технічних та технологічних новинок).

В основі статистичних методів лежить промислова інформація про вже відпрацьовані долота, яка обробляється за допомогою методів математичної статистики. Спочатку, при малому обсязі інформації, результатів проходки кількох свердловин було достатньо для встановлення більш ефективних режимів буріння. Проте зростання обсягів буріння, поява нових типорозмірів доліт і забійних двигунів,

ускладнення математичного аналізу призвело до збільшення обчислень, з чим не змогли впоратися технологічні служби підприємств. Внаслідок цього більша частина промислової інформації не оброблялася і досі не використовується належним чином.

Використання статистичних методів хоч і дозволяє поліпшити техніко-економічні показники будівництва свердловин [5-9], але дозволяє вибрати лише більш досконалий варіант режиму буріння з набору не завжди кращих, які в різних обсягах використовувалися на даній площі (родовищі).

Підставою для внесення змін до традиційної, для даної площі технології поглиблення, є встановлений досвідом факт ефективного застосування будь-якої новинки в техніці або технології буріння. Після проведення експертної оцінки вона вноситься до регламентуючого документа.

Для визначення ефективності процесу буріння свердловини найчастіше використовують значення швидкості чи вартості метра проходки. Режим буріння, у якому досягаються екстремуми цих функцій (максимум швидкості, мінімум вартості метра проходки) є оптимальним.

Існуючі методики знаходження оптимального режиму буріння можна поділити на три групи:

- моделювання процесу буріння на основі закономірностей, отриманих при вивченні руйнування гірських порід методом одиничного та статичного впровадження штампів в породу (як правило, в атмосферних умовах).
- методи, що ґрунтуються на попередньому дослідному визначенні базових залежностей.
- методи визначення оптимального поєднання доліт та параметрів режиму поглиблення свердловини на основі

математичного моделювання процесу відпрацювання долота.

1.3. Методика оптимізації режиму буріння на основі базових залежностей

Методи цієї групи представлені методиками, загальною ознакою яких є визначення залежностей, званих "базовими", одержуваних після проведення великої кількості дорогих промислових експериментів [10, 11].

Загальний вид залежностей:

$$v_{M0}=f(G, n); \quad T_e=f(G, n); \quad T_{on}=f(G, n); \quad v_{Mm}=v_{M0}f(t)$$

де v_{M0} - початкова механічна швидкість буріння;

T_e - вартість озброєння долота, що вимірюється часом роботи до повного зносу;

T_{on} - то же для опор долота;

v_{Mm} - поточна швидкість буріння як функція початкової механічної швидкості та часу (так званий декремент падіння швидкості буріння внаслідок зносу озброєння долота);

G - осьове навантаження на долото;

n - швидкість обертання долота.

Різні автори висувують свої підходи до визначення виду функцій базових залежностей. Але всі відзначають необхідність проведення експерименту в промислових умовах, при цьому потрібно провести довбання остаточно, тобто до повного зношування долота. При проведенні експерименту необхідно, щоб долото повністю відпрацювало в рівній пачці, за буримістю. Раніше, коли проходка на долото була невеликою (через малу стійкість), ці умови були здійсненні, тепер же при сучасних долотах, проходка яких часто становить понад 500 метрів, відпрацювати долото в однорідній за буримістю пачці

практично неможливо. Протягом дослідного довбання параметри режиму буріння мають бути незмінними. До того ж, необхідно провести кілька експериментів для того, щоб можна було стверджувати, що отримана базова залежність не є випадковою. Провести в одній свердловині кілька довбань в одних і тих самих умовах (параметри рідини для промивання, буріння порід) неможливо, а те, що в новій свердловині умови проведеного раніше досвіду повторяться, теж малоймовірно.

Більшість авторів [10, 12-15] залежність $v_{mo}=f(G,n)$ апроксимують функцією

$$V_{mo}=aG^{\alpha}n^{\beta}, \quad (1.1)$$

де a, α, β - постійні для даних умов величини, що визначаються за результатами промислових досліджень.

У літературі наводяться різні значення α і β , аналіз яких показує, що в залежності від конкретних умов руйнування породи величини α і β можуть змінюватися в широких межах: $0 < \alpha < 3$; $0,2 < \beta < 1$.

Для оцінки всіх умов буріння пропонується формула [10]

$$v_{mo} = \frac{aG^{\alpha}n^{\beta}}{1 + (bG)^k} \quad (1.2)$$

де b, k — коефіцієнти, величина яких визначається на думку автора роботи [10], якістю очищення вибою.

Залежність (1.2) - окремий випадок функції (1.3) при $b = 0$.

Залежності $T_{\epsilon}=f(G,n)$ і $T_{on}=f(G,n)$, найчастіше описуються наступними рівняннями [10]

$$T_{\epsilon} = \frac{t_{\epsilon}}{G^{\gamma}n^{\psi}} \quad (1.3)$$

$$T_{on} = \frac{t_{on}}{G^k n^{\lambda}} \quad (1.4)$$

де γ , Ψ , t_e , k , λ , $t_{оп}$ - константи, одержувані внаслідок проведення промислових досліджень, причому T_e і $T_{оп}$ - час буріння до зносу долота. Обчислити за даною формулою зношування долота в якийсь проміжний момент часу довбання неможливо.

Залежність $v_{mm}=v_{mo} f(t)$ описують як диференціальне рівняння [10]

$$\frac{dv}{dt} + \varphi v^b = 0 \quad (1.5)$$

з позитивними та постійними для заданих умов коефіцієнтами φ і b , що визначаються за результатами промислових досліджень.

Розглянуті вище базові залежності використовують у двох напрямках.

Перше передбачає попереднє визначення залежності поточної механічної швидкості $v_{mm}=v_{mo}f(t)$ та її використання для розрахунку критерію вибору, наприклад, рейсової швидкості. Вперше ця методика була запропонована В.С. Федоровим [16]. Величину v_{mm} пропонують визначати через початкову швидкість буріння $v_{mo}=f(G,n)$. Далі інтегруючи вираз для поточної проходки H_T :

$$H_T = \int_0^t v_{mm} dt \quad (1.6)$$

де t - час буріння отримують підрахунком показників процесу поглиблення свердловини для будь-якого поточного моменту часу або для кінця довбання, якщо $t=T$. Величину часу роботи долота до повного зносу визначають за однією з запропонованих у літературі формул $T_e=f(G, n)$ і $T_{оп}=f(G, n)$. Аналогічний розрахунок повторюють для інших поєднань n і G , набираючи таким чином масив розрахункових показників роботи долот.

Другий напрямок [11] відрізняється від першого тим, що при визначенні залежності $v_{mm}=v_{cp}$ замість початкової швидкості використовується величина середньої механічної швидкості за

довбання v_{cp} , і тому величина H_m обчислюється як добуток швидкості v_{cp} на час довбання. Як вважають автори цієї методики, такий прийом дозволяє відмовитися від визначення декременту падіння механічної швидкості в часі практично без шкоди для точності розрахунків.

Зі сказаного вище можна припустити, що методики знаходження оптимально режиму буріння існують. Однак, відповідно до методики [11] кількість «комплектів» базових залежностей визначається кількістю інтервалів рівної буримості помноженому на кількість конкурентоспроможних доліт для даного інтервалу і кількість варіантів компоновок бурильної колони. Провести таку кількість дослідів неможливо.

Незважаючи на гігантські зусилля НДІ тільки дуже малому числу досліджень груп [17] вдалося отримати приватні залежності, які з великою часткою обережності можна прийняти за базові. Як правило, промислові експерименти проводилися лише в окремих інтервалах буріння з низькою буримістю, і тому практично скрізь вирішувалося завдання приватної оптимізації технології поглиблення для деякого інтервалу буріння, а не всієї свердловини.

Досвід показав, що отримати шукані залежності в розумних часових рамках для всього розрізу свердловини практично неможливо. Метод пошуку оптимальних рішень на основі визначення базових залежностей, неможливо забезпечити інформаційно, оскільки зазначені базові залежності саме виступають у ролі інформаційної бази.

Базові залежності, застосування яких дозволяє, на думку авторів цієї методики, скласти оптимізаційні рівняння для визначення чисельних значень параметрів, що впливають, при використанні яких досягаються максимум рейсової швидкості або мінімум вартості метра проходки, слід віднести до спроби складання математичних моделей процесу буріння.

Важливо підкреслити, що методики, що передбачають визначення базових залежностей, по суті не ґрунтуються на оцінці ступеня скоєння руйнування породи, очищення вибою, впливу диференціального тиску. Вони за визначенням не дозволяють екстраполювати знайдені дослідні залежності на інші геолого-технологічні умови та інші типи доліт. Справа в тому, що згідно [11] для кожної пачки однорідних порід потрібно проведення цілого комплексу досліджень з різними долотами і параметрами режиму буріння.

Зі сказаного випливає, що аналізований метод не має реальних надій на корисне застосування.

1.4. Метод, заснований на математичному моделюванні процесу буріння

До цієї групи слід віднести методи аналізу та моделювання процесу буріння, де використовується параметр δ - проходка долота за один оборот.

Багато дослідників зверталися до величини δ , якщо виникала необхідність глибшого вивчення процесу. Наприклад, В.С. Федоров [16] порівнював отриману в експерименті середню величину з висотою зуба долота. Л.А. Шрейнер і Гань Чжи-Цзянь [18] результати буріння на стенді представили як залежності $\delta(n)$.

Одним із перших метод аналізу процесу за допомогою залежності $\delta(g)$ застосував Лінген [19]. Згодом ним скористалися Фінстра та Лювен [20] і, нарешті, М.Г. Бінгхем [21].

Фінстра та Лювен скористалися залежністю $\delta(g)$ при обробці результатів стендових досліджень впливу параметрів режиму буріння та вибійних умов на процес руйнування непроникних порід. Це дозволило їм не тільки виявити низку нових фактів, а й значно спростило обробку та виклад матеріалу.

М.Г. Бінгхем [21] запропонував аналізувати процес руйнування порід за допомогою залежності $\delta(g)$, графік якої після лінійної апроксимації він назвав діаграмою буріння.

Діаграма буріння - це залежність проходки долота за один оборот δ від питомого (наведеного до одиниці діаметра долота) осьового навантаження g .

М.Г. Бінгхем стверджує, що залежність $\delta(g)$ є критеріальною стосовно первинної залежності механічної швидкості буріння від параметрів режиму буріння.

Процес руйнування порід на вибої описується цілим рядом параметрів:

- механічна швидкість буріння v_M (параметр, що характеризує результат процесу);
- навантаження на долото G ;
- швидкість обертання n ;
- діаметр долота D ;
- диференційний тиск на вибої $p_{диф}$
- міцність породи, що оцінюється твердістю порід p_w або міцністю на стискання p_{cm} ;
- вміст твердої фази у розчині;
- реологічні та технологічні параметри розчину;
- витрата промивної рідини Q .

Останні вісім параметрів – це величини, що впливають на процес.

М.Г. Бінгхем розвинув метод аналізу графіка залежності $\delta=f(g)$ при бурінні шарошковими долотами, по суті, до теорії буримості. Основні результати його досліджень зводяться до наступного:

- застосування залежності $\delta(g)$ дозволяє систематизувати безліч приватних залежностей $v_M(G, n)$, отриманих у різних геолого-технічних умовах;
- для кожного типу озброєння долота існує верхнє граничне положення графіка залежності $\delta(g)$, відповідне буріння в атмосферних умовах з промиванням водою або продуванням. Графіки залежності $v_M(g)$, отримані при різних n такими властивостями не володіють;
- існування верхнього граничного положення залежності $\delta(g)$ надають їй характер діаграми, коли про особливості конкретно протікаючого процесу судять по тому, як вони розташовуються на діаграмі буріння;
- при досконалій очистці вибою залежність $\delta(g)$ можна апроксимувати двома прямими, одна з яких виходить з початку координат або з точки близько до нього розташованої, а продовження другої, яку Бінгхем називає «робочою» лінією, відсікає від осі g позитивний відрізок $0g_0$, що є (при бурінні новим долотом) еквівалентом міцності породи. Використання прийому заміни кривої двома прямими він надає настільки важливого значення, що свою теорію навіть назвав «методом лінійної апроксимації»;
- при «недосконалому» очищенні вибою дослідні точки утворюють лінії, що відхиляються вниз від другої зі згаданих прямих;
- кожне долото може бути оцінено «коефіцієнтом ефективності» $m_{\text{еф}}$, який підраховується на підставі кутового коефіцієнта робочої лінії K_v при бурінні долотом без зношування з промиванням водою в атмосферних умовах та величини g_0 ; $m_{\text{еф}} = K_v g_0^{0,5}$, причому $m_{\text{еф}}$ залежить, на думку М.Г. Бінгхема, від зносу озброєння долота;
- величини кутового коефіцієнта робочої лінії K_v (відношення $\Delta\delta$ до Δg) та g_0 залежать від типу озброєння долота, типу бурового розчину,

величини тиску на вибій, інтенсивності промивання та швидкості обертання долота;

- при зміні швидкості обертання долота n або заміні його на долото з іншим ковзанням зубів (зміні типу озброєння) змінюються величини кутових коефіцієнтів прямих, але величина g_0 залишається незмінною.

- у міру зменшення висоти зубів долота в результаті їх зносу зростає величина g_0 і зменшуються кутові коефіцієнти прямих;

- відношення кутових коефіцієнтів робочої лінії та початкової, на думку М.Г. Бінгхема, завжди дорівнює 2.

Пошук методики моделювання процесу буріння шарошковими долотами продовжив П.Ф. Осипів. Основні результати його досліджень опубліковані в роботах [22-26]. Запропонована П.Ф. Осиповим методика моделювання заснована на прогнозуванні видозміни діаграми буріння під впливом природних та технологічних факторів. Роботи П.Ф. Осипова продовжив та та доповнили інші вчені [27-30].

На рис. 1.1 показано загальний вигляд діаграми буріння.

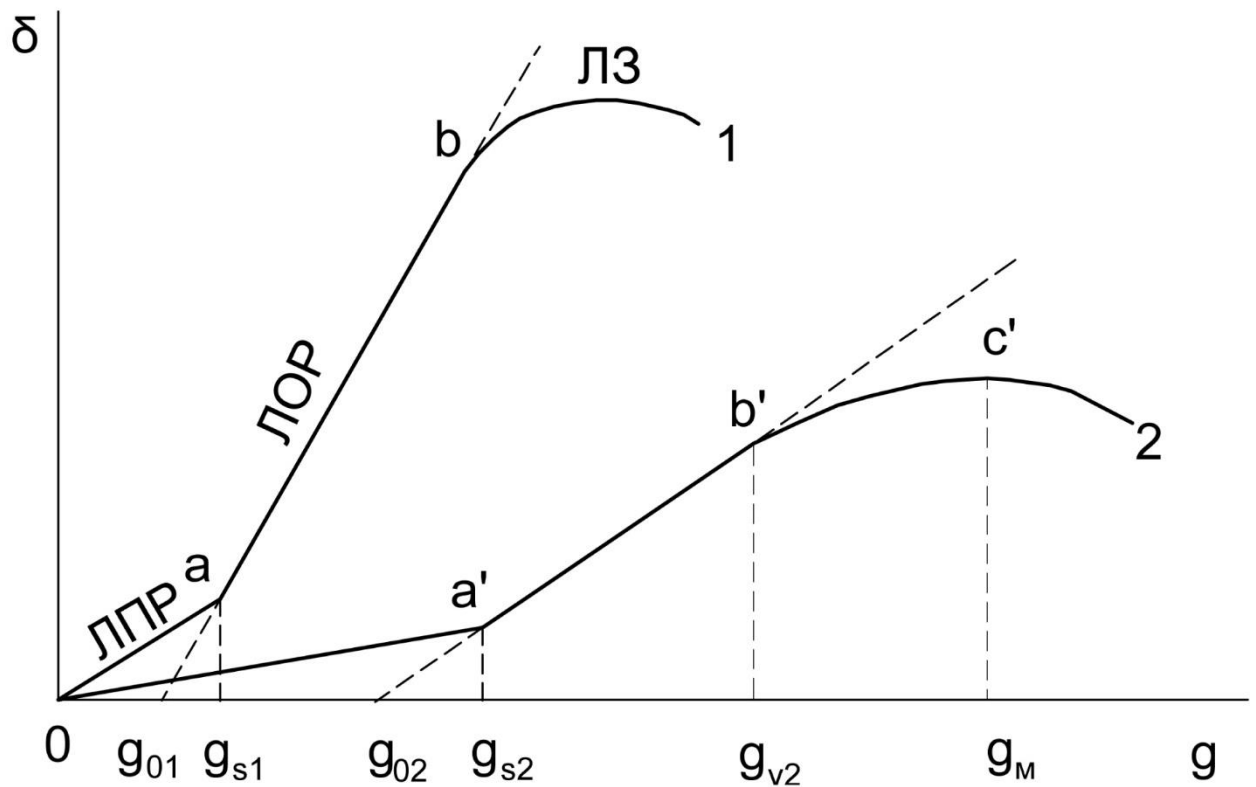


Рис. 1.1. Загальний вид діаграми буріння:

1 – буріння в атмосферних умовах; 2 - буріння у вибійних умовах

Видно, що загальний вигляд залежності $\delta(g)$, отриманої в забійних умовах, представлений тими ж елементами, що і аналогічна залежність, отримана при бурінні в атмосферних умовах. Відрізняються вони лише тим, що друга лінія розташовується нижче за першу. На тій та іншій залежності виділяються:

- лінії поверхневого руйнування (прямі $0a$ та $0a'$), які П.Ф. Осіпов позначив як ЛПР (за Бінгхемом - це вторинна робоча лінія);
- лінії об'ємного руйнування (прямі ab і $a'b'$), названі ЛОР (за Бінгхемом - це робоча лінія);
- питоме осьове навантаження на долото g_s , що відповідає переходу від поверхневого режиму руйнування до об'ємного, називається критичним питомим осьовим навантаженням;

- питоме осьове навантаження g_v , що відповідає початку відхилення дослідної лінії від ідеальної ЛОР; лінії при $g > g_v$ називається "лінією уповільнення", оскільки на цій лінії відбувається явне уповільнення приросту δ ;
- питоме осьове навантаження g_m , що відповідає максимуму δ_m ;
- міра реальної міцності породи - відрізок $0g_0$, що відсікається від осі питомого осьового навантаження продовженням;
- кутовий коефіцієнт ЛПР K_s (відношення δ/g) як міра ефективності буріння в режимі поверхневого руйнування вибою;
- кутовий коефіцієнт ЛОР K_v (відношення $\delta/(g-g_0)$) як міра ефективності буріння в режимі об'ємного руйнування вибою.

Основні результати досліджень П.Ф. Осипова, який узагальнив результати дослідного буріння як на стенді, так і в промислових умовах, а також провів широкі стендові дослідження гідромоніторних струменів та фільтраційних процесів на вибої, зводяться до наступного:

- існує критична швидкість обертання долота $n_{кр}$, і якщо $n < n_{кр}$ $\delta = const$, тобто діаграма буріння не змінюється, не реагує на зміну n ; інакше кажучи, такі діаграми набувають властивості граничних діаграм;
- граничні діаграми буріння, отримані в одних і тих же умовах, але різними типами озброєння шарошок, розташовуються в строго певному кількісному співвідношенні один до одного, причому вище за всіх розташовується діаграма буріння для озброєння типу М, нижче всіх - типу ОК, інші - між ними;
- при бурінні тих самих порід в умовах, коли диференціальний тиск $P_{диф} = 0$, $n_{кр}$ завжди більше, ніж при $P_{диф} > 0$;
- вплив зносу долота на діаграму буріння відбивається зміщенням показника міцності порід g_0 до деякого граничного значення $g_{a.пр}$, причому збільшення g_0 супроводжується зменшенням кутових

- коефіцієнтів ліній на діаграмі буріння;
- процес зносу долот (і озброєння та опори) слід описувати методом обліку витрачання ресурсу долота, а не часом його роботи до повного зносу; на відміну від функцій, запропонованих у методі "базових" залежностей, отримані П.Ф. Осипові формули дозволяють визначити поточний знос долота в будь-який момент часу.

Модель буріння, запропонована П.Ф. Осиповим, полягає в кількісному описі видозміни кутових коефіцієнтів ЛОР і ЛПР і g_0 протягом довбання залежно від n , інтенсивності промивання вибою, зносу долота, диференціального тиску, зміни буримості порід, при цьому довбання має проходити поза зонами інтенсивних коливань.

Функціонування будь-якої моделі, зокрема моделі роботи шарошкового долота, передбачає її інформаційне забезпечення. На стадії розробки проекту поглиблення свердловини етапи підготовки інформації та її використання в моделі (для пошуку оптимальних рішень) здійснюються послідовно. Вирішення задачі оптимізації в процесі оперативного управління передбачає поєднання роботи моделі зі збором та обробкою інформації, що надходить у ході відпрацювання долота.

Щоб визначити оптимальний режим буріння за запропонованою методикою [26] необхідно зробити дуже багато обчислень, вручну це практично неможливо. Тому необхідно скласти алгоритми обчислень та реалізувати їх програмно.

1.5. Аналіз методик оптимізації режимів буріння та досвіду їх

застосування під час оперативного управління бурінням

Елементи оперативного управління технологією поглиблення свердловини виявляються тоді, коли робиться спроба відкоригувати у бік оптимальних проектні параметри режиму буріння на підставі оперативної інформації, отриманої в процесі буріння свердловини, та реалізувати їх у поточному чи майбутньому довбанні.

З усього різноманіття факторів, що характеризують умови роботи долота на вибої, деяку частину становлять некеровані (наприклад, властивості порід, тип приводу).

Інша частина факторів, що характеризує умови роботи долота, - це фактори, які можна і доцільно змінювати у взаємодії долота з породою. До них, перш за все, слід віднести осьове навантаження G , кількість обертів долота в хвилину n , кількість і якість рідини для промивання (тобто параметри режиму буріння), час перебування долота на вибої.

Тому, розглядаючи питання оперативного управління процесом буріння, виділимо два головні: питання оптимізації параметрів режиму буріння та питання визначення раціонального часу роботи долота.

Численні фактори, від яких залежить значення оптимальних параметрів режиму буріння та раціонального часу перебування долота на вибої, зазвичай суттєво варіюються навіть у ході одного довбання. Деякі з них (такі, як знос робочих елементів долота) змінюються закономірно, зміна інших (наприклад, властивостей порід) носить випадковий характер. Тому оперативне управління поглибленням свердловини дасть значний ефект.

У загальному випадку оперативний метод управління процесом буріння можна розбити на наступні етапи:

- збір необхідної інформації про процес;

- обробку інформації та її використання за методикою, яка передбачає отримання відповідної рекомендації про раціональне значення того чи іншого керованого параметра;
- вибір раціонального значення керованого параметра та його застосування у реальному процесі.

Отже, ефективність оперативного управління істотно залежить від обсягу та якості інформації, а також, не меншою мірою, від правильності прийнятих методів її обробки.

В даний час бурильник ще не скрізь має засоби отримання інформації про процес буріння достатнього обсягу і якості.

Найбільший ефект і точність визначення значень параметрів буріння дає застосування комп'ютерних станцій геолого-технологічного контролю.

Щодо методів обробки цієї інформації, то вона здійснюється на підставі накопиченого досвіду та рівня методичної підготовленості виконавців. Величезна кількість даних, що надходять з датчиків, не обробляється належним чином. Що стосується рекомендацій щодо оптимізації режиму буріння на основі отриманої інформації, то оператор може дати їх тільки на інтуїтивному рівні та на основі свого особистого досвіду.

Оперативне управління відрізняється від проектування лише тим, що зміни до регламенту поглиблення свердловини вносяться у процесі буріння. Розрахунок режимів буріння при оперативному управлінні ґрунтується на тому, що інформація надходить безпосередньо з свердловини, що бурить, в той час як при проектуванні ґрунтуються на інформації, отриманій при проведенні сусідніх свердловин.

Відмінності у методиках знаходження оптимальних режимів буріння при оперативному управлінні та проектуванні немає. Відмінності полягають лише в інформаційному забезпеченні та часі

реалізації отриманих рішень. Таким чином, оперативне управління режимом буріння, якщо пошук і реалізація рішень здійснюється із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, в принципі нічим не повинно відрізняється від звичайного, за винятком часу, що відводиться на пошук оптимального режиму буріння, та особливостей інформаційного забезпечення. Отже, вирішення завдання розробки методики інформаційного забезпечення математичної моделі [26] та її комп'ютерної програми, що реалізує її, вирішить одночасно всі принципові проблеми оперативного управління поглибленням свердловини.

1.6. Структура управління процесом буріння породного масиву

Буровибухові роботи на відкритих гірничих розробках є складним процесом, тісно пов'язаним з усіма комплексами робіт гірничого підприємства, що входять до АСУ ТП. Завдання управління цим процесом є досить складним і, на думку вчених [31, 32], може бути вирішено лише за допомогою методів теорії великих систем (системотехніки, дослідження операцій, моделювання систем тощо).

Управління процесом буріння породного масиву умовно можна поділити на три рівні:

- технологічний – на рівні бурових верстатів;
- організаційно-технологічний - оперативно-диспетчерський
- управління на рівні ділянок, вибоїв, бригад;
- організаційний - планування та управління буровими роботами на рівні гірничого підприємства.

При обурюванні породного масиву буровими верстатами шарошкового буріння виконуються такі технологічні операції: встановлення верстата на заданій позначці, горизонтування, буріння,

нарощування (розбирання) бурового ставу, заміна зношеного інструменту, зміна місця стояння.

На технологічному рівні управління процесом буріння породного масиву можна виділити три режими:

- формування свердловини – режим «Буріння»;
- керування параметрами буріння - «Режими впливів, що задають»;
- управління допоміжними операціями – режим «Технологічна підтримка процесу буріння».

На рис. 1.2 представлена структура управління процесом буріння породного масиву на відкритих гірничих роботах на технологічному рівні.

У режимі «Буріння» виділяються такі завдання: «Свердловина» та «Параметри свердловини». У задачі «Свердловина» задається глибина свердловини та вибирається долото. У задачі «Параметри свердловини» враховуються швидкість буріння та зношування долота (прохідка на долото).

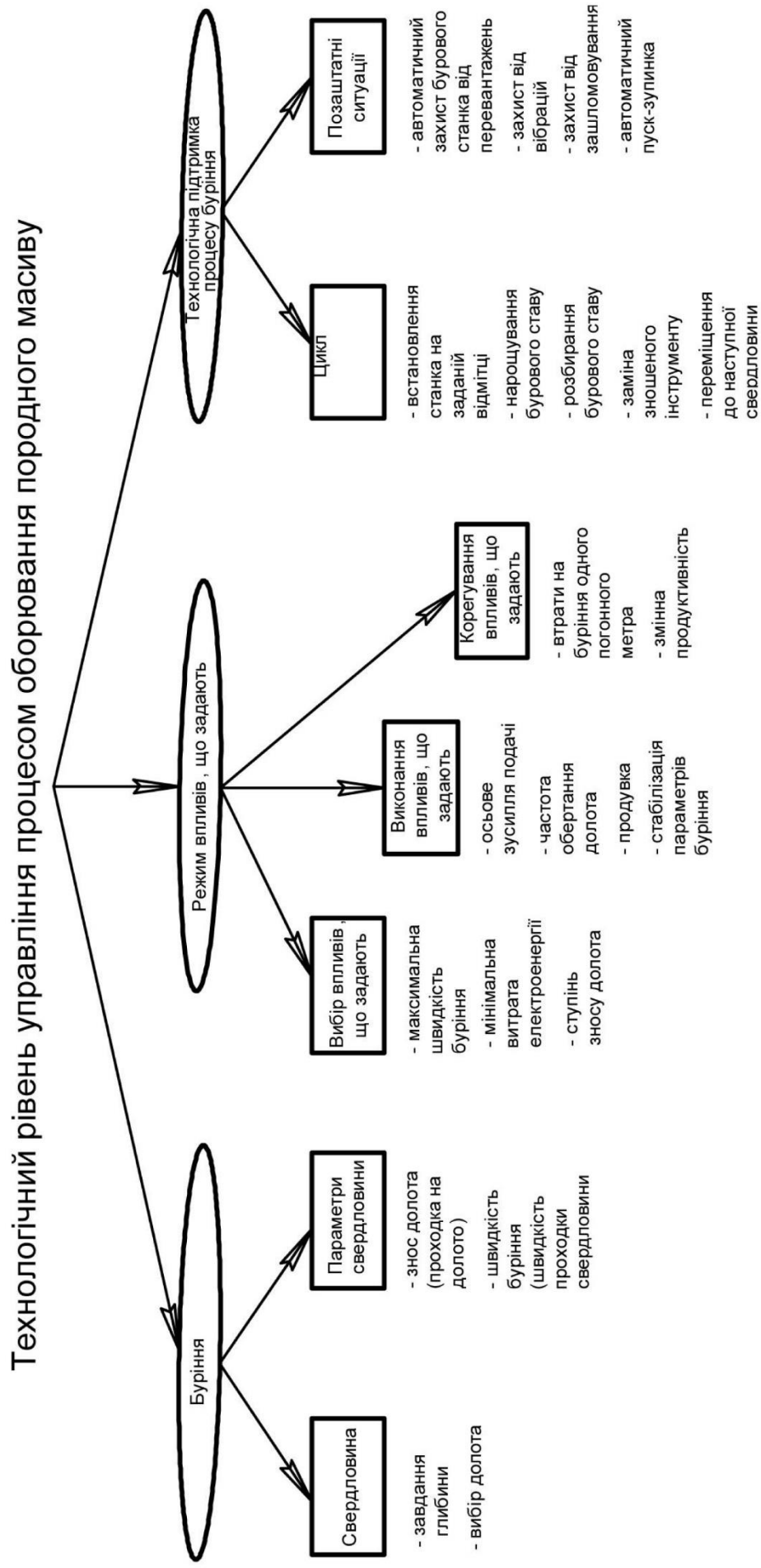


Рис. 1.2. Структура управління процесом буріння породного масиву

У «Режимах впливів, що задають» виділяються такі завдання: вибір впливів, що задають (ВЗВ) - оптимізація параметрів буріння; виконання впливів, що задають (ІЗВ) - стабілізація параметрів буріння; корекція впливу (КЗВ), що задають - корекція параметрів буріння. Підзавданням вибору впливу (ВЗВ) є оптимізація за оперативно вимірюваними критеріями оптимальності (локальна оптимізація): максимальної швидкості буріння, мінімальної витрати електроенергії, ступеня зносу долота.

Виконання впливів, що задають (ІЗВ) полягає в підтримці заданих режимів осьового зусилля подачі, частоти обертання долота, продування свердловини і в стабілізації параметрів буріння. Реалізація режимів осьового зусилля подачі та частоти обертання долота конструктивно здійснюється за допомогою обертально-подавального механізму.

Вирішення завдань корекції впливу (КЗВ) передбачає оптимізацію за критеріями оптимальності, які не можуть бути виміряні оперативно: витрати на буріння одного погонного метра свердловини, змінна продуктивність верстата.

У режимі "Технологічна підтримка процесу буріння" виділяються два завдання:

- управління циклічними операціями – цикл;
- захист об'єкта від перевантажень та аварій - Позаштатні ситуації.

До складу «Цикл» входять такі підзавдання: встановлення верстата на заданій позначці, нарощування бурового ставу, розбирання бурового ставу, заміна зношеного інструменту, переміщення до наступної свердловини.

"Позаштатними ситуаціями" виконуються: автоматичний захист бурового верстата від перевантажень, вібрацій, автоматичний пуск - зупинка.

Вирішення цих завдань управління процесом буріння породного масиву забезпечується за допомогою виконавчих пристроїв (ВП) та датчиків (Д). Виконавчі пристрої (ВPM) виконують команди, що надходять від оператора-машиніста, який у свою чергу отримує інформацію про процес буріння з датчиків: швидкість буріння - Dv_0 , осьового зусилля - Dp_{oc} , встановлених у механізмі подачі; частоти обертання - $D\omega_{вр}$, датчика обмеження моменту - D_o , встановлених у обертачі долота; вібрацій - D_v , встановленого на щоглі бурового верстата та датчиків стану типу «включено - вимкнено», встановлених у механізмах подачі, обертання долота, ходу та в системі горизонтування верстата, індикатори яких розташовані на штатній бортовій приладовій панелі верстата.

Оперативне управління буровим верстатом можливе тільки в задачі «Виконання впливів, що задають» на етапі «Режими впливів, що задають».

«Виконання дій, що задають» може бути реалізовано за допомогою обертально-подавального механізму, що працює на основі:

- засобів гідро-, електро- та пневмоавтоматики, що не володіють пам'яттю та логікою;
- поєднання з автоматизованими системами управління на базі ЕОМ;
- елементів автоматики, що не мають пам'яті, але містять вбудовані засоби мікропроцесорної техніки.

Запропонована структура дозволяє намітити завдання та методи оптимізації управління процесом буріння породного масиву на основі організаційних, організаційно-технологічних та технологічних заходів.

1.7. Аналіз систем керування процесом шарошкового буріння

Відомо, що автоматичне управління - процес управління об'єктом, при якому операції, що забезпечують досягнення заданої мети, виконуються системою, що функціонує без втручання людини відповідно до заздалегідь заданого алгоритму. Автоматичне керування реалізується в системах автоматичного керування (САУ) - сукупності автоматичного керуючого пристрою та керованого об'єкта.

САУ поділяються на системи: автоматичного регулювання (САР), завдання яких входить підтримання постійного значення керованої величини; програмного управління, де керована величина змінюється за заданою програмою; стежачі, котрим програма управління заздалегідь невідома і характер поведінки системи залежить від зміни умов функціонування об'єкта управління; адаптаційні або самопристосовні.

Системи автоматичного управління буровими верстатами за кількістю задають (керуючих) впливів відносяться до двоканальних (P_{oc} і $\omega_{врд}$) і здебільшого є системами зв'язкового (залежного) управління, в яких керуючі впливи перетворюються на функції, що зв'язують їх між собою.

Буровий верстат шарошкового буріння має приводи подачі та обертання. Перший реалізує зусилля та швидкості подачі бурового ставу. Другий забезпечує крутний момент на валу обертача та швидкість обертання долота. Продукти руйнування видаляються водою, повітрям чи їх сумішшю. Режим роботи верстата характеризуються значеннями технологічних параметрів буріння (ТПЛ).

Буровий верстат функціонує в умовах високої невизначеності, викликаної головним чином випадковими чергуваннями гірських порід, що розробляються, внаслідок чого машиніст бурового верстата часто

не в силах забезпечити оптимальність режимів буріння. Він змушений приймати важливі технологічні рішення (призначати режими буріння, визначати час роботи долота та його заміни, вибирати тип долота тощо), перебуваючи у стані інформаційної невизначеності. Неоптимальні дії машиніста можуть призводити до негативних наслідків у всіх залежних ланцюжках робіт, оскільки буріння є невід'ємною частиною всього комплексу буропідливних робіт.

Для апріорного вибору оптимальних значень параметрів у роботі [33] використовується критерій мінімальної собівартості буріння. Машиніст бурового верстата за допомогою системи контролю режимних параметрів має встановити їх оптимальні значення залежно від властивостей бурих порід. В основі зазначеної системи лежить ідея компенсації дрейфу мінімуму собівартості при варіаціях фізико-механічних властивостей порід, що обурюються.

Системи, описані в [34, 35], базуються на використанні критерію оптимальності – максимальної швидкості буріння. Недоліком є те, що у багатьох випадках буріння екстремум механічної швидкості буріння не досягається з міркувань міцності бурового ставу, а також у зв'язку з різким зменшенням стійкості доліт у разі взаємної невідповідності деяких граничних значень параметрів осьового зусилля та частоти обертання.

У роботі [36] запропоновано спосіб оптимізації параметрів буріння, заснований на пошуку штучних екстремумів швидкості, що збігаються з областями мінімуму собівартості буріння. Точність досягнення дійсного мінімуму собівартості повністю визначається достовірністю статичної моделі процесу. У цьому сенсі зазначена система еквівалентна раніше розглянутим системам з компенсацією дрейфу екстремуму собівартості буріння шляхом програмного регулювання параметрів, але є складнішою (необхідний екстремальний регулятор).

Однак жодна з описаних систем не набула широкого практичного застосування, оскільки створення ефективних систем автоматичного управління можливе лише за наявності об'єктивної інформації про параметри процесу буріння у вибої свердловини.

1.8. Сучасний стан способів керування параметрами режиму буріння

Управління обертально-подавальним механізмом бурового верстата є складною системою, функціонування якої носить нестационарний характер з випадковим чергуванням впливів, що обурюють [37]. У зоні оптимальних режимів верстат працює близько 5-10% робочого часу, на пошук яких при ручному управлінні оператор витрачає до 15-20% часу буріння, а при оцінці оптимальності режимів буріння, що призначаються, його помилки досягають 90 - 100%.

Це зумовлено наступними обставинами:

- складністю об'єкта управління, оскільки він не повністю спостерігаємий;
- неточностями, що вносяться до вимірювання похибок;
- часом спрацьовування та відмови датчиків і перешкодами в каналах зв'язку;
- неоднозначністю інтерпретації ситуацій через можливі комбінації процесів та явищ.

Автоматизоване керування процесом буріння забезпечить максимальне наближення параметрів до оптимальних значень за мінімальних витрат на їх пошук, що дозволить суттєво підвищити техніко-економічні показники роботи бурового верстата.

Проблема реалізації автоматизованого обертально-подавального механізму верстата шарошкового буріння включає два діалектично пов'язані завдання:

- розробку способу керування параметрами буріння;

- програмну реалізацію розробленого способу.

Спосіб управління параметрами режиму буріння є сукупністю алгоритмів регулювання осьового зусилля подачі бурового ставу і частоти обертання долота при випадковій зміні зовнішніх умов.

На сьогоднішній день сформувалося три групи способів керування параметрами режиму буріння:

- засновані на автоматичному регулюванні параметрів буріння за апіорною моделлю (програмне управління);
- що використовують активний багатоканальний пошук локальних та глобальних екстремумів критерію оптимізації (екстремальне управління);
- засновані на використанні апіорної моделі буріння та пошуків екстремуму оптимізації (програмне та екстремальне управління).

Під апіорною моделлю буріння прийнято розуміти аналітичний функціональний зв'язок між силовими (осьове зусилля подачі, момент, що крутить) і кінематичними (частота обертання) параметрами режиму буріння, що забезпечує оптимальне (або близьке до оптимального) перебіг процесу буріння в породах із змінними фізико-механічними властивостями.

До параметрів буріння відносяться: зусилля подачі бурового ставу на забій, P_{oc} ; частота обертання бурового ставу, $\omega_{врд}$, момент обертання бурового ставу, $M_{вр}$; швидкість буріння свердловини, V_d , проходка на долото, H_d , витрата повітря для очищення свердловини, Q_v . Зважаючи на те, що сучасні бурові верстати оснащуються гвинтовими продувними компресорами постійної продуктивності, витрата повітря використовується в апіорній моделі тільки як обмежуючий фактор [38, 39].

Функціональні зв'язки апріорної моделі формуються на основі інформації, отриманої внаслідок попередніх досліджень режимів буріння в конкретних гірничо-геологічних умовах. При цьому виходять із припущення, що зміна всіх керованих параметрів буріння має здійснюватися у вигляді функції від одного з фізико-механічних властивостей породи, що розробляється, наприклад, від міцності породи, що характеризується коефіцієнтом f за шкалою проф. М.М. Протодьяконового виду [31]:

$$P_{oc} = P'_{oc} + a \cdot f \quad 1.7$$

$$\omega_{epd} = \omega'_{epd} + b / f \quad 1.8$$

$$V_d = V'_d + c / f \quad 1.9$$

де P'_{oc} , ω'_{epd} , V'_d - початкові умови; a , b , c – коефіцієнти, що залежать від властивостей буримих порід, типу долота тощо.

Зважаючи на те, що міцність порід у процесі буріння не піддається прямому виміру, переходять до непрямого виміру коефіцієнта f . Величину f пропонують оцінювати або за величиною осьового зусилля, що встановилося, P_{oc} , або за швидкістю буріння V_d [40-42]. Тоді вихідна модель буріння набуває вигляду

$$P_{oc} = \varphi_1(V_d) \quad 1.10$$

$$\omega_{epd} = \varphi_2(P_{oc}) \quad 1.11$$

Іншим підходом до формування апріорної моделі буріння є стабілізація окремих параметрів чи їх поєднань.

Запропоновано моделі буріння [31, 43-47], засновані на підтримці постійними швидкості буріння, що припадає на одиницю частоти обертання та потужності, що витрачається на обертання бурового ставу, а також апріорні моделі, що підтримують постійним добуток скалярних величин та частоти обертання бурового ставу.

Апаратна реалізація способів, заснованих на апіорній моделі буріння, представлена автоматичними системами стеження та регулювання параметрів буріння на основі засобів електро- та гідроавтоматики.

Розробку автоматичних систем регулювання на основі засобів електроавтоматики зазвичай здійснюють для конкретних моделей бурових верстатів з урахуванням конструктивного виконання їх обертальних механізмів.

Способи управління процесом буріння, що використовують вибір режимів буріння на основі активного пошуку екстремумів критерію оптимізації, не вимагають побудови апіорної моделі буріння. Пошук оптимуму ведуть одним із відомих методів: Гаусса-Зайделя (почерговий пошук), крутого сходження, якнайшвидшого спуску, градієнта, релаксації [31].

Сутність способів зводиться до послідовної стабілізації та варіювання параметрів буріння з пошуком екстремуму критерію оптимізації [48-50]. Основним елементом оптимізаційних систем служить обчислювальний пристрій, що оперативно визначає критерій оптимізації та формує керуючі впливи на пристрої регулювання режимів буріння [49, 51].

Третя група способів управління параметрами буріння - на основі апіорної моделі та пошуку - являє собою поєднання способів першого та другого типів: метод стандартних режимів та метод екстремального пошуку. Метод стандартних режимів полягає в ідентифікації міцності буримої породи за апіорною залежністю f від V_d при постійних значеннях P_{oc} та $\omega_{врд}$ з наступним встановленням наперед визначених для неї оптимальних режимів [52]. Метод екстремального пошуку оптимального режиму заснований на встановленні функціонального

зв'язку між параметрами буріння за критерієм оптимізації, що обчислюється [53, 54].

Автоматизовані системи управління, що реалізують третю групу способів, включають дві підсистеми: підсистему регулювання режимів буріння і керуючу підсистему. Перша має виконання аналогічне системам, що використовують апіорну модель буріння. Друга підсистема може бути заснована як на гідро-, електро- та механічних регуляторах (при регулюванні з ідентифікацією) [55. 56], так і включати до свого складу екстремальні регулятори (екстремальний пошук) [57, 58].

На думку акад. К.В. Фролова, створення систем, в яких «тісно переплелися механічні та інформаційно-обчислювальні процеси», а «керуючі електронні пристрої органічно входять до загальної конструкції машини [59], дозволить вирішити одну з основних суперечностей розвитку сучасної техніки: прагнення до підвищення якості функціонування, що веде до ускладнення конструкції, з одного боку, та необхідність збільшення надійності та економічної ефективності, що потребує її спрощення, - з іншого».

Вирішальний вплив на систему керування автоматизованим обертально-подавальним механізмом бурового верстата надає вибір критерію оптимізації, покладений в основу способу керування процесом шарошкового буріння.

1.9. Аналіз методів розрахунку параметрів шарошкового буріння

Питання вибору раціональних параметрів режиму шарошкового буріння залежно від фізико-механічних властивостей гірських порід останнім часом приділяється достатньо уваги, оскільки це пов'язано з принципами управління режимами буріння. На сьогодні відома велика

кількість принципів управління та оптимізації систем управління буровими верстатами. Їх можна поділити на три групи [31]:

- принципи, що ґрунтуються на використанні вихідної (апріорної) моделі буріння;
- принципи, що базуються на вихідній моделі та активному пошуку оптимуму за окремими технологічними параметрами буріння;
- принципи, які використовують лише активний пошук оптимуму.

Перші є безпошуковими, пасивними та виконують залежну оптимізацію режимів буріння, використовуючи принципи зв'язкового регулювання кількох вхідних величин. Другі є спеціальним класом, який виконує залежну оптимізацію при зв'язному регулюванні параметрів буріння. У третій групі використовується активний пошук та незалежна оптимізація при автономному регулюванні параметрів буріння.

Принципи відрізняються порядком вибору вихідних параметрів буріння та процедурою підтримки їх оптимальних значень у умовах, що змінюються.

Наприкінці 50-х років. з'явилися перші дослідження з технології шарошкового буріння на відкритих гірничих роботах. До них належать роботи Н.В. Мельникова, Б.А. Сімкіна, А.Ф. Суханова, П.П. Назарова, Ю.А. Нанкіна, В.Д. Буткіна, Б.М. Кутузова та інших вчених.

У цих роботах процес буріння представлений як найвигідніше поєднання трьох параметрів: осьового зусилля P_{oc} на долото (зусилля подачі бурового ставу на вибій), його кутової швидкості $\omega_{врд}$ (частоти обертання бурового ставу) та кількості стисненого повітря $Q_в$, що подається у вибій [60].

Необхідною передумовою розрахунку оптимальних параметрів буріння є знання і математичний опис загальних закономірностей руйнації гірських порід шарошковим долотом. Спостерігається два підходи до вивчення зазначених закономірностей:

- теоретичний розгляд механізму руйнування гірських порід на основі законів теорій пружності, пластичності, гідродинаміки, класичної механіки та інших наук;
- експериментально-статистичне отримання даних про руйнування гірських порід у лабораторних та натурних умовах з подальшою побудовою на цій основі аналітичного апарату для прогнозування показників процесу буріння.

Знання закономірностей руйнування гірських порід та характеристик працездатності шарошкових доліт є необхідною, але недостатньою умовою для визначення оптимальних параметрів процесу буріння.

У роботах [31, 34-36, 60-63] містяться наближені рішення задачі стосовно місцевих умов, для яких вдалося отримати вихідний експериментальний матеріал.

Від режиму буріння істотно залежить вібрація бурового верстата, його продуктивність та зносостійкість бурового інструменту. У відомих публікаціях часто наводяться дещо суперечливі дані. У різних авторів немає єдиної думки про рівень нормальності чи ненормальності режимів буріння. Остроушко І.А. [64] рекомендує застосовувати значення питомих осьових тисків від 4000 до 12000 Н на 1 см діаметра долота залежно від типу буримих порід. Ці значення отримані на основі обробки великого обсягу експериментальних даних виходячи з граничних значень міцності елементів шарошкових долот.

Приблизно такі ж величини питомих осьових тисків Н на 1 см діаметра долота рекомендується Буткіним В.Д. [65] та Сімкіним Б.А. [66].

На підставі досліджень [64-66] при бурінні м'яких порід міцністю $f=4-6$ можна рекомендувати [67] наступні питомі осьові зусилля подачі бурового ставу Δp , що припадають на 1 см діаметра долота: $\Delta p=5000-$

6000 Н/см при $n = 180-240 \text{ хв}^{-1}$; для порід середньої міцності $f=10-12$, $p=8000-11000 \text{ Н/см}$ при $n=100-140 \text{ хв}^{-1}$; для міцних порід $f=16-18$, $p=12000-15000 \text{ Н/см}$ при $n=60-100 \text{ хв}^{-1}$. Швидкість обертання бурового ставу на м'яких породах $f=4-5$ можна рекомендувати $n=120-140 \text{ хв}^{-1}$, а для болю міцних порід $f=7-8$ $n=90 \text{ хв}^{-1}$. Такі режими буріння забезпечують максимальну продуктивність шарошкового буріння, мінімальний знос ріжучого інструменту і мінімальну вібрацію в режимах буріння, що встановилися. Однак при цьому входження верстата в резонансні (нестационарні) режими вібрації бурового ставу не виключено.

З метою зниження вібрації верстатів шарошкового буріння роботи з управління режимами буріння виконували Равцов М.В. [68-73]. Автор стверджує, що підтримка частоти обертання в міжрезонансних зонах на верстатах шарошкового буріння з регульованим приводом можливе регулюванням частоти обертання долота по поздовжнім коливанням бурового ставу. У способі оптимізації та регулювання режимів буріння свердловин за деклараційним патентом України №29672А [73], заснованому на обмеженнях пружних коливань у колоні бурильних труб, як параметр пружних коливань прийнята амплітуда пружних подовжніх коливань верхнього кінця колони.

У статті [74] наведено результати дослідження технологічних показників буріння тришарошкового долота при бурінні вибухових свердловин. Дослідженнями було встановлено, що для тришарошкового долота швидкість буріння лінійно зростає із збільшенням зусилля подачі (рис. 1.3). Зі збільшенням частоти обертання швидкість буріння також зростає до свого екстремального значення, придбаного при $W=10 \text{ рад/с}$. Зниження швидкості буріння при подальшому підвищенні частоти обертання долота можна пояснити

зниженням глибини впровадження зубків долота та ефективності сколу породи у вибої свердловини.

Мусарським В.Е. проведені дослідження режимних параметрів шарошкового буріння для верстатів СБШ-250МН. Автор стверджує, що «залежності механічної швидкості буріння і потужності двигуна обертання у функції режимних параметрів для гірничо-геологічних умов Криворізького басейну не мають екстремумів і монотонно зростають зі збільшенням частоти обертання долота та осьового навантаження (рис. 1.4–1.5). У діапазоні зміни частоти обертання від 80 до 110 об/хв знаходиться максимальне значення моменту опору» [75, 76].

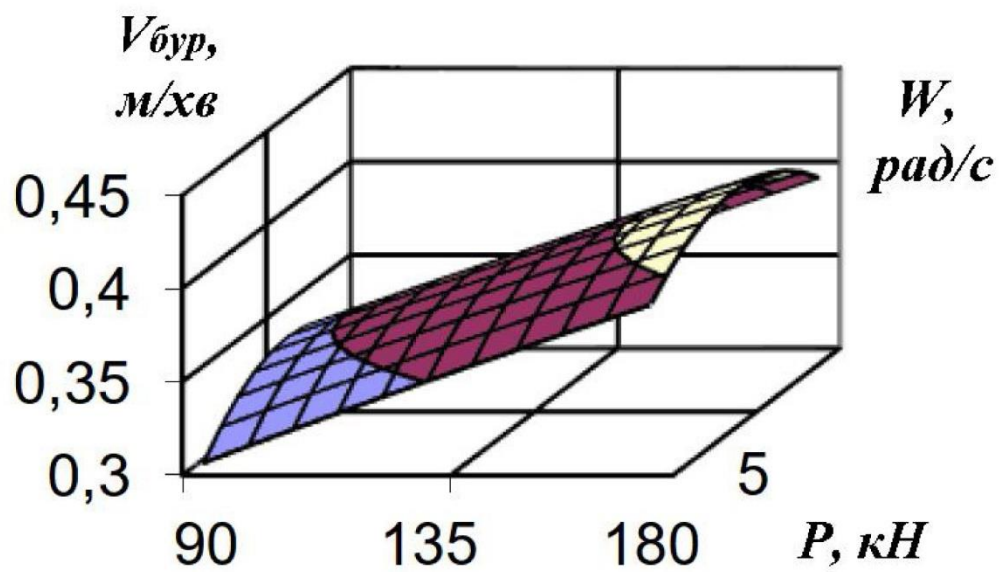


Рис. 1.3 Діаграма для швидкості буріння

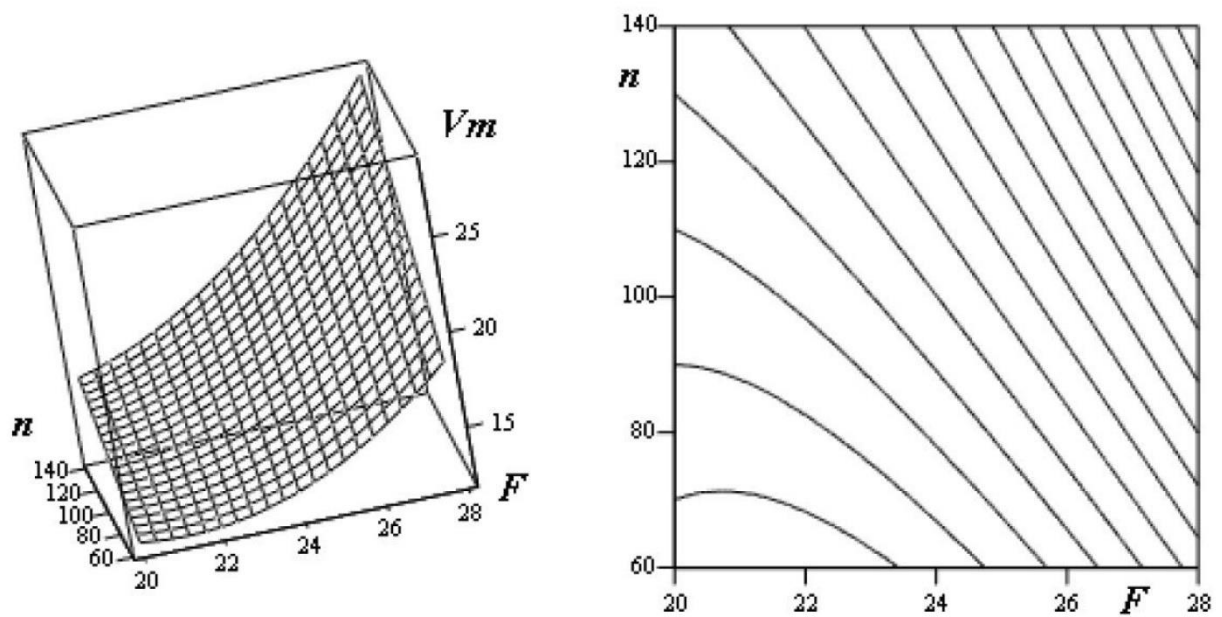


Рис.1.4. Залежність механічної швидкості буріння від режимних параметрів
(V_m , м/с; F , т; n , об/хв)

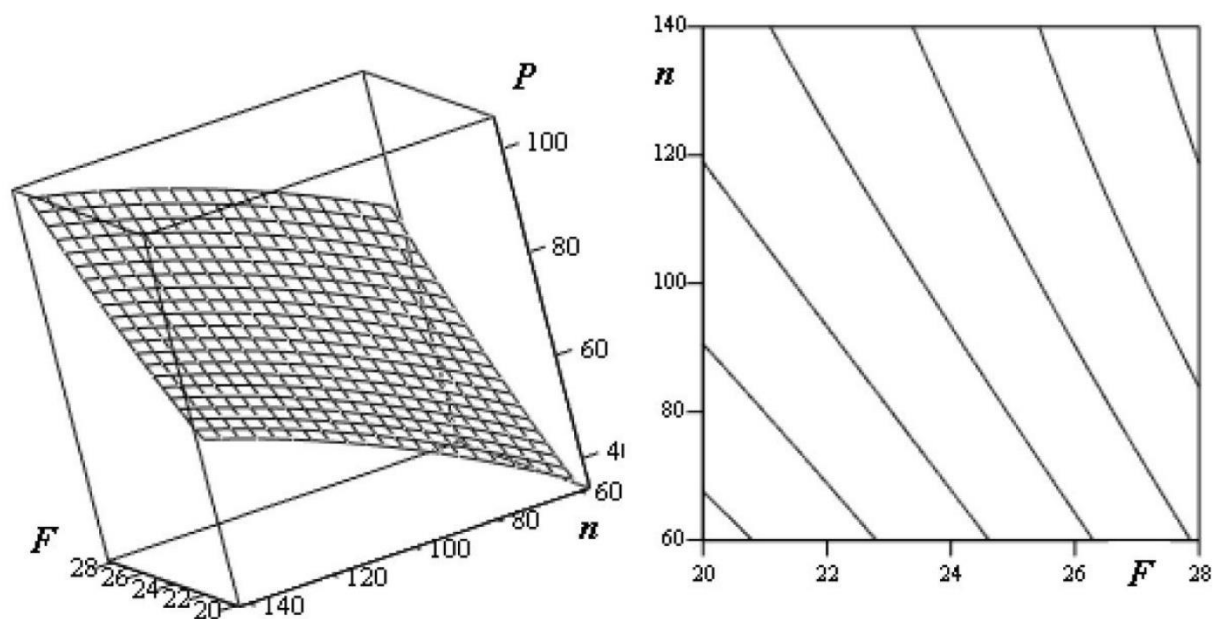


Рис.1.5. Залежність потужності, яка споживається двигуном обертання, від режимних параметрів (P , кВт; F , т; n , об/хв)

Автор робить висновок, що механічна швидкість буріння більше залежить від осьового тиску ніж від частота обертання долота.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ШАРОШКОВОГО БУРІННЯ НА КАР'ЄРАХ

2.1. Аналіз критеріїв оптимізації процесу буріння

При вирішенні завдань управління буровим верстатом, як правило, вдаються до абстрактного експериментування, що забезпечує досить точний збіг реальних умов з досвідом – математичного моделювання [31, 77, 78]. Для цього будують математичну модель операції управління буровим верстатом, яка описує її структуру та властивості у кількісних термінах.

Зазвичай, всі процеси прийняття рішень мають дві характерні риси:

- коли умови завдання допускають велику кількість можливих варіантів, з яких треба вибрати оптимальний. При цьому зі збільшенням числа варіантів, що розглядаються, збільшується обсяг інформації, необхідної для вирішення задачі, і її опис стає більш громіздким;
- коли ухвалення рішення здійснюється заради певної мети, тобто обране рішення має найкраще забезпечувати досягнення поставленої мети.

Для порівняння можливих варіантів завдань управління та оцінки їх відповідності поставленій меті необхідно кількісно оцінити рівень здійснення мети при різних варіантах, тобто ефективність операції керування. Кількісний критерій, за допомогою якого визначається ефективність операції управління, називається показником ефективності.

Таким чином, процес прийняття рішень можна описати функцією, аргументами якої є допустимі рішення, а значеннями - числа, що

характеризують міру досягнення поставленої мети за різних аргументів. Ця функція називається цільовою. Вона пов'язує допустимі рішення із показником ефективності. Завдання вибору рішення зводиться до знаходження екстремального значення функції (показника ефективності) та аргументу, у якому воно досягається. Рішення, що максимізує (або мінімізує) функцію (показник ефективності), є оптимальним.

Фактично процес прийняття рішення включає дві проблеми:

- вибір показника ефективності, визначення безлічі допустимих рішень та цільової функції;
- відшукування екстремального значення цільової функції та рішення, що йому відповідає.

Перша проблема полягає в математичному описі умов, у яких протікає операція управління, мети її здійснення та входить, по суті, у математичне моделювання.

Друга проблема входить до кола екстремальних завдань математики.

Критерій ефективності вибирається залежно від мети операції управління, її природи та умов здійснення. Критерій ефективності, з одного боку, повинен бути досить простий, щоб його легко було обчислювати та аналізувати, а з іншого боку, повинен бути чутливий (критичний) по відношенню до величин, що оптимізуються (керованим змінним).

При вирішенні завдань управління іноді доводиться мати справу не з одним, а з кількома критеріями ефективності. Це тим пояснюється тим, що завдання управління багатоцільове.

Складність вибору критерію оптимізації (ефективності) управління бурінням полягає в труднощі його оперативного обчислення в процесі буріння, що обумовлено недостатнім обсягом необхідної інформації,

що безперервно надходить з датчиків оператора бурового верстата зі штатної панелі приладів.

Аналіз ієрархії критеріїв експлуатації бурового верстата (рис. 2.1) дозволяє прийняти як критерії оптимізації управління наступні критерії ефективності управління бурінням:

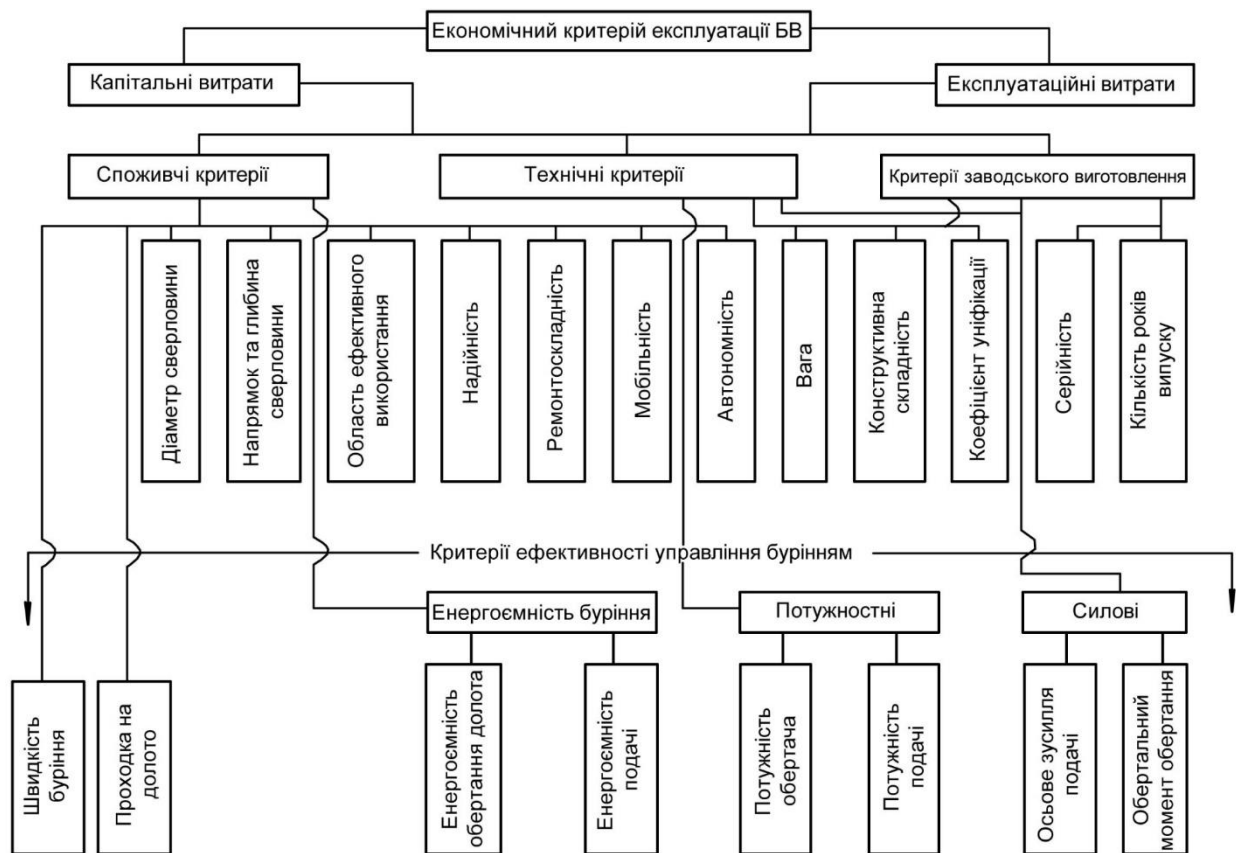


Рис. 2.1. Схема ієрархії критеріїв експлуатації бурового верстата

- споживчі - швидкість буріння, проходка на долото та енергоємність буріння;

- технічні - потужнісні критерії.

Швидкість буріння і проходка на долото є параметрами, що спостерігаються в процесі буріння, а енергоємність буріння і потужнісні критерії (потужність механізмів подачі та обертання) не спостерігаються, але оперативно обчислюються. Запропоновані критерії оптимізації можуть бути покладені в основу розробки алгоритмів керування кульковим верстатом у режимі буріння.

2.2. Процес буріння як об'єкт управління

Як об'єкт управління процес шарошкового буріння є досить складною системою, складовими частинами якої є верстат, буровий став, долото і процес буріння.

Управління параметрами режиму буріння характеризується великою кількістю вхідних та вихідних величин. На входи об'єкта надходять (рис. 2.2):

- керуючі впливи $U_1, U_2, \dots, U_n$;
- контрольовані обурення $K_{v1}, K_{v2}, \dots, K_{vm}$;
- неконтрольовані випадкові обурення $F_1, F_2, \dots, F_t$.

Реакцією об'єкта на ці впливи та обурення є встановлення на його виході деяких (визначених) значень вихідних змінних $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$, з яких керованими можуть бути всі або частина з них.

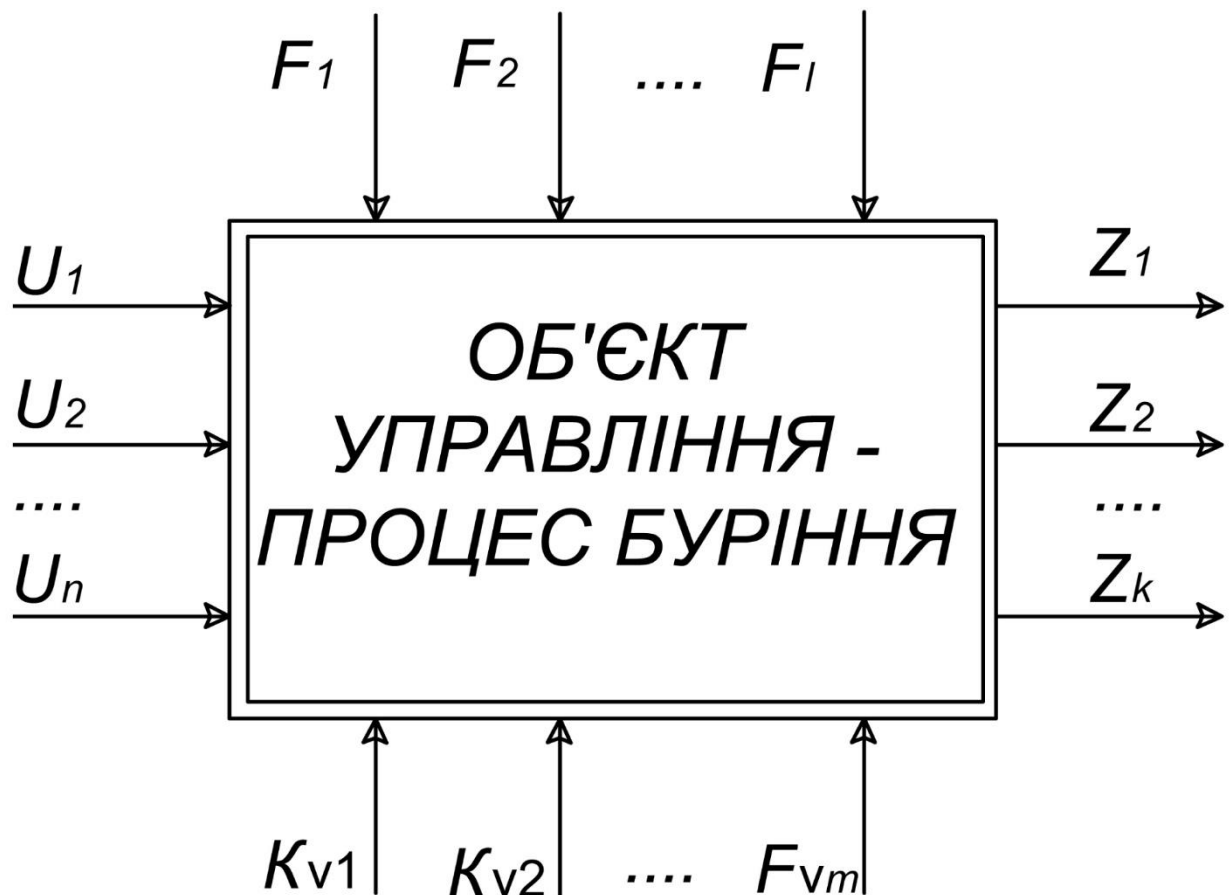


Рис. 2.2. Вхідні та вихідні параметри управління процесом буріння

За керуючі впливи (U_n) можуть бути прийняті тільки вхідні змінні, що оперативно регулюються. Вони повинні задовольняти вимоги лінійності, можливості оперативного вимірювання (спостереження) та мати необхідний діапазон змін.

Контрольованими збуреннями процесу (K_{vm}) є конструктивні особливості верстата, діаметр та глибина свердловини.

Неконтрольованими випадковими збуреннями (F_1) є періодичні варіації фізико-механічних властивостей буримих порід.

Вхідним змінним відповідають різні внутрішні та зовнішні обурення у вигляді перешкод та випадкових навантажень. Перешкоди виявляються під час підклинювання та затуплення інструменту (їх можна усувати). Випадкові навантаження виникають внаслідок зміни

фізико-механічних властивостей буримої породи по глибині свердловини та їх усунути неможливо.

Зміна приводу обертання та подачі бурового ставу, системи очищення свердловини відносять до внутрішніх перешкод, які можна контролювати, вимірювати та використовувати в процесі управління.

Як вхідні керуючі впливи для бурового верстата можуть бути обрані: осьове зусилля P_{oc} , частота обертання ω_{epd} , кількість повітря Q_e для очищення свердловини та кут відхилення осі свердловини від вертикалі β_0 .

Вихідні параметри (Z_k) характеризують фізичні результати процесу руйнування породи і техніко-економічні показники буріння і можуть бути як спостережуваними і керованими, так і ті, що не спостерігаються і некеровані. Неспостережені, у свою чергу, бувають оперативно обчислювані та оперативно не обчислювані.

В якості вихідних змінних можуть бути обрані керовані параметри, такі як швидкість буріння V_d , крутний момент M_{ep} , проходка на долото H_d , енергоємність руйнування одиниці об'єму породи E_b , потужність механізму подачі N_{π} , потужність механізму обертання N_{ep} , продуктивність бурового верстата в зміну Π_{zm} , витрати на буріння одного погонного метра свердловини.

Основною особливістю управління є вибір сукупності впливів. При регулюванні підтримується постійною або змінюється за деяким законом яка-небудь величина, що характеризує процес.

Регулювання не в змозі в загальному випадку забезпечити оптимальність параметрів режиму буріння, оскільки оптимізація вимагає вибору оптимальних впливів, що задають в змінних умовах. Цей вибір має здійснюватися постійно у темпі із змінами умов буріння. Регулювання вимагає, щоб вибір здійснювала людина, але не завжди можна це зробити внаслідок відсутності необхідної їй інформації,

наявності фізіологічних та біологічних особливостей. Регулювання можна назвати керуванням без вибору. Воно є однією з найважливіших приватних функцій управління.

Проблема вибору оптимальних режимів буріння полягає [33] у необхідності вибору разом із обмеженнями значення управляючих впливів, які призводять до екстремуму (максимуму чи мінімуму) деякої змінної, прийнятої за критерій оптимізації (ефективності), тобто забезпечити

$$Y_i = \varphi(U_1, U_2, \dots, U_n) \rightarrow \text{extr} \quad (2.1)$$

при обмеженнях

$$\begin{aligned} U_{e1} &\geq U_1 \geq U_{n1} \\ U_{e2} &\geq U_2 \geq U_{n2} \\ U_{en} &\geq U_n \geq U_{nn} \end{aligned} \quad 2.2$$

де Y_i - багатовимірна функція.

Обмеження (2.2) можна записати коротше у вигляді приналежності до множини або області допустимих значень:

$$u_i \in U_i, i=1,2,\dots,n. \quad 2.3$$

Завдання вибору обмежень є одним із найважливіших, часто визначає успіх оптимізації. Важливе значення мають також приватні екстремуми вздовж обмежень.

Часто один критерій не забезпечує оптимальності за іншими критеріями, тому поставлено завдання багатокритеріальної оптимізації

$$I = \varphi_1(Y) = \varphi_2(y_1, y_2, \dots, y_m) \rightarrow \text{extr} \quad 2.4$$

при обмеженнях (2.2) або (2.3) та на компоненти функції Y

$$y_i \in Y_i, i=1,2,\dots,m. \quad 2.5$$

Значення, $U_{10}, U_{20}, \dots, U_{n0}$ керуючих впливів, що доставляють екстремум (2.1) та (2.4), називаються оптимальними. За наявності не

контрольованих випадкових збурень важливо як забезпечити потрапляння до оптимуму, тобто визначити $U_{10}, U_{20}, \dots, U_{n0}$, але й відстежувати усі їх зміни при випадковому дрейфі екстремуму критерію оптимізації.

2.3. Встановлення функціональних зв'язків між параметрами моделі процесу шарошкового буріння як об'єкта управління

Процес шарошкового буріння, що реалізується ОПМ, і як об'єкт управління, що характеризується вхідними та вихідними параметрами, можна подати у вигляді зв'язків, рис. 2.3.

Вхідні параметри, що характеризують технічні можливості бурового верстата та умови буріння, поділяються на:

- керуючі, які оперативно регулюються (осьове зусилля подачі - P_{oc} ; частота обертання долота - $\omega_{врд}$ витрата повітря для очищення свердловини - $Q_в$; кут відхилення осі свердловини від вертикалі - β_0 ;
- контрольовані, що не залежать від процесу буріння (конструктивні параметри (маса, габарити, типи приводів основних механізмів) бурового верстата - K_{cm}) та залежні від режимів буріння (діаметр та глибина свердловини - $P_б$, параметри вібрації верстата: амплітуда, частота - B_{cm});
- неконтрольовані випадкові - параметри середовища, що руйнується - $P_{ср}$.

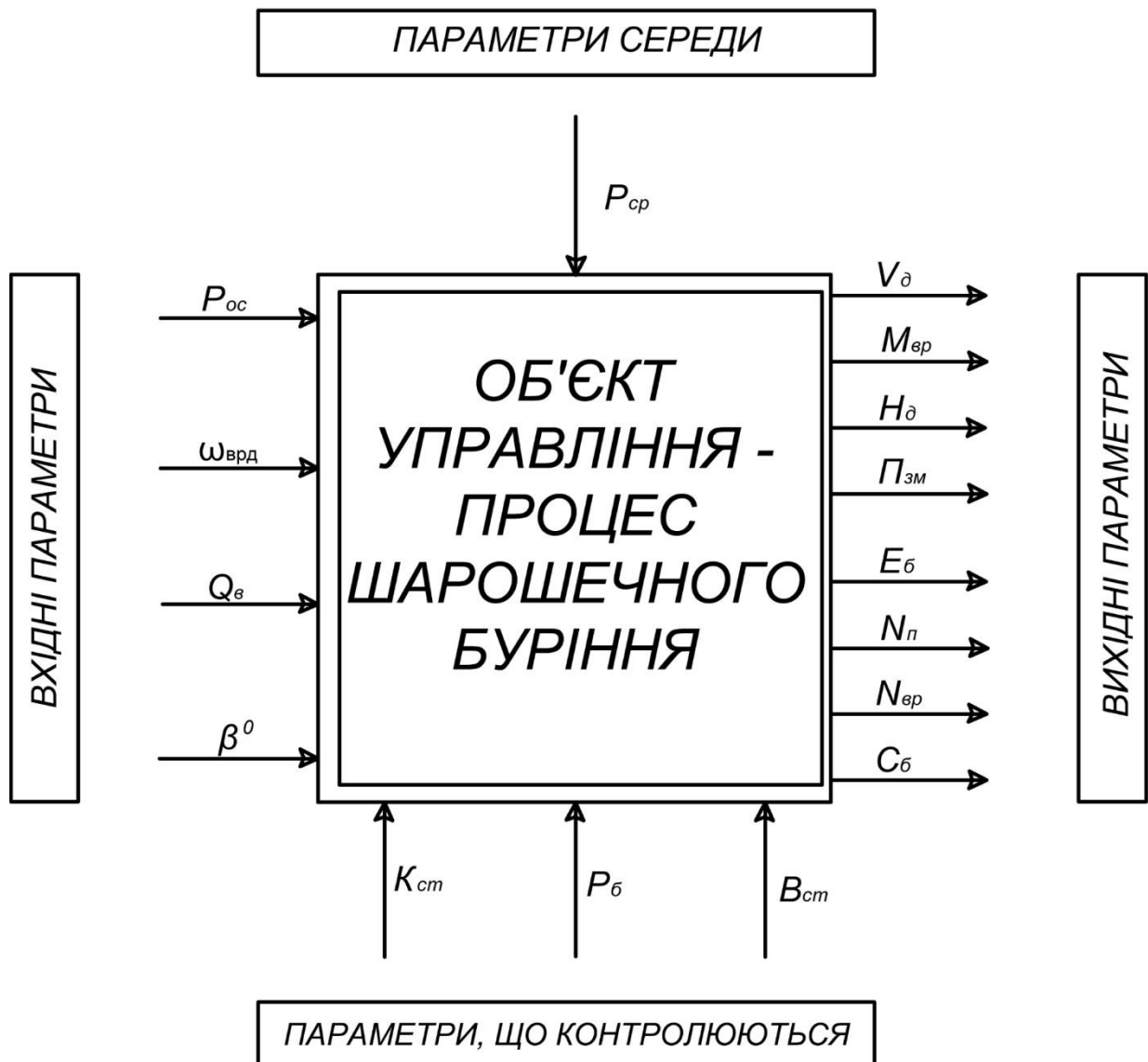


Рис. 2.3. Зв'язок вхідних та вихідних параметрів управління процесом шарошкового буріння

До параметрів руйнованого середовища P_{cp} відноситься комплекс показників, що характеризують фізико-механічні властивості гірської породи як об'єкта руйнування при бурінні, що мають вигляд випадкових функцій (межа міцності породи при одновісному стисканні, тріщинуватість, абразивність, обводненість та ін).

До групи неконтрольованих випадкових параметрів слід віднести ряд впливів на процес буріння, включаючи шуми в каналах управліннь та контролю, що мають випадковий характер і не піддаються, як

правило, точним кількісним вимірам. Зазвичай їх вплив враховується запровадженням обмежень відповідними засобами захисту.

Вихідні параметри характеризують фізичні результати процесу руйнування породи та поділяються на:

- спостережувані (швидкість буріння - V_{∂} ; крутний момент - M_{∂} ; проходка на долото - H_{∂});

- не спостережувані, які бувають оперативно обчислювані (продуктивність верстата за зміну – $\Pi_{зм}$; енергоємність процесу буріння – E_{δ} ; потужність механізму подачі – N_{Π} , потужність механізму обертання N_{∂}) та оперативно необчислювані (витрати на буріння одного погонного метра свердловини - C_{δ}).

Слід зазначити, що енергоємність буріння E_{δ} може бути як функцією вхідних параметрів ($P_{ос}$, ω_{∂} , так і неконтрольованих випадкових обурень ($[\sigma_{cm}]$) і мати свої реальні значення для механізму подачі та для механізму обертання бурового верстата.

З можливих зв'язків між параметрами виділених груп найбільшу цінність становлять функціонали виду:

$$Z_i = \varphi_i(U, P_{cp}, P_{\delta}, K_{cm}, B_{cm}) \quad 2.6$$

$$U_i = \varphi_i(P_{cp}, P_{\delta}, K_{cm}, B_{cm}) \quad 2.7$$

Функціонали виду (2.6) дозволяють одержати загальне рішення. Функціонали виду (2.7) виражають закономірність керування процесом шарошкового буріння. Якщо величини U_i відповідають екстремальним значенням критерію оптимізації групи Z_i , - для кожного комплексу параметрів, то рівняння (2.7) описують оптимальне управління процесом буріння.

Результати аналізу та вибору кількісних та якісних параметрів управління процесом шарошкового буріння наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Параметри керування процесом шарошкового буріння

КІЛЬКІСТНІ			
ВХІДНІ			ВИХІДНІ
Керуючі	Контролюємі	Неконтролюємі	Спостерігаємі
$P_{oc}, \omega_{epd}, Q_0, \beta_0$	$K_{cm}, P_{\bar{b}}, B_{cm}$	P_{cp}	V_d, M_{ep}, H_d
ЯКІСТНІ			
ВИХІДНІ			
Спостирігаємі	Неспостерігаємі		
	Ті, що оперативно розраховуються	Ті, що оперативно не розраховуються	
V_d, M_{ep}, H_d	$P_{zm}, E_{\bar{b}}, N_n, N_{ep}$	$C_{\bar{b}}$	

Про ефективність шарошкового буріння можна судити за кількісними вихідними параметрами, що спостерігаються (швидкості буріння свердловини, крутного моменту, проходці на долото), а об'єктивну оцінку техніко-економічних показників дадуть якісні вихідні параметри, що не спостерігаються: продуктивність верстата в зміну, енергоємність буріння, Витрати на буріння одного погонного метра свердловини. Тоді стан об'єкта управління - «процес шарошкового буріння» - можна представити у вигляді зв'язків між кількісними (вхідними і вихідними) та якісними (вихідними, спостережуваними та неспостережуваними) параметрами процесу буріння, (рис. 2.4). Аналіз згаданих зв'язків між досліджуваними параметрами показує, що вихідні параметри швидкість буріння - V_d , крутний момент - M_{ep} і проходка на долото - H_d мають властивість дуалізму, так як вони характеризують об'єкт управління як кількісно за величиною, так і якісно за станом.

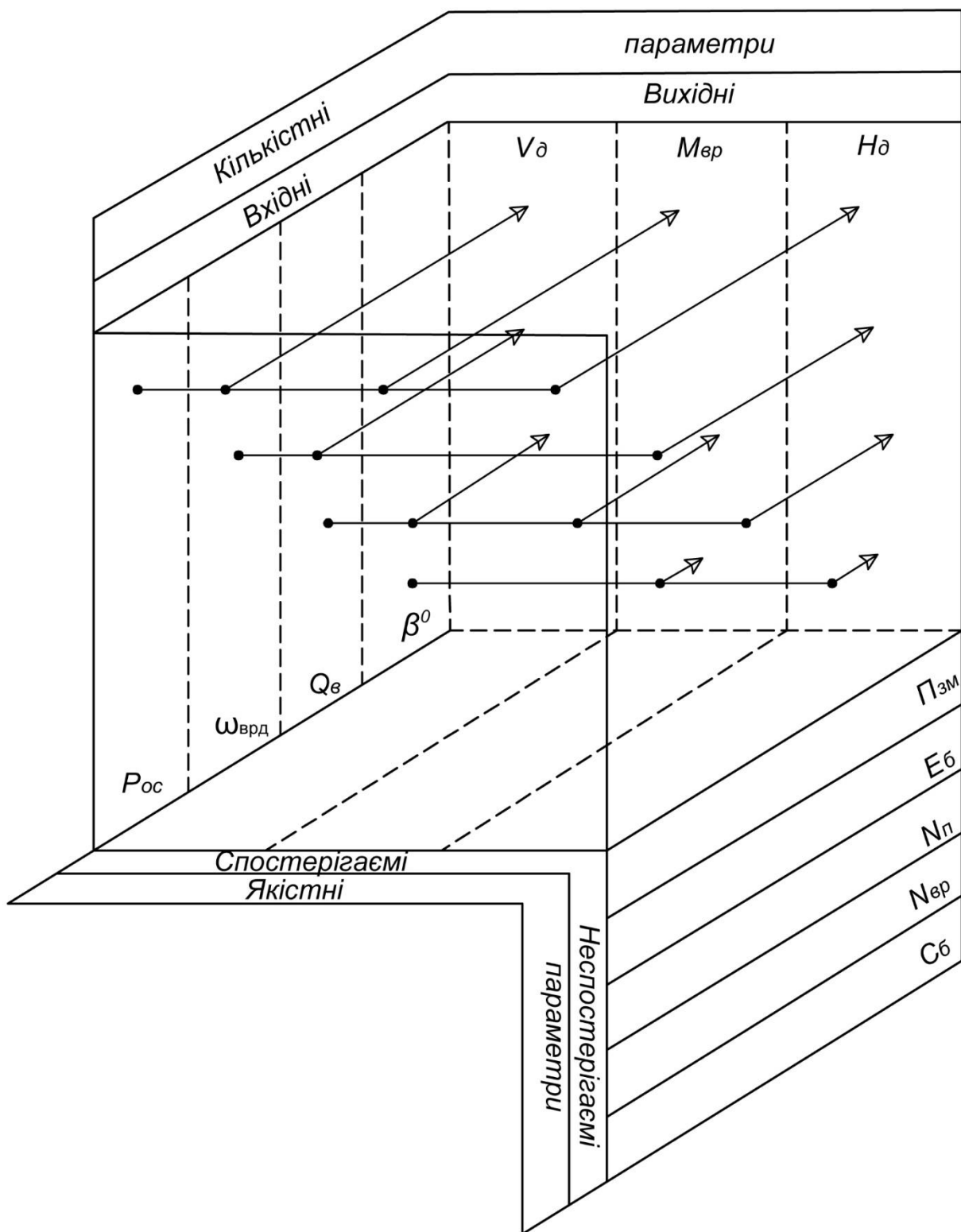


Рис. 2.4. Функціональні зв'язки між параметрами процесу шарошкового буріння

У зв'язку з цим пропонується структура пошуку виду функціональних зв'язків кількісних та якісних параметрів об'єкта управління - «процес шарошкового буріння» (рис. 2.5), що реалізуються обертально-подавальним механізмом (ОПМ) бурового верстата. Відомо, що причиною виходу з ладу долота є як вироблення ресурсу його підшипниками, так і зношування озброєння шарошок. Тому пошук виду та характеру функціональних зв'язків моделі буріння слід вести незалежно за двома станами долота: до повного вироблення ресурсу за граничним станом підшипників та до повного вироблення ресурсу зі зносу озброєння.

2.4. Обґрунтування фізичної сутності моделі функціональних зв'язків параметрів процесу буріння

Всі зусилля при створенні нової бурової техніки та удосконалення в конструкціях існуючих верстатів підпорядковані кінцевій меті – збільшенню швидкості буріння при зниженні витрат на прохідку.

Величина осьового зусилля обмежується конструкцією та міцністю шарошок долота, а частота обертання залежно від умов – вібрацією системи, можливістю ефективного очищення свердловини, динамічною вантажопідйомністю підшипникових вузлів долота.

В.С. Федоров [79] вважає, що процес механічного руйнування порід можна розділити на три фази: поверхнєве, об'ємне та втомне руйнування.

Процес поверхнєвого руйнування, або стирання, характеризується тим, що тиск по контуру озброєння шарошки з породою завжди менший за твердість породи на вдавлювання. Швидкість руйнування зростає майже лінійно. Сам процес руйнування стирання малоефективний і має місце у обертовому бурінні міцних порід при малих навантаженнях на шарошкове долото.

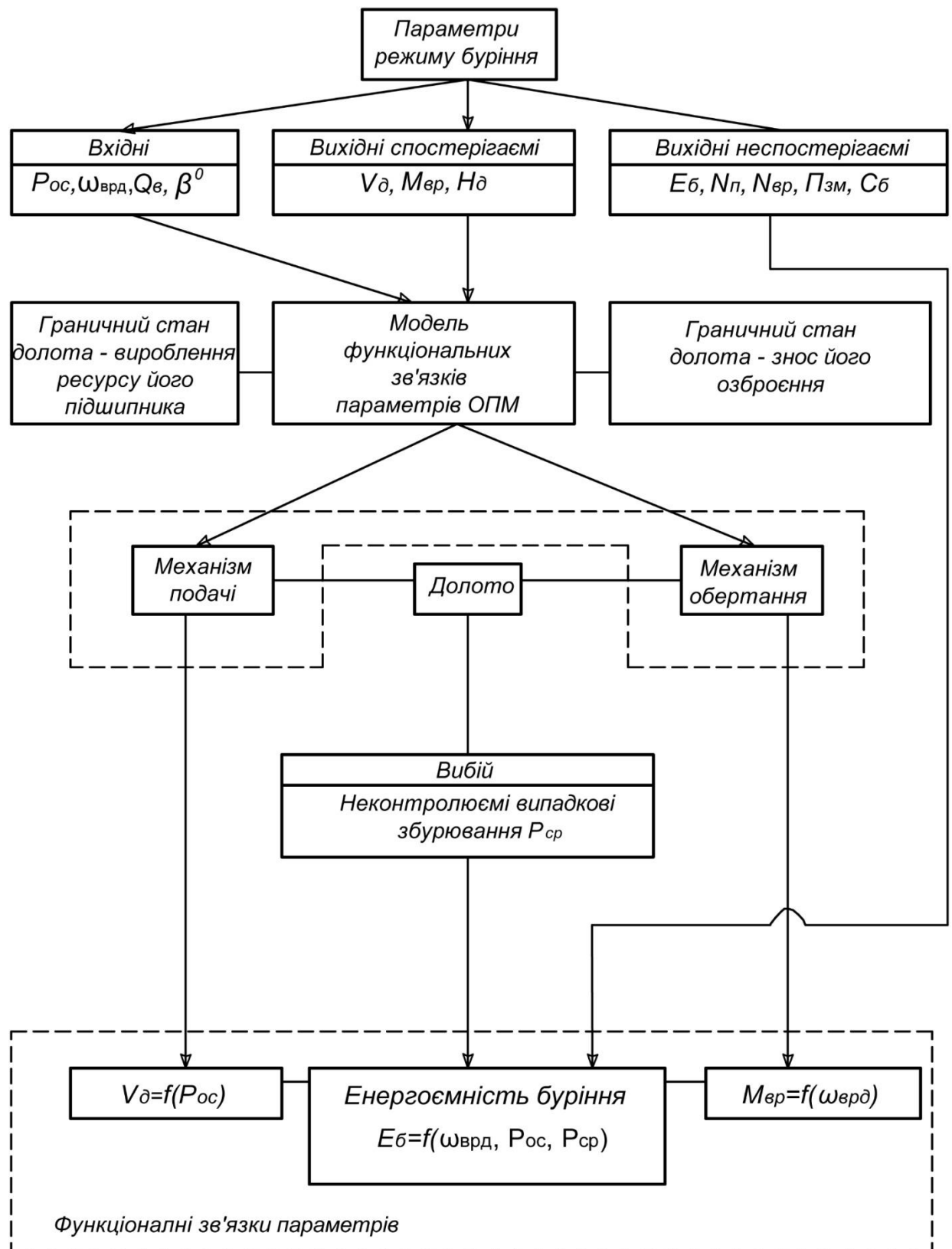


Рис. 2.5. Структура пошуку функціональних зв'язків параметрів керування процесом шарошкового буріння.

При об'ємному процесі відбувається крихке руйнування породи, озброєння шарошки активно проникає в неї, при цьому швидкість руйнування найбільша.

Втомне руйнування є перехідним процесом. Для нього характерні ті самі умови, як і при поверхневому руйнуванні. Особливість процесу полягає в тому, що порода руйнується при багаторазовому впливі на неї озброєння шарошки. Тому періодично у вибої виникають умови для об'ємного руйнування.

Закономірність зміни швидкості буріння в залежності від величини осьового зусилля визначається співвідношенням показників контактного тиску та твердістю породи на вдавлювання, тобто, зрештою, конструкцією озброєння долота.

Потрібне осьове зусилля подачі на долото P_{oc} у відповідності до формули (1.1) визначається межею міцності породи при одновісному стисканні $[\sigma_{cm}]$ та діаметром долота D (буримої свердловини $D_{сер}$).

Верхню межу міцності гірської породи, яку доцільно бурити вибраним типом долота, можна визначити з виразу

$$[\sigma_{cm}]_{\max} = \frac{P_{oc \max}}{K \cdot D} Z_i = \varphi_i(U, P_{cp}, P_{\bar{o}}, K_{cm}, B_{cm}) \quad 2.8$$

де K - коефіцієнт пропорційності.

Наприклад, для верстата СБШ-250 у табл. 2.2 наведено усереднені рекомендації щодо максимально допустимого зусилля навантаження долота ($P_{oc \max}$) і граничній частоті обертання долота, що відповідає даному зусиллю ($\omega_{вр \max}$), при яких забезпечуються задовільні умови їх експлуатації, а також значення максимальної та мінімальної міцності буримих порід [4].

Відповідно до прийнятої структури пошуку виду функціональних зв'язків (рис. 2.5), вплив вхідних параметрів на вихідні пропонується досліджувати незалежно за двома моделями для проходки на долото до

повного вироблення ресурсу: за граничним станом підшипників долота та за зносом його озброєння.

Таблиця 2.2

Усереднені рекомендації щодо максимально допустимого зусилля навантаження долота

Параметри	Верстат ВБШ-250 МН		
Діаметр долота D , мм	200	229	251
Зусилля при частоті обертання $\omega_{врд}$, $P_{остax}$, кН	200	250	280
Паспортна частота обертання при зусиллі $P_{остax}$, $\omega_{вр.п}$, c^{-1}	7,0	6,5	6,0
Максимальна частота обертання, $\omega_{врmax}$, c^{-1}	14		
Максимальна міцність породи, що буриться, f_{max}	14,3	15,7	16,0
Мінімальна міцність породи, що буриться, f_{min}	7,15		

2.5. Вплив технологічних параметрів процесу буріння на зношування вузлів долота

Останніми роками у практиці буріння свердловин з метою оцінки роботи долота використовується критерій - довговічність роботи породоруйнуючого інструменту чи його зносостійкість. Для оцінки ж величини цього показника однозначної думки немає. Його можна оцінити також проходкою на долото, часом буріння чи зміною розмірів долота, його озброєнням, поломкою (зносом) опори загалом чи його елементів. Тоді з умови постановки завдання ці показники будуть вихідними, а вищеназвані вхідними параметрами, взаємозв'язок між якими дозволить встановити основні напрямки розробки технічних і технологічних заходів, спрямованих на вдосконалення роботи породоруйнівного інструменту [80].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ НА МЕХАНІЧНУ ШВИДКІСТЬ ТА ПРОХІДКУ НА ДОЛОТО

У технології відкритої розробки родовищ особливу увагу займають питання буріння вибухових свердловин, підвищення ефективності експлуатації бурових верстатів, підвищення надійності та вдосконалення конструкції виконавчих механізмів. Збільшення обсягів видобутку неминуче тягне у себе збільшення обсягу бурових робіт, отже, довговічність роботи бурового верстата залежить від якості і періодичності проведених ремонтів.

Незважаючи на значущість та численність досліджень, пов'язаних з розвитком бурової техніки, у них недостатньо уваги приділено питанням оптимального та своєчасного регулювання режимів шарошкового буріння, адаптивних систем усунення критичних навантажень при бурінні складноструктурних породних масивів стосовно проблеми підвищення ресурсу бурового інструменту та механічної швидкості буріння. Це вимагало проведення спеціальних досліджень з визначення ступеню впливу частоти обертання та навантаження на долото на швидкість буріння та стійкість шарошкових доліт (рис. 3.1-3.4).

Величина опору породи при руйнуванні є основною характеристикою робочого процесу, що визначає його енергоємність, швидкість буріння та інші показники. Опір обумовлюється як властивостями гірських порід, і способом на породу, конструкцією інструменту.

Найвідповідальнішою, дорогою, високонавантажуваною і ланкою бурового верстата, що зношується є буровий орган з обертальним механізмом. Система «буровий орган – обертально-подавальний механізм» за останні десятиліття практично не змінюється і не вдосконалюється. У зв'язку з цим зростання продуктивності бурового обладнання практично припинилося і відбувається безперервне значне

збільшення витрат на бурові роботи, що припадають на одну свердловину.

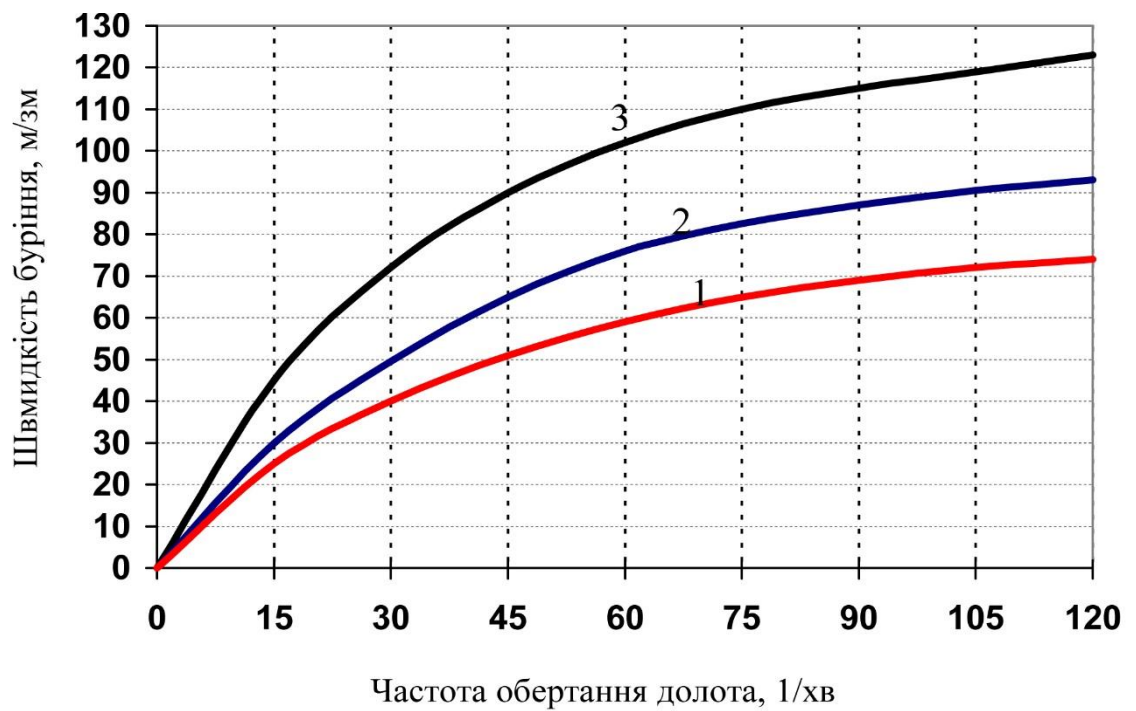


Рис. 3.1. Залежність швидкості буріння від частоти обертання долота у породах міцністю: 1 – 18, 2 – 16, 3 – 14.

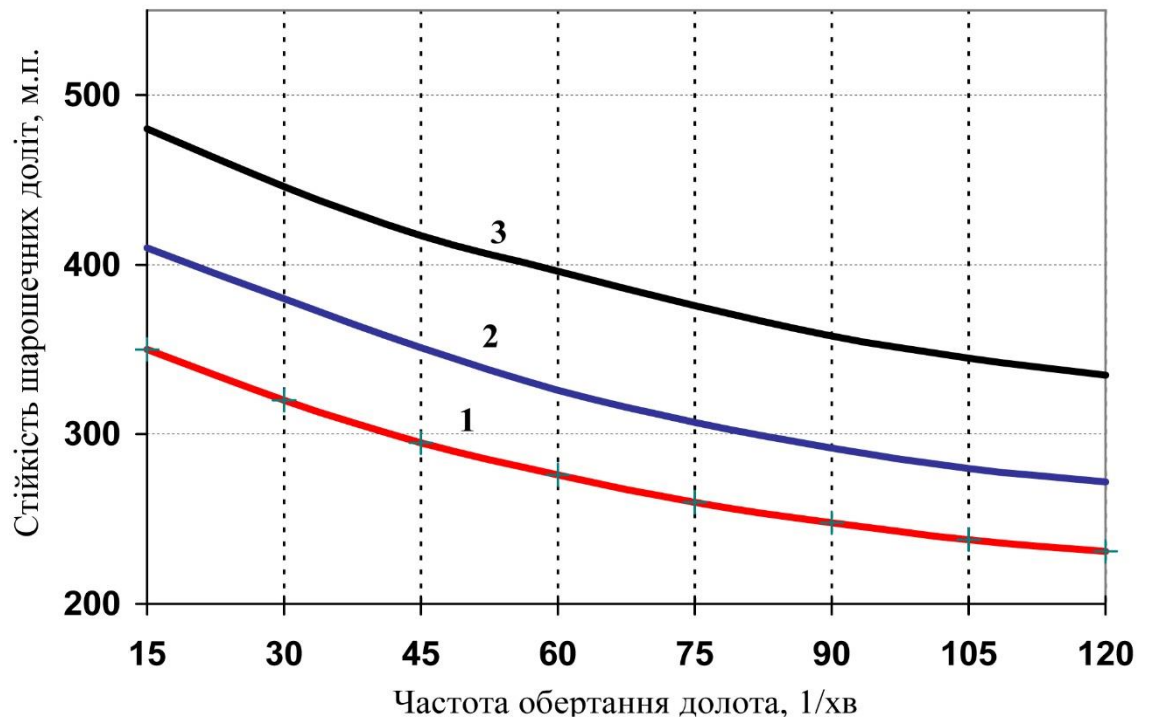


Рис. 3.2. Залежність стійкості шарошкових доліт від частоти обертання долота у породах міцністю: 1 – 18, 2 – 16, 3 – 14.

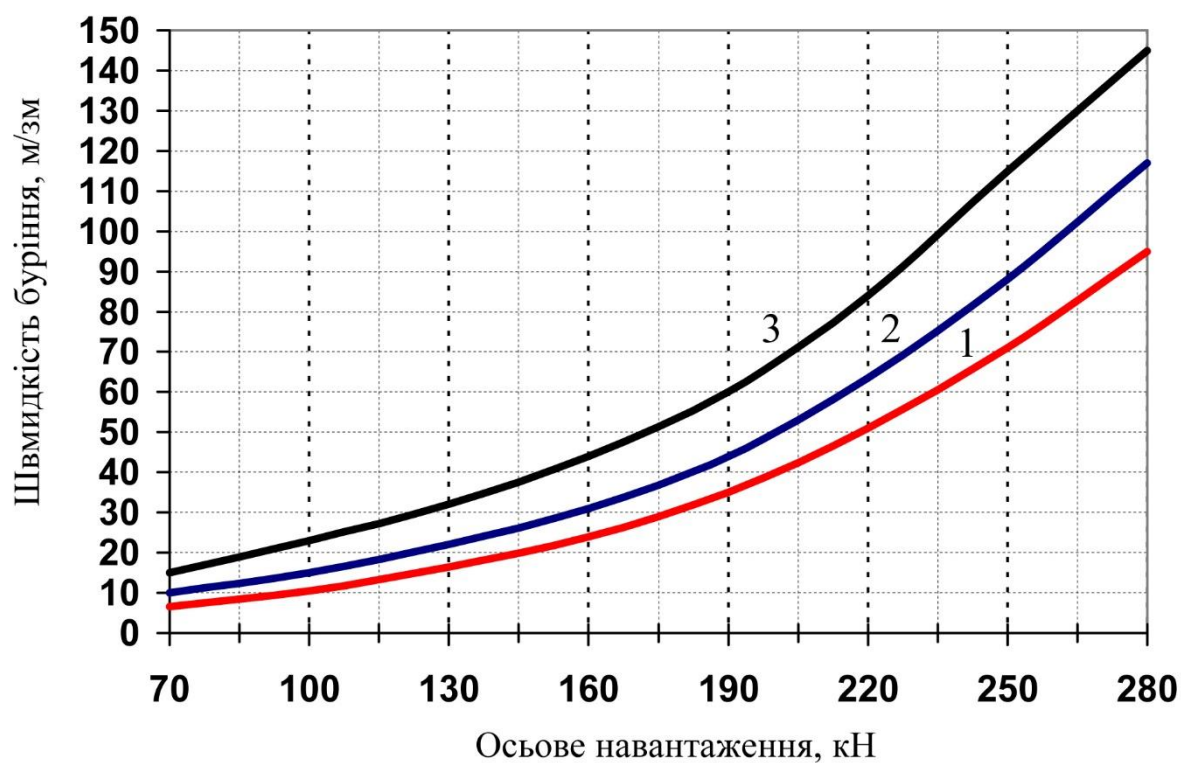


Рис. 3.3. Залежність швидкості буріння від осьового навантаження на долото у породах міцністю: 1 – 18, 2 – 16, 3 – 14.

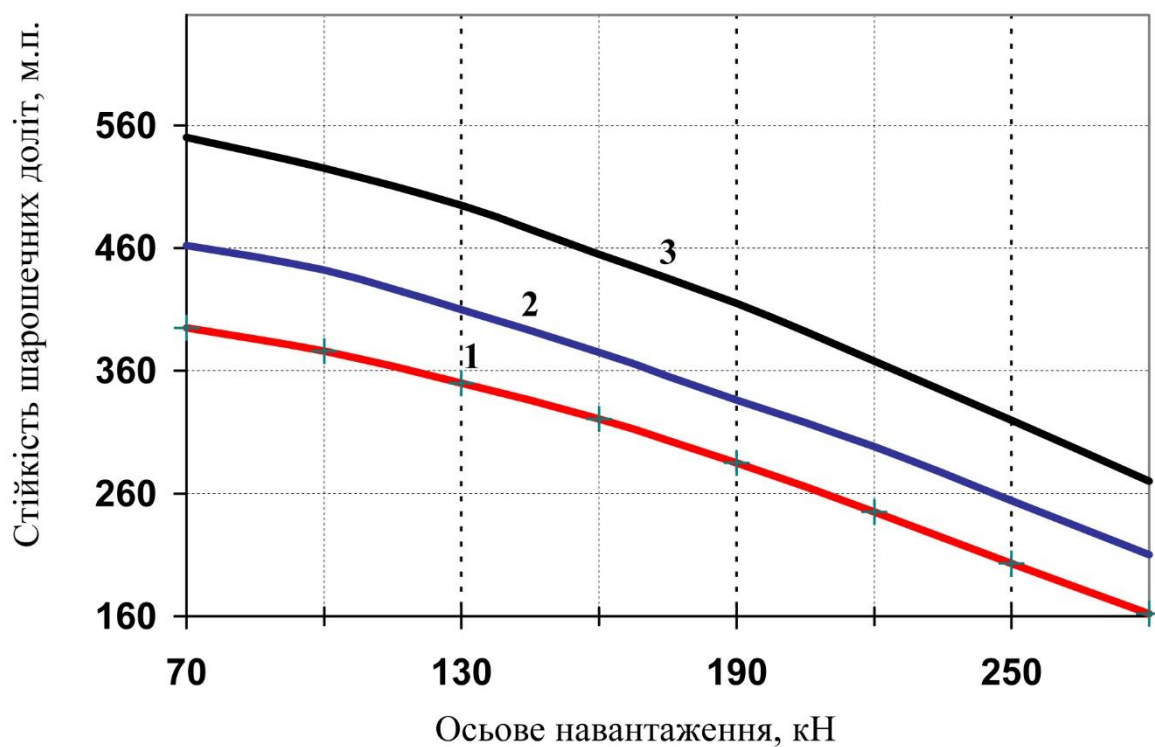


Рис. 3.4. Залежність стійкості шарошкових доліт від осьового навантаження на долото у породах міцністю: 1 – 18, 2 – 16, 3 – 14.

Буровий орган, що складається з бурових штанг і бурового інструменту, визначає спосіб буріння свердловин відповідно до властивостей гірських порід, які змінюються в широкому діапазоні навіть в межах блоку, що обурюється. Продуктивність верстата і стійкість бурового інструменту у разі значною мірою залежить від режиму буріння.

Однак режим буріння, перш за все, визначається типом і характеристикою обертально-подавального механізму, що забезпечує і своєчасно регулює швидкість обертання та зусилля подачі.

Співвідношення різних способів буріння залежить від багатьох факторів (гірничотехнічних, економічних), але головним чином від гірничо-геологічних умов та коефіцієнта міцності гірських порід.

Буровий інструмент є високонавантажуваним і відповідальним елементом бурового верстата. Швидкісні якості долота, його зносостійкість та висока вартість (26000-34000 грн) формують головний критерій ефективності бурових робіт – питомі витрати на буріння 1 м свердловини, високий рівень яких не відповідає сучасним вимогам щодо використання ресурсів підприємств.

Великі витрати на буровий інструмент пояснюються переважно використанням на кар'єрах ресурсомістких (енергоємних) та складних шарошкових долот (понад 80 % від усіх обсягів). Їхня вартість безперервно підвищується, особливо доліт збільшеного діаметра (244,5 – 320 мм), масштаби споживання яких інтенсивно зростають з технологічних причин. Стійкість вітчизняних шарошкових доліт у 5 – 6 разів нижча за кращі закордонні зразки.

Великим недоліком шарошкових доліт є їх низька адаптованість до умов буріння, що змінюються (за фізико-механічними властивостями гірських порід). Вони мають низьку ремонтпридатність, що значно збільшує вартість буріння.

За життєвий цикл бурової машини (майже 10 років) витрати на витрачені долота, зазвичай, у кілька разів перевищують вартість самої машини.

Особливо велика ця різниця (у 5–8 разів) для важких верстатів СБШ, що застосовуються у породах високої міцності. Це пояснюється високою вартістю нерозбірних шарошкових доліт, яка за останні роки зросла у сотні разів не пропорційно вартості верстатів.

Головним недоліком шарошкових доліт є слабка адаптація конкретної конструкції шарошкового долота до зміни властивостей бурих порід, що змушує мати багато типів шарошкових доліт. Однак у межах дрібної свердловини змінювати долота недоцільно через великі втрати продуктивності.

Тому при бурінні складноструктурних уступів переваги шарошкового способу можуть губитися. У зв'язку з цим зазвичай використовують долота, розраховані на шари більш міцніших порід ($f=8-10$). У результаті потенційні можливості шарошкового способу не використовуються.

Конструктивні рішення бурових інструментів визначають способи та режими буріння свердловин, які багато в чому зумовлюють економіку бурових робіт. Одним з основних критеріїв оцінки ефективності роботи бурових доліт є їхня стійкість (довговічність), підвищення якої призводить до багаторазового збільшення їх вартості та подорожчання питомих витрат, що припадають на 1 м свердловини. такий підхід до буріння вибухових свердловин на відкритих гірничих роботах є невиправданим.

Швидкість шарошкового буріння залежить від численних факторів, які в технічній літературі поєднані в чотири групи: властивості породи, що руйнується, параметри долота, умови взаємодії долота з породою і режими буріння

При бурінні глибоких свердловин основна потужність передається на обертання бурового ставу, оскільки осьова навантаження створюється вагою колони бурильних труб. Теоретичні дослідження та аналіз показали, що існує необхідність підтримання критичної величини осьового навантаження для ефективної роботи шарошкового долота у поєднанні із зазначеними кінематичними характеристиками та режимами, а також конструкцією долота та зубів при їх зміні у часі.

У сферу вивчення впливу режимів буріння з його ефективністю входять кілька режимоутворюючих чинників, конкретний показник яких залежить від виду буріння. Серед найважливіших режимоутворюючих параметрів можна відзначити:

- осьове зусилля на долото, P ;
- частоту обертання снаряда (долота) ω ;

Встановлення раціональних режимів буріння зводиться до розрахунку, крім правильних співвідношень між міцністю порід і відповідно осьовим тиском і числом обертів інструменту, що руйнує, а також режимів очищення від бурової дрібниці і вибору параметрів бурового інструменту.

З достатньою точністю сумарний питомий час виконання основних (буріння) і всіх допоміжних операцій, що доводиться на 1 м пробуреної свердловини, можна вважати постійним для прийнятої моделі бурового верстата при певному показнику труднощів буріння породи Π_6 . Звідси змінна продуктивність бурового верстата визначається за формулою:

$$Q_6 = [T_c - (T_{n.з.} + T_{p.})] / (t_o + t_e) \quad (3.1)$$

де $T_c, T_{n.з.}, T_{p.}$ - тривалість відповідно зміни, підготовчо-заключних операцій і регламентованих перерв у зміну, годину $(T_{n.з.} + T_{p.}) = 0,5 - 1,0$ год;

t_o і t_{ϵ} - відповідно основний і допоміжний час на буріння 1м свердловини, год.

$$t_o = 1/u_6 ;$$

Допоміжний час (t_{ϵ}) по нормах технічного нормування для шарошкового буріння $t_{\epsilon} = 2 - 4$ хв.

Чистий час роботи верстата протягом зміни (год):

$$T_{\text{раб.}} = (t_o + t_{\epsilon}) \sum_{i=1}^n L_{ci} \quad (3.2)$$

де n – число свердловин пробурених за зміну;

L_{ci} - глибина i -й свердловини, м.

Тривалість зміни (год.):

$$\begin{aligned} T_c &\geq T_{\text{раб.}} + T_{\text{н.з.}} + T_p \\ T_c - (T_{\text{раб.}} + T_{\text{н.з.}} + T_p) &= T_{\text{с.пр.}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Практично величина $T_{\text{с.пр.}} = (0,15-4-0,23) \cdot T_c$, тобто щозмінні простої кожного верстата досягають 0,9—1,3 год. Причини цих простоїв полягають головним чином в аварійних зупинках і ремонтах (до 35%), позапланових відключеннях електроенергії й наднормативних витратах часу на технологічні операції. Тривалість простоїв залежить від досконалості конструкції, кінематичної схеми верстата, ступені відповідності комплектувального устаткування умовам експлуатації, рівня трудової дисципліни й кваліфікації персоналу, організації самого процесу буріння.

Крім внутрішньо змінних є ще цілозмінні простої бурових верстатів. Причинами цих в основному організаційних простоїв (до 15-20 % загального річного фонду часу) є планові й позапланові ремонти й перегони верстатів, відсутність екіпажів, перерви при підривних роботах, відсутність фронту робіт і т.д. Таким чином, у цілому втрати робочого часу становлять до 35%. З обліком різних допоміжних робіт

коефіцієнт продуктивного використання бурових верстатів на кар'єрах становить від 0,35 до 0,6.

Варіанти технологічних рішень.

Для розуміння процесу був виконаний аналіз впливу осьового зусилля і частоти обертання долота на швидкість буріння і стійкість шарошкових доліт. Оцінка варіантів технологічних рішень проводилася за мінімальною собівартістю бурових робіт, яка враховує вплив різнобічних факторів.

У якості вихідних даних приймали: породи міцністю в діапазоні від 10 до 20, швидкість обертання в діапазоні від 15 1/хв до 120 1/хв., осьове зусилля в діапазоні від 10 кН до 280 кН. Результаті досліджень наведені на рис. 3.5-3.6.

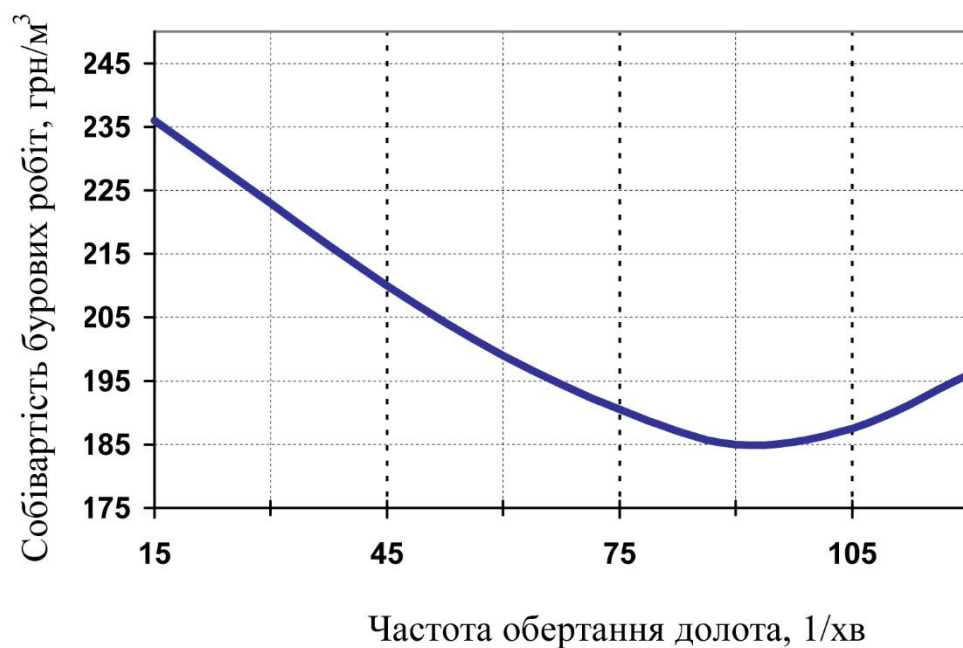


Рис. 3.5. Визначення оптимальної частоти обертання шарошкового долота

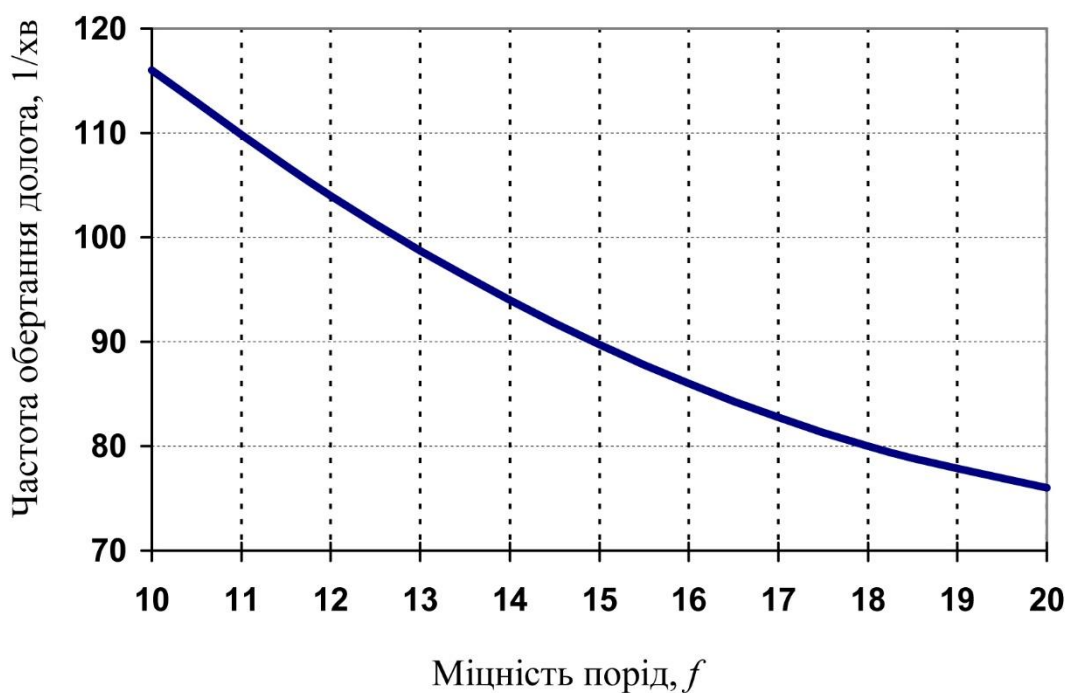


Рис. 3.6. Визначення частоти обертання долота в залежності від міцності порід

На рис. 3.5 представлено результати дослідження з визначення оптимальних параметрів буріння свердловин. Аналіз отриманих результатів показує, що для розглянутих умов (вихідні дані по швидкості

буріння та стійкості шарошкових доліт одержані шляхом аналізу показників роботи бурових верстатів на кар'єрі ІнгЗК) оптимальна частота обертання долота при осьовому навантаженні 220 кН та міцністю порід 18 за шкалою професора Протодьяконова повинна знаходитися в межах 85-95 1/ хв.

Аналіз техніко – економічних показників бурових робіт показав, що для оптимізації бурових робіт в кар'єрі необхідно підвищувати стійкість шарошкових доліт за рахунок оптимізації режимних параметрів (швидкості обертання та навантаження на долота) при обурюванні порід з різними фізико-механічними властивостями. Це призведе до збільшення продуктивності бурових верстатів і як наслідок зменшення витрат на бурові роботи. При цьому буде відбуватися також економія коштів за рахунок підвищення стійкості доліт (внаслідок їх великої вартості – більше 30000 грн).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.

Досвід використання бурових верстатів на кар'єрах показує, що однією з основних статей витрат є витрати на шарошкові долота, тому необхідно вибирати такі режими роботи бурового верстата, за яких максимально використовуються паспортні ресурсні можливості бурового інструменту, через те що вони не підлягають відновленню і матеріальні витрати на його заміну становлять значну частину витрат на буріння одного погонного метра свердловини.

Аналіз існуючих систем та способів керування параметрами режиму буріння шарошковими верстатами на кар'єрах дозволяє зробити наступні висновки:

- процес буріння вибухових свердловин на відкритих гірничих роботах тісно пов'язаний з усім технологічним комплексом гірничого підприємства, а завдання управління цим процесом є актуальним і досі не отримало оптимального рішення;
- процес буріння з раціональними параметрами (осьовим зусиллям подачі бурового ставу та частотою обертання долота) при досягнутому рівні управління буровим верстатом становить не більше 5-10% його машинного часу, при цьому оцінка оптимальності параметрів буріння, що призначаються машиністом-оператором, має відносну помилку до 90-100 %;
- оперативне регулювання параметрів буріння викликає необхідність розробки якісно нових математичних моделей процесу буріння, що не мають на сьогоднішній день оптимальних алгоритмів управління осьовим зусиллям подачі бурового ставу та частотою обертання долота;
- необхідно розробити алгоритми управління шарошковим верстатом, які можуть бути реалізовані в системі управління буровим

верстатом як самостійна компонента верстата, з можливістю її інтеграції до структури АСУ ТП ділянки БВР та на рівні управління гірничим підприємством.

При вирішенні питання оптимізація параметрів режиму буріння вибухових свердловин шарошковими верстатами необхідно буде вирішити такі питання:

- розробка алгоритмів управління параметрами обертально-подавального механізму, що забезпечують повне вироблення паспортного ресурсу долота;
- розробка алгоритмів керування шарошковим верстатом у режимі буріння;
- розробка математичної моделі зв'язків параметрів обертально-подавального механізму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міжнародна конференція «Виклики забезпечення мінеральною сировиною України в умовах повоєнної відбудови». – 29.05.2023р. – Дніпро.
2. Долгов Б.П. Использование законов, закономерностей и противоречий развития техники в прогнозировании научно-технического прогресса буровых работ / Б.П.Долгов, Л.М. Медведева // Экономика горнодобывающей промышленности. - Алма-Ата.: КазПТИ, 1983. - С. 57-61.
3. Кутузов Б.Н. Теория, техника и технология буровых работ / Б.Н. Кутузов. - М.: «Недра». - 1972. - 312 с.
4. Подэрни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых горных работ / Р.Ю. Подэрни. - 3-е изд. I том, - М.: Издательство МГГУ, 1998. - 422 с.
5. Mosin, A.E. On the damage zone surrounding a single blasthole. // Proceedings 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting - 1986. - №.5 - pp. 22-34..
6. Roskamp, M. Steinbruchverhältnisse in den USA. / M. Roskamp, W. Oerter // Naturstein ind. - 1973. - №1-2. - Pp.29-34
7. Орлов А.В. Оптимизация параметров режима бурения на основе опытно-промысловых работ / А.В. Орлов, А.С. Копылов, А.Я. Виноградова // Бурение. - 1983. - Вып. 2(41).
8. Buki, P. Tightening the best on production cost / P. Buki, B. Nischk // Il Pit and Quarry. – 1986. – № 3. – Pp. 38–44.
9. Демидюк Г.П. О видимых проявлениях откольного механизма разрушения горных пород взрывом. – В кн.: Механизм разрушения горных пород взрывом. Київ: Наук. думка, 1971, - 364 с.
10. Leng, Z., Fan, Y., Gao, Q., & Hu, Y. (2020a). Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes

in open-pit mine. International Journal of Mining Science and Technology, 30(3), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.010>

11. Yuanjuan, Z. (2014). Study on Attenuation Law of Open-pit Bench Blasting Vibration. Procedia Engineering, 84, 868–872. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.508>.

12. Бадалов Р.А. Определение механической скорости проходки в зависимости от режимных параметров бурения / Р.А. Бадалов // Изв. ВУЗов. Нефть и газ. – 1960. - №1.

13. Межлумов А.О. Основные факторы, влияющие на механическую скорость проходки / А.О. Межлумов // Бурение. - 1980.

14. Морфи Д. Факторы, влияющие на скорость бурения / Д. Морфи // Бурение. - 1969. - Вып. 12. - С. 28-32.

15. Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications. // Oxford: B-H/Elsevier Science, 2016. – 345p.

16. Федоров В.С. Проектирование режимов бурения / В.С. Федоров. - М.: Гостоптехиздат, 1958.

17. Djordjevic, N. Two-component of blast fragmentation / N. Djordjevic // Proceedings of the Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast. – South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa, 1999. – Pp. 213–219.

18. Шрейнер Л.А. Влияние числа оборотов на скорость бурения шарошечными долотами / Л.А. Шрейнер, Гань Чжи-Цзянь // Нефтяное хозяйство. - 1956. - №12.

19. Lingen Van N.H. Bottom scavenging -a major factor governing penetration rates at depth / N.H. Lingen Van // J. Petroleum Technology. - 1962. - February. - P. 187-196.

20. Feenstra R. Full-scale experiments on jets impermeable rock drilling / R. Feenstra, Leewen J.M Van // J. Petroleum Technology. - 1964. - Vol. 16. - N.3. - P. 329-336.

21. Бінгхем М.Г. Проблемы буримости горных пород // Бурение. - 1966. - Ч. 1-2.
22. Осипов П.Ф. Исследование работы гидромониторных долот при турбинном бурении с применением турботахометров / П.Ф. Осипов, А.К. Козодой, А.А. Босенко // Нефтяное хозяйство. - 1968. - №8.
23. Осипов П.Ф. Использование зависимости проходки долота за один оборот от осевой нагрузки для оптимизации режима бурения в промысловых условиях / П.Ф. Осипов // Бурение. - 1974. - №11.
24. Осипов П.Ф. Фильтрационные потоки на забое скважины при бурении гидромониторными долотами / П.Ф. Осипов, В.И. Зелепукин // Нефтяное хозяйство. - 1986. - №9. - С. 32-34.
25. Осипов П.Ф. Фильтрация жидкости через поверхность забоя под влиянием подвижной гидромониторной струи / П.Ф. Осипов, В.И. Зелепукин // Разрушение горных пород при бурении скважин: Тез. докл. 4-й Всесоюз. науч.-техн. конф. - М., 1986.
26. Esen, S. Modeling the size of the crushed zone around a blasthole / S. Esen, I. Onederra, H.A. Bilgin // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2003. – V.40. – Pp. 485–495.
27. Charles Noren. Blasting experiments in granite rock. Quarterly of Colorado. School of Mines. Vol. 51, № 3, 1956, P. - 215.
28. Drukovanyi, M.F. Calculation of fracture zones created by exploding cylindrical charges in ledge rocks / M.F. Drukovanyi, V.S. Kravtsov, Y.E. Chernyavskii, V.V. Reva // Soviet Mining Science. – 1976. – №12(3). – Pp. 292-295.
29. Каменских С.В. Моторесурс опоры шарошечных долот / С.В. Каменских, П.Ф. Осипов, И.И. Волкова // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - М., 1996. - №4.
30. Kumao Hino. Effect of discontinuity of rock on fragmentation. Journal of the industrial explosives society, Japan. Vol. 18, № 4, 1957. P. -

229. Paterson M., Experimental Rock Deformation. - Spring, New York, 1978. – P. 255.

31. Stepanov O.F., N.N.Peschanskaya, V.V. Shepeizman and G.A.Nikonov. Longevity of solids at complex loading. // Int. J.of Fracture - 1975. P. - 803-815.

32. Tomashevskii E.E., Zakrevskii V.A., Novak I.I., Korsukov V.E., Regel V.R., Pozdnyakov O.F., Slutsker A.I., Kuksenko V.S., Kinetic micromechanics of polymer fracture.//Int.J. of Fracture - 1975. P. - 316 – 329.

33. Сомкин М.И. Некоторые вопросы измерения и контроля параметров режима шарошечного бурения / М.И. Сомкин А.И., Глатоленков // Совершенствование открытых разработок недр Казахстана. - Алма-Ата, АН Казахской ССР, 1970.

34. Петров И.П. Самонастраивающаяся система регулирования процесса бурения и результаты её испытаний / И.П. Петров, Н.Б. Ситников // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1967. - №12. С. 148-153.

35. Maerz, N. H., Reconstructing 3-D Block Size Distributions from 2-D Measurements on Sections. Proc. ISRM/Fragblast 5 Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement, Montreal, Publi.A.A.Balkema, 1996. - P. 39-43.

36. Терехов Н.И. Оптимизация режимов бурения с применением дополнительного функционала качества / Н.И. Терехов, И.С. Авраамов, П.Д. Гаврилов // Автоматизация и электрификация в горной промышленности. Алма-Ата: “Наука”, 1973. - С. 224-228.

37. Bai, R., Zhang, P., Zhang, Z., Sun, X., Fei, H., Bao, S., Hu, G., & Li, W. (2023). Optimization of blasting parameters and prediction of vibration effects in open pit mines based on deep neural networks. Alexandria Engineering Journal, 70, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.02.043>

38. Maerz, N. H., Palangio, T. C., and Franklin, J. A., WipFrag image based granulometry system. Proceedings of the FRAGBLAST5 Workshop

on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, 1996.
- P. 91-99.

39. Бизов В.Ф., Федоренко П.Й. Вибухові роботи. – Т. Х.- Кривий Ріг: Мінерал, 2001. – 247 с. з іл..

40. Цыганков В.А. Адаптированная система управления процессом бурения с комбинированным управлением / В.А. Цыганков // Изв. вузов. Приборостроение, 1971. - т. XIV. - №4, С. 39-43.

41. Paramonov G.P. Influence of power characteristics of explosives on strength properties of pieces of the blown-up mountain weight. / G.P. Paramonov, V.A. Isheysky // Proceedings of the 8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction. Songzhuyuan, China. Metallurgical Industry Press. 2014. - P. 161- 165.

42. Черноруцкий Г.С., Буткин В.Д., Цыганков В.А., Сибрин А.П. Устройство для автоматического управления буровыми станками. А.с. № 148367, кл. E21B 44/00 от 10.05.1961. Б.И., 1973, №1, - с. 159.

43. Волков А.А. Экстремальное управление буровыми машинами вращательного действия / А.А. Волков, В.Ф. Шостак // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1966. - №3. – С. 26-31.

44. Кардыш В.Г. Повышение эффективности работ буровых станков / В.Г. Кардыш. - Недра, 1980.- 184 с.

45. Плотко М.А. Устройство для привода, подачи и вращения бура. А.с. №976051 кл. E21C 5/08 от 03.06.1981.Б.И., 1982, №43, - с. 186.

46. Спивак А.И. Об оценке абразивности горных пород / А.И. Спивак, А.Н. Попов // Нефтяное хозяйство. – 1968. - №1.

47. Мокшин А.С. Шарошечные долота / А.С. Мокшин, Ю.Е. Владиславлев, Э.Л. Комм. - Недра. – 1971. - 216 с.

48. Пахомов Е.М. Поддержание оптимальных режимов бурения в породах переменной крепости на карьерах / Е.М. Пахомов // Горный журнал, 1970. - №3. - С. 31-33.

49. Терехов Н.И. Исследование режимов бурения взрывных скважин и разработка двухканальной системы их оптимизации / Н.И. Терехов // Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. - Кемерово, Кузбасский политехнический институт. - 1971.

50. Тетельбаум И.М. 400 схем для АВМ / И.М. Тетельбаум, Ю.Р. Шнейдер. - М.: Энергия. - 1978. - 248 с.

51. Петров И.П. Регулирование процесса бурения на максимум проходки на долото / И.П. Петров, Н.Б. Ситников // Изв. Вузов. Горный журнал. - 1967. - №3. - С. 125-129.

52. Петров И.П. Определение оптимальной нагрузки на долото и времени чистого бурения, оптимальных по стоимости одного метра проходки скважины / И.П.Петров, Н.Б. Ситников, И.А. Бордов // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1975. - №2. - С. 61-66.

53. Гафиятуллин Р.Х. Система экстремального управления режимом ударно-вращательного бурения / Р.Х. Гафиятуллин, А.Е. Трон // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1967. - №10. - С. 162-167.

54. Тангаев И.А. Буримость и взрываемость горных пород / И.А. Тангаев. - Недра. - 1978. - 184 с.

55. Буткин В.Д. Система автоматического поиска и поддержания оптимального режима бурения шарошечными станками при проходке взрывных скважин на карьерах / В.Д. Буткин, Р.Х. Гафиятуллин, А.А. Жуковский // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1969. - №11. - С. 80-82.

56. Марасанов Ю.П. Релейная система автоматизации буровых шарошечных станков / Ю.П. Марасанов, А.Е. Троп, В.А. Боровиков // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1971. - №2. - С. 66-171.

57. Петров И.В. Оценка степени износа и эффективности использования долота при вращательном бурении / И.В. Петров // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1966. - №11. - С. 81-87.

58. Ситников Н.Б. Сравнительный анализ критериев оптимизации при вращательном бурении скважин / Н.Б. Ситников, И.П. Петров, И.А. Бердов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1972. - №4. - С. 134-138.

59. Цой С. Дискретные модели горного производства / С. Цой, А.И. Шерман // Алма-Ата: “Наука”, КазССР. - 1981. - 248 с.

60. Кутузов Б.Н. Взрывное и механическое разрушение горных пород / Б.Н. Кутузов - Недра, 1973. - 312 с.

61. Буткин В.Д. Проектирование режимных параметров автоматизированных станков шарошечного бурения / В.Д. Буткин. - Алма-Ата: “Наука”, 1979. - 208 с.

62. Ломакин М.С. Автоматическое управление технологическими процессами карьеров / М.С. Ломакин. - Алма-Ата: “Наука”, 1978. - 280 с.

63. Терехов Н.И. О выборе метода поиска экстремума при автоматическом управлении буровым станком / Н.И. Терехов, И.С. Авраамов // Изв. Вузов. Горный журнал. - 1969, №3, с. 146-150.

64. Остроушко И.А. Бурение твердых горных пород / И.А.Остроушко. – Алма-Ата: “Наука”, 1966.

65. Буткин В.Д. Зависимость показателей работы шарошечных долот от режимов бурения / В.Д. Буткин // Горный журнал. - №10. – С. 196.

66. Симкин Б.А. Исследование технологических параметров и условий эффективного применения забойных машин при транспортной системе открытой разработки месторождений / Б.А.Симкин //

автореферат диссертации на соискание уч. степени д.т.н. – 1966. – 24с.

67. Громадский А.С. Исследование влияния вибрации на оператора и на надежность работы станков шарошкового бурения / А.С. Громадский, В.А. Громадский, Д.И. Кузьменко // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук, праць. – 2010. - № 25. - С. 191-195.

68. Равцов М.В. О создании системы регулирования режимов бурения станка СБШ-250МН / М.В. Равцов // Горный журнал. – 1978. - №6. – С. 54-56.

69. Равцов М.В. Виброзащита машин шарошкового бурения / М.В. Равцов // Горный журнал. - 1984. - № 7. - С. 45-47.

70. Равцов М.В. Разработка методов расчета опорно-подающей системы станка шарошкового бурения с ограничением колебаний бурового става / М.В. Равцов // Автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.06 «Горные машины». - Институт геотехнической механики. - Днепропетровск, 1985. - 20 с.

71. Устройство регулирования режимов бурения: А.с. № 985470, М.Кл.3 Р15В 11/04 / М.В. Равцов. - № 3326459/25-06: Заявл. 13.07.81; Опубл 13.12.82, Бюл. №48.

72. Устройство регулирования усилия подачи долота в буровом станке: А.с. №989060, М.Кл.3 Е 21 С 5/16 / В.И. Пахомов, А.Н. Погорелый, Е.А. Шаповалов, М.В. Равцов. - № 3327629/25-03: Заявл. 05.08.81; Опубл. 15.01.83, Бюл. №2.

73. Декл. патент на винахід №29672А Україна, МКИ Е21В45/00, 44/00 / Равцов Михайло Васильевич. — № 96073062; Заявл. 30.07.96, Опубл. 15.11.00, Бюл. - №6.

74. Сынков В.Г. Исследование бурового инструмента с ударным и режущим воздействием твердосплавных зубков на забой / В.Г. Сынков, С.В. Кононыхин, А.И. Повзун, П.С. Кернис // Физико-

технические проблемы горного производства. - 2016. - Вып. 18. – С.194-203.

75. Мусарский В.Э. Исследование бурения взрывных скважин шарошковыми станками и разработка регулятора их производительности / В.Э. Мусарский // автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.172 / Кривой Рог, 1971. – 23 с.

76. Мусарский В.Э. К вопросу получения математической модели процесса шарошечного бурения методом факторного планирования эксперимента / В.Э. Мусарский // Техн. кибернетика. – 1969.– Вып. 2. – С. 65–71.

77. Коваль П.В. Гидравлика и гидропривод горных машин / Коваль П.В. // Учебник для вузов по специальности «Горные машины и комплексы». - Алма-Ата.: КазПТИ, 1979. - 319 с.

78. Вовк О.О., Лучко І.А. Управління вибуховим імпульсом у породних масивах. – Київ: Наук. думка, 1985. – 216 с.

79. Фролов К.В. Механика и искусство конструирования в эпоху ЭВМ / К.В. Фролов, В.И. Бабицкий // Изобретатель и рационализатор. - Алма-Ата.: КазПТИ, 1986. - №12. - С. 16-17.

80. Демидюк Г.П. Управление действием взрыва при горных работах. Сб. научные основы технологии открытых горных работ. Київ: Наука. 1969, - с. 48 – 63.