

622,24,057
ЦБЧ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ


ЩЕРБИЙ РУСЛАН БОГДАНОВИЧ

УДК 622.24.057
ЦБЧ 0043

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ
ШАРОШКОВИХ ДОЛІТ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ**

05.15.10 – Буріння свердловин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мойсишин Василь Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
завідувач кафедри вищої математики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Кунця Ярослав Васильович,
ПрАТ "Науково-дослідне і конструкторське
бюро бурового інструменту", м. Київ,
генеральний директор

кандидат технічних наук
Мрозек Євген Романович,
ТОВ "Укрбурсервіс", м. Київ,
технічний директор

Захист відбудеться " 17 " жовтня 2014 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.20.052.02 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розіслано " 11 " 09 _____ 2014 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



І.М. Ковбасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Енергетична стратегія України до 2030 р. передбачає розширення об'ємів буріння та зменшення термінів будівництва свердловин. Процес буріння є найбільш енергозатратним зі всього циклу будівництва свердловини. Величина енергії, яка підводиться до шарошкового долота під час роторного буріння, складає 12 – 15 % від загальної енергії, використаної на поглиблення свердловини. За взаємодії бурильного інструменту з вибоєм свердловини виникають коливання корпусу долота, енергія яких у 5 разів перевищує енергію процесу руйнування породи.

Для її зменшення в конструюванні низу бурильної колони включають віброзахисні пристрої (ВЗП). За результатами промислових випробувань з'ясовано вплив цих пристроїв на основні техніко-економічні характеристики процесу буріння. Використання ВЗП змінює жорсткість і демпфування компоновки низу бурильної колони.

Вивчення закономірностей перерозподілу енергії, підведеної до долота, дає можливість підвищити ефективність процесу буріння з одночасним зниженням енергозатрат на будівництво свердловин. Отже, збільшення механічної швидкості та зменшення енергоємності процесу руйнування гірської породи є актуальними проблемами зі створення нових ефективних технологій буріння свердловин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота відповідає науковим напрямкам діяльності нафтогазового комплексу України, відноситься до галузевої проблеми і тематичних планів ПАТ “Укрнафта” (наряди-замовлення № 210371, № 210841, № 231841) і спрямована на виконання основних показників “Енергетичної стратегії України до 2030 року”.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності поглиблення свердловин роторним способом на основі аналізу результатів стендових експериментальних досліджень впливу жорсткості та демпфування бурильного інструменту на механічну швидкість та енергоємність процесу руйнування породи.

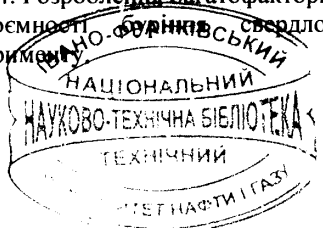
Основні задачі дослідження:

1. Аналіз впливу жорсткості та демпфування бурильного інструменту на механічну швидкість та енергоємність руйнування гірської породи за результатами огляду літератури.

2. Удосконалення методики обробки записів поглиблення свердловин шарошковими долотами та розроблення методики визначення енергоємності процесу руйнування гірської породи.

3. Встановлення на основі аналізу результатів стендових експериментальних досліджень впливу жорсткості та демпфування бурильного інструменту на механічну швидкість і енергоємність поглиблення вибоєм свердловини.

4. Розроблення багатofакторних емпіричних моделей механічної швидкості та енергоємності буріння свердловини на основі результатів планованого експерименту.



5. Адаптація результатів стендових експериментальних досліджень до промислових умов буріння свердловин шарошковими долотами.

Об'єкт дослідження – процес поглиблення вибою свердловини шарошковими долотами на стенді з урахуванням жорсткості та демпфування наддолотних пристроїв.

Предмет дослідження – вплив жорсткості та демпфування бурильного інструменту на механічну швидкість буріння та енергоємність процесу руйнування гірської породи.

Методи дослідження: експериментальні стендові і промислові дослідження впливу режимних параметрів і характеристик бурильного інструменту на інтегральні показники поглиблення свердловин та їх аналіз методами емпіричної статистики (визначення статистичних характеристик вибірок, перевірка статистичних гіпотез, апроксимація експериментальних даних емпіричними залежностями), теорія планування експериментів, аналіз розмірностей з використанням критеріїв подібності.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено методику обробки записів поглиблення свердловини, яка дає можливість виділяти однорідні за буримістю інтервали гірських порід; запропоновано методику обробки записів обертового моменту на долоті та визначення енергоємності процесу руйнування гірської породи.

2. Вперше за результатами експериментальних стендових досліджень встановлено емпіричні кореляційні залежності механічної швидкості та енергоємності руйнування гірської породи від жорсткості та демпфування бурильного інструменту.

3. На основі результатів експерименту вперше одержано багатофакторні емпіричні моделі механічної швидкості та енергоємності руйнування гірської породи на вибої свердловини, які враховують параметри бурильного інструменту.

4. Вперше у промислових умовах одержано багатофакторну емпіричну модель механічної швидкості буріння свердловини, яка враховує жорсткість низу бурильної колони.

Основні положення, що захищаються.

1. Результати стендових експериментальних досліджень впливу жорсткості та демпфування бурильного інструменту на механічну швидкість та енергоємність буріння свердловини.

2. Результати планованих експериментів, на основі яких отримано багатофакторні емпіричні моделі механічної швидкості та енергоємності процесу руйнування гірської породи шарошковими долотами.

3. Результати промислових досліджень, на основі яких отримано багатофакторну емпіричну модель механічної швидкості буріння свердловини роторним способом, яка враховує жорсткість низу бурильної колони.

Практичне значення одержаних результатів.

1. На основі багатофакторної емпіричної моделі енергоємності руйнування гірської породи розроблено методику підбору пристроїв зміни жорсткості КНБК для буріння свердловин роторним способом.

2. Розроблено методику адаптації багатофакторної емпіричної моделі механічної швидкості буріння до промислових умов.

3. За результатами впровадження методик одержано збільшення механічної швидкості при бурінні 15 дегазаційних свердловин на площах шахтоуправління "Покровське" ПрАТ "Донецьксталь-металургійний завод".

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертації одержані автором самостійно. В опублікованих у співавторстві роботах автором особисто:

- проаналізовано конструкції бурових стендів для дослідження процесу руйнування гірських порід та пристроїв зміни динаміки бурильного інструменту [5, 6];

- за результатами аналізу записів проходки на долото побудовано емпіричні залежності механічної швидкості буріння від режимних параметрів поглиблення свердловини та механічної швидкістю буріння від жорсткості та демпфування бурильного інструменту [2, 3, 9];

- за результатами аналізу записів обертового моменту на долоті побудовано емпіричні залежності енергоємності процесу руйнування гірських порід від параметрів бурильного інструменту [1, 10];

- скориговано результати планованого експерименту для одержання багатофакторних емпіричних моделей механічної швидкості та енергоємності процесу буріння за методиками Протодяконова та Яремійчука-Райхерта [4, 7];

- на основі методик [11, 12] адаптовано одержану на стенді емпіричну модель механічної швидкості буріння до промислових умов [8].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались на:

- науково-технічній конференції "Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікація нафтогазовидобутку на родовищах України" (м. Івано-Франківськ, 2010 р.);

- міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика-2011" (м. Івано-Франківськ, 2011 р.);

- наукових семінарах кафедри буріння нафтових і газових свердловин Івано-Франківського національного технічного університету нафти газу (м. Івано-Франківськ, 2009 – 2014 р.р.)

Публікації. За результатами досліджень, що викладені в дисертації, опубліковано 12 наукових праць, з них 8 статей у фахових виданнях (в т.ч. одна стаття у виданні, що індексується у базі даних Scopus), тези двох доповідей на конференціях та два інструктивних документи.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і п'яти додатків. Матеріал викладено на 188 сторінках, робота містить 39 рисунків, 100 таблиць, перелік літературних джерел з 104 найменувань.

Автор висловлює щирю подяку науковому керівнику, д.т.н., професору Мойсину В.М. за допомогу і корисні поради та доценту кафедри механіки машин Борисевичу Б.Д. за надані первинні матеріали експериментальних досліджень (записи проходки та обертового моменту на долоті), одержані на буровому стенді ІФНТУНГ.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми сформульовано мету і завдання досліджень, зазначено практичну цінність і шляхи її реалізації у практику буріння свердловин.

У першому розділі наведено аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень впливу характеристик бурильного інструменту на основні техніко-економічні показники (ТЕП) буріння свердловин та енергоємність процесу руйнування гірської породи.

Відзначено вагомий внесок В.П. Балицького, П.В. Балицького, Ф.І. Бевзюка, П.С. Варламова, В.І. Векерика, В.С. Владиславлева, Р.О. Ганджумяна, В. Гаррета, Р.М. Ейгелеса, Є.Ф. Епштейна, Р.А. Іонесяна, Ю.Р. Іонесяна, М.О. Колеснікова, Я.В. Кунцяка, М.Р. Мавлютова, М.А. Мислюка, В.М. Мойсина, Д.Ю. Мочернюка, П.І. Огороднікова, М.І. Пехньо, Ю.Ф. Потапова, Г.Н. Семенцова, В.В. Сімонова, Л.Е. Симонянца, Р.В. Стрекалової, Б.З. Султанова, В.С. Федорова, О.І. Цихана, Б.О. Чернова, І.І. Чудика, Р.С. Яремійчука у вивчення питань даної проблематики.

Одним зі шляхів підвищення техніко-економічних показників поглиблення свердловин є включення в компонування низу бурильної колони (КНБК) віброзахисних пристроїв (амортизаторів, регуляторів, демпферів, пружних муфт тощо). За результатами експериментальних досліджень встановлено, що за використання цих пристроїв у бурильній колоні спостерігається збільшення механічної швидкості буріння v_m на 15 – 25 % і проходки на долото h на 25 – 35 %. При цьому собівартість одного метра буріння зменшується на 10 – 15 %.

Проте не у всіх випадках застосування амортизаторів спостерігається покращення ТЕП буріння. На сьогодні не встановлено експериментальних кореляційних залежностей між v_m і h з одного боку та жорсткістю і демпфуванням ВЗП з другого боку.

Задачі стендових і промислових досліджень руйнування породи зводились в основному до з'ясування залежності енергоємності цього процесу від осьового навантаження на породоруйнівний елемент. Енергоємність процесу руйнування гірських порід визначається величиною питомої об'ємної роботи W_{II} , яка витрачається на руйнування 1 см³ гірської породи і вимірюється в Н·м/см³.

За винятком робіт Ю.Ф. Потапова і В.В. Сімонова, які крім цього вивчали вплив твердості породи, діаметра, конструктивних особливостей та частоти обертання долота на W_{II} , досліджень, метою яких була б оцінка впливу інших факторів (зокрема жорсткості C і демпфування β бурильного інструменту) на енергоємність процесу буріння свердловин не виявлено.

У науковій літературі відсутні також багатофакторні емпіричні моделі механічної швидкості та енергоємності поглиблення вибою свердловини, які б враховували параметри C , β низу бурильної колони.

На основі аналізу теоретичних, експериментальних і промислових досліджень процесу руйнування породи сформульовано мету та задачі роботи.

У другому розділі запропоновано методику обробки проходки h на долото, що складається з трьох етапів:

1) Виділення однорідних за буримістю інтервалів розрізу свердловини.

2) Визначення статистичних характеристик вибірок значень механічної швидкості буріння на виділених інтервалах та перевірка відповідності цих вибірок нормальному закону розподілу.

3) Виділення вибірок значень механічної швидкості буріння, які відносяться до однієї генеральної сукупності, з використанням статистичної перевірки параметричних гіпотез.

Для виділення однорідних умовно лінійних ділянок запису проходки пропонується використовувати два критерії:

– перевірка гіпотези про рівність нулю коефіцієнта кореляції генеральної сукупності експериментальних даних;

– визначення коефіцієнтів рівняння лінійної регресії за експериментальними даними та перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{h}$, де σ_0 – середнє квадратичне відхилення значень лінійної моделі від експериментальних значень, \bar{h} – середнє значення проходки на долото в заданому інтервалі.

При виконанні цих умов, на відміну від існуючих методик, перевірка адекватності рівняння лінійної регресії експериментальним даним за методом однофакторного дисперсійного аналізу не проводиться.

Запропоновано два підходи до визначення середнього значення енергоємності процесу руйнування гірської породи за записами проходки h та обертового моменту T_d на долоті.

Згідно першого з них знаходимо миттєві значення енергоємності W_{in} на елементарних ділянках запису $h(t)$ за формулою:

$$W_{in} = 48 \frac{n_d \cdot \bar{T}_{db}^i}{d_d^2 \cdot v_{m,i}}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

де m – кількість реалізацій обертового моменту (об'єм ансамблю або сімейства реалізацій), одержаних для одного або декількох паралельних дослідів за однакових умов буріння (умовно лінійних ділянок записів $h(t)$, що відповідають приблизно однаковим за твердістю пропласткам гірської породи); \bar{T}_{db}^i – середнє реалізації, що відповідає i -тій елементарній ділянці; $v_{m,i}$ – миттєва швидкість буріння, що відповідає i -тій елементарній ділянці; n_d – частота обертання долота; d_d – діаметр долота.

Середнє значення енергоємності \bar{W}_{in} при першому підході дорівнює

$$\bar{W}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^m W_{in}}{m}. \quad (2)$$

При другому підході оперуємо середнім значенням обертового моменту на долоті

$$\bar{T}_d = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{T}_{d_i}}{m} \quad (3)$$

та середнім значенням механічної швидкості \bar{v}_m вибірки паралельних дослідів, що відповідають приблизно однаковим за твердістю пропласткам гірської породи. Цю вибірку формуємо за результатами порівняння статистичних характеристик умовно лінійних ділянок записів $h(t)$ паралельних дослідів. Середнє значення енергоємності \bar{W}_n у цьому випадку:

$$\bar{W}_n = 48 \frac{n_d \cdot \bar{T}_d}{d_d^2 \cdot \bar{v}_m} \quad (4)$$

У розділі наведено приклади визначення миттєвих значень енергоємності процесу руйнування гірської породи.

Третій розділ присвячено стендовим дослідженням впливу жорсткості C і демпфування β бурильного інструменту на механічну швидкість буріння свердловин. Значення параметрів C, β незалежні один від одного.

Для зміни жорсткості використовувались гвинтові пружини стиску, а для зміни демпфування – гідравлічні поглиначі коливань з різною кількістю дросельних отворів.

В ІФНТУНГ для проведення експериментальних досліджень на базі верстата СБА-500 створено буровий стенд, оснащений інформаційно-вимірювальним комплексом. З метою встановлення залежностей між механічною швидкістю v_m з одного боку та режимними параметрами процесу буріння (осьовим статичним навантаженням на долото $F_{ст}$ і частотою обертання n_d) і характеристиками C, β бурильного інструменту з другого боку проведено 146 серій паралельних експериментів за класичною схемою. Загалом було пробурено 459 свердловин у блоках граніту, бурого вапняку і пісковиків воротищенської та стрийської світ долоатами типорозмірів III-93С-ЦА, III-93Т-ЦА, III-93К-ЦА, III-76ОК-ЦА. Витрата промивальної рідини була постійною, складала 7 л/с і забезпечувала повне очищення вибою від шламу.

У табл. 1 наведено результати статистичної обробки перших 40 серій (124 дослідів), метою яких було з'ясування чи впливають параметри C, β на механічну швидкість за тих чи інших твердості породи і типорозміру долота.

На основі перевірки параметричних гіпотез з ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що за умови відповідності типу долота твердості гірської породи зменшення жорсткості бурильного інструменту веде до збільшення механічної швидкості поглиблення вибою свердловини (серії 1 – 10, 13 – 18, табл. 1).

Вплив демпфування β на механічну швидкість v_m спостерігається тільки при його малих (до 1 кН·с/м) значеннях. Результати досліджень свідчать що зміна демпфування з 40 до 70 кН·с/м не вплинула на механічну швидкість буріння, гіпотеза про рівність середніх значень цих вибірок підтверджується.

Метою наступних 47 серій експериментів (143 дослідів) було встановлення емпіричних залежностей між осьовим статичним навантаженням на долото та механічною швидкістю буріння за різних рівнів жорсткості бурильного інструменту.

Таблиця 1 – Статистичні характеристики вибірок середніх значень механічної швидкості буріння v_{mi}^c паралельних дослідів за результатами 1 – 40 серій експериментальних досліджень

Серія	P_{ms} , МПа	Долото	β , кН·с/м	C , кН/м	v_{mi}^c , м/год	$\bar{v}_m \pm \delta_v$	D_m , (м/год) ²	
1	2300	III-93С-ЦА	0,1	225	2,9; 3,3; 3,04	3,08±0,34	0,0412	
2				6000	1,95; 2,3; 2,02	2,09±0,31	0,0343	
3	1440	III-93Т-ЦА		225	7,01; 6,19; 6	6,4±0,90	0,2881	
4				6000	4,62; 3,97; 4,29	4,29±0,55	0,1056	
5	2050	III-93Т-ЦА	0,1	225	2,95; 3,52; 3,15; 4,3	3,48±0,70	0,3546	
6				6000	3,04; 2,4; 2,26	2,57±0,70	0,1729	
7	2500			400	0,98; 1,32; 1,3	1,2±0,32	0,0364	
8				6000	0,65; 0,71; 0,74; 0,7	0,7±0,10	0,0014	
9	3120	III-76ОК-ЦА		225	2,24; 2,3; 2,06	2,2±0,21	0,0156	
10				6000	1,83; 1,83; 1,69; 1,66	1,74±0,18	0,011	
11		III-93С-ЦА		225	1,38; 1,45; 1,25	1,36±0,17	0,0103	
12				6000	1,38; 1,26; 1,47	1,37±0,18	0,0111	
13		III-93Т-ЦА	225	0,86; 0,95; 0,77	0,86±0,15	0,0081		
14			6000	0,77; 0,75; 0,7	0,74±0,06	0,0013		
15		III-93К-ЦА	225	1,21; 1,34; 1,47	1,34±0,22	0,0169		
16			6000	0,95; 1; 1,05; 0,99	1±0,05	0,0017		
17		III-93С-ЦА	225	1,75; 1,98; 1,94	1,89±0,21	0,0151		
18			6000	1,43; 1,54; 1,62	1,53±0,16	0,0091		
19		III-93Т-ЦА	225	1,41; 1,38; 1,29	1,36±0,11	0,0039		
20			6000	1,29; 1,31; 1,39	1,33±0,09	0,0028		
21	1440	III-93Т-ЦА	40	225	4,64; 4,42; 5,01	4,69±0,50	0,0889	
22				1700	4,3; 4,42; 4,33	4,35±0,11	0,0039	
23	2050			225	2,78; 2,55; 3,01	2,78±0,39	0,0529	
24				1700	2,73; 2,71; 2,66	2,7±0,06	0,0013	
25	1440	III-93Т-ЦА		70	225	4,73; 3,84; 5,38	4,65±1,30	0,5977
26					1700	4,3; 4,32; 4,16	4,65±0,15	0,0076
27	2050				225	2,64; 2,58; 2,67	2,63±0,08	0,0021
28					1700	2,59; 2,49; 2,53	2,54±0,08	0,0025
29	1440	III-93Т-ЦА	0,1		225	7,01; 6,19; 6	6,4±0,58	0,2881
30						40	4,64; 4,42; 5,01	4,69±0,32
31			70			4,73; 3,84; 5,38	4,65±0,84	0,5977
32			2050			0,1	3,15; 2,95; 4,34	3,48±0,82
33				40		2,78; 2,55; 3,01	2,78±0,25	0,0529
34			1440	70		2,64; 2,58; 2,67	2,63±0,05	0,0021
35				0,1		6,35; 5,45; 5,95	5,92±0,49	0,2033
36			2050	40		4,3; 4,42; 4,33	4,35±0,07	0,0039
37				70		4,3; 4,32; 4,16	4,65±0,09	0,0076
38			1440	0,1		3,0; 2,88; 2,91	2,93±0,07	0,0039
39				40		2,73; 2,71; 2,66	2,7±0,04	0,0013
40			70	2,59; 2,49; 2,53		2,54±0,05	0,0025	

Апроксимацію експериментальних даних емпіричною залежністю вважаємо задовільною, якщо умова $\sigma_0 < 0,1\bar{v}_m$ виконується, де σ_0 – середнє квадратичне відхилення значень емпіричної залежності від експериментальних даних, \bar{v}_m –

середнє значення механічної швидкості за відповідного рівня осьового статичного навантаження F_{CT} .

За результатами 41 – 54 серії дослідів підібрано степеневі емпіричні залежності $\bar{v}_m = 0,021 \cdot F_{CT}^{1,4440}$ для жорсткості 225 кН/м та $\bar{v}_m = 0,005 \cdot F_{CT}^{1,7886}$ для жорсткості 6000 кН/м. Умова $\sigma_0 < 0,1\bar{v}_m$ в обох випадках виконується. В табл. 2 наведено експериментальні та відповідні їм розрахункові значення, знайдені за цими залежностями. Подібним чином підбирались залежності $\bar{v}_m = f(F_{CT})$ при розбурюванні порід твердістю 1440, 2050 і 2500 МПа долотом III-93Т-ЦА.

Таблиця 2 – Експериментальні та розрахункові значення середньої механічної швидкості буріння

C = 225 кН/м									
F_{CT}	кН	0	2,5	5	7,5	10	15	20	25
Експ. дані	м/год	0	0,08	0,22	0,38	0,58	1,05	1,65	2,2
Формула		$\bar{v}_m = 0,021 \cdot F_{CT}^{1,4440}$							
\bar{v}_m	м/год	–	0,079	0,215	0,385	0,584	1,049	1,589	2,192
C = 6000 кН/м									
F_{CT}	кН	0	2,5	5	7,5	10	15	20	25
Експ. дані	м/год	0	0,029	0,09	0,19	0,34	0,7	1,11	1,74
Формула		$\bar{v}_m = 0,005 \cdot F_{CT}^{1,7886}$							
\bar{v}_m	м/год	–	0,026	0,089	0,184	0,307	0,635	1,063	1,584

Таблиця 3 – Результати підбору залежностей $\bar{v}_m = f(F_{CT})$

№ серії	C, кН/м	$p_{ин}$, МПа	Типо долота	Емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{v}_m$
55, 57, 59, 61, 63, 66	225	1440	III-93Т-ЦА	$\bar{v}_m = 0,419 F_{CT}^{1,1227}$	0,9948 P>0,999	0,51<0,91
56, 58, 60, 62, 64, 65, 67	6000			$\bar{v}_m = 0,325 \cdot F_{CT}^{1,1569}$	0,9941 P>0,999	0,38<0,87
68, 70, 72, 75	225	2050		$\bar{v}_m = 0,306 \cdot F_{CT}^{1,0536}$	0,9973 P>0,99	0,23<0,42
69, 71, 73, 74	6000			$\bar{v}_m = 0,449 \cdot F_{CT}^{0,7034}$	0,9788 P>0,95	0,2<0,23
78, 80, 82, 84, 86, 88	1480	2500		$\bar{v}_m = 0,006 \cdot F_{CT}^{1,6094}$	0,9738 P>0,998	0,022<0,06
77, 79, 81, 83, 85, 87, 89	6000			$\bar{v}_m = 0,053 \cdot F_{CT}^{0,7704}$	0,9866 P>0,999	0,035<0,04

Прим.: P – ймовірність кореляційного зв'язку між значеннями \bar{v}_m і F_{CT}

Характер руйнування вибою свердловини визначається показником степеня x емпіричної залежності $v_m = a \cdot F_{CT}^x$. При $x > 1$ маємо втомне або об'ємне, а при $x \leq 1$ – поверхневе руйнування породи. Згідно даних табл. 3 втомне руйнування спостерігається під час буріння у породі твердістю 1440 МПа, незалежно від жорсткості бурильного інструменту. Під час буріння у породі твердістю 2050 МПа зі збільшенням жорсткості спостерігається перехід від втомного до поверхневого руйнування породи, тобто ефективність буріння погіршується. Крім показника степеня процес руйнування можна орієнтовно оцінити величиною поглиблення вибою свердловини δ_0 за один оберт долота. За О.І. Співаком поверхневе

руйнування породи спостерігається для інтервалу значень δ_0 від 0,64 до 0,9 мм, втомне руйнування – для значень 0,91 – 1,98 мм, а об'ємне руйнування – для значень 1,99 – 2,71 мм. В табл. 4 наведено значення δ_0 за результатами 55 – 75 серій експериментальних досліджень.

Таблиця 4 – Поглиблення вибою свердловини за один оберт долота δ_0 за результатами 55 – 75 серій експериментальних досліджень

$C = 225 \text{ кН/м}, p_{\text{м}} = 1440 \text{ МПа}$									
F_{CT}	кН	0	10	13	15	18	21	26,5	29
Експ.дані	м/год	0	5,6	7	9,7	10,6	12,4	–	18,6
δ_0	мм/об	–	0,50	0,62	0,86	0,94	1,10	–	1,65
$C = 6000 \text{ кН/м}, p_{\text{м}} = 1440 \text{ МПа}$									
F_{CT}	кН	0	10	13	15	18	21	26,5	29
Експ.дані	м/год	0	4,9	6	7,4	9,5	10,6	14,4	16,6
δ_0	мм/об	0	0,43	0,53	0,66	0,84	0,94	1,28	1,47
$C = 225 \text{ кН/м}, p_{\text{м}} = 2050 \text{ МПа}$									
F_{CT}	кН	0	10	11,5	14	15	21	24	–
Експ.дані	м/год	0	3,7	3,8	4,8	–	–	8,9	–
δ_0	мм/об	–	0,33	0,34	0,43	–	–	0,79	–
$C = 6000 \text{ кН/м}, p_{\text{м}} = 2050 \text{ МПа}$									
F_{CT}	кН	0	10	11,5	15	21	–	–	–
Експ.дані	м/год	0	2,1	2,8	2,95	3,8	–	–	–
δ_0	мм/об	–	0,19	0,25	0,26	0,34	–	–	–

Згідно цих даних у пропластку твердістю $p_{\text{м}} = 1440 \text{ МПа}$ під час буріння інструментом жорсткістю 225 кН/м перехід від поверхневого до втомно руйнування породи відбувається за навантаження 18 кН, а під час буріння інструментом жорсткістю 6000 кН/м – за навантаження 21 кН, тобто зменшення жорсткості веде до зниження порогу статичного осевого навантаження, за якого відбувається зміна характеру руйнування гірської породи.

Метою наступних 20 серій експериментів (62 досліди) було встановлення емпіричних залежностей між частотою обертання долота і механічною швидкістю буріння за різних рівнів жорсткості C . За результатами 90 – 109 серій досліджень з ймовірністю більшою за 0,95 підібрано степеневі залежності, наведені в табл. 5. Умова $\sigma_0 < 0,1\bar{v}_u$ для всіх цих залежностей виконується.

Таблиця 5 – Результати підбору залежностей $\bar{v}_u = f(n_d)$

Серія	C , кН/м	$p_{\text{м}}$, МПа	Долото	Емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{v}_u$
90, 93, 96, 99	225	3120	III-76ОК-ЦА	$\bar{v}_u = 0,033 \cdot n_d^{0,9411}$	0,9974	0,27 < 0,34
91, 94, 97, 100	1000			$\bar{v}_u = 0,028 \cdot n_d^{0,9563}$	0,9985	0,18 < 0,31
92, 95, 98, 101	6000			$\bar{v}_u = 0,031 \cdot n_d^{0,9114}$	0,9991	0,05 < 0,27
102, 104, 106, 108	1000		III-93Т-ЦА	$\bar{v}_u = 0,047 \cdot n_d^{0,7764}$	0,9882	0,13 < 0,2
103, 105, 107, 109	6000			$\bar{v}_u = 0,04 \cdot n_d^{0,7686}$	0,9942	0,1 < 0,17

За В.Г.Беліковим аналітична модель між частотою обертання долота і механічною швидкістю буріння має вигляд $v_u = b \cdot n_d^a$, тобто залежності табл. 5, підібрані за експериментальними даними, адекватні цій моделі. Під час

поверхневого руйнування породи аналітична модель лінійна $y = 1$, а під час втомного руйнування – нелінійна. Зі збільшенням жорсткості C показник степеня спадає, тобто за однакових значень n_d механічна швидкість буріння стає меншою.

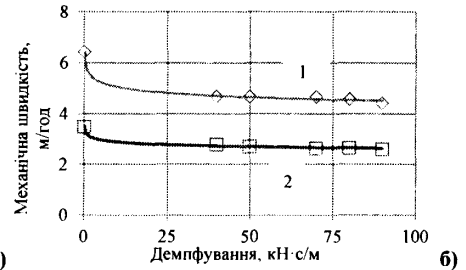
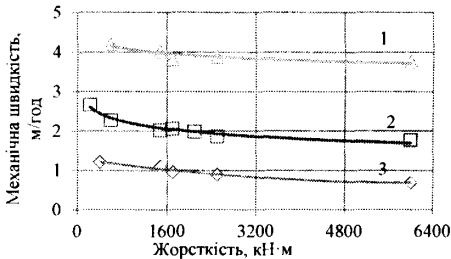
Наступні 47 серій експериментів (82 досліди) присвячені встановленню емпіричних залежностей між жорсткістю C бурильного інструменту та механічною швидкістю буріння.

У табл. 6 вперше подано емпіричні залежності $\bar{v}_m = f(C)$ одержані за результатами експериментальних досліджень. Графіки залежностей, одержані під час буріння долотом III-93Т-ЦА, зображені на рис. 1а.

Таблиця 6 – Результати підбору залежностей $\bar{v}_m = f(C)$

Серія	$p_{ин}$, МПа	Долото	Емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{v}_m$
110 – 117	3120	III-76ОК-ЦА	$\bar{v}_m = 2,822 \cdot C^{-5,379110^2}$	0,794	0,081 < 0,19
123 – 127	1440	III-93Т-ЦА	$\bar{v}_m = 4,224 \cdot e^{-4,051910^5 \cdot C}$	0,9446	0,11 < 0,38
128 – 134	2050		$\bar{v}_m = 5,206 \cdot C^{-0,1270}$	0,9732	0,05 < 0,21
118 – 122	2500		$\bar{v}_m = 4,491 \cdot C^{-0,2090}$	0,9434	0,078 < 0,1

За рис. 1а більш інтенсивне зростання механічної швидкості має місце за низьких значень жорсткості C (в діапазоні від 225 до 1600 кН/м).



1 – 1440 МПа 2 – 2050 МПа 3 – 2500 МПа

1 – $p_{ин} = 1440$ МПа 2 – $p_{ин} = 2050$ МПа

Рисунок 1 – Графіки залежностей механічної швидкості буріння долотом III-93Т-ЦА від жорсткості (а) та від демпфування (б)

В табл. 7 вперше подано емпіричні залежності $\bar{v}_m = f(\beta)$ одержані за результатами експериментальних досліджень, графіки яких зображено на рис. 1б. За рис. 1б вплив демпфування спостерігається тільки в області низьких значень β (в діапазоні 0,1 – 30 кН·с/м). Ймовірність кореляційних зв'язків як між C та \bar{v}_m , так і між β та \bar{v}_m в усіх випадках (див. табл. 6, 7) більша за 0,95.

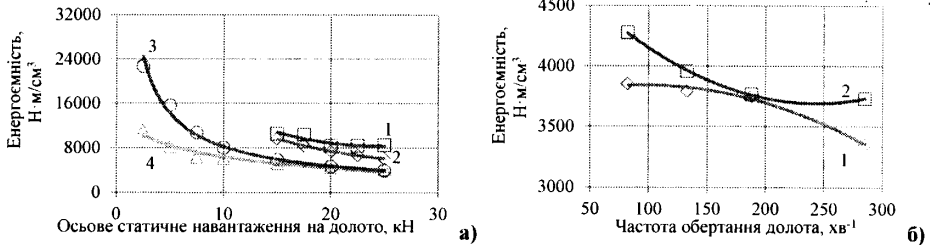
Таблиця 7 – Результати підбору залежностей $\bar{v}_m = f(\beta)$

Серія	$p_{ин}$, МПа	Долото	Емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{v}_m$
135 – 140	1440	III-93Т-ЦА	$\bar{v}_m = 5,687 \cdot \beta^{-5,149210^2}$	0,8822	0,06 < 0,49
141 – 146	2050		$\bar{v}_m = 3,169 \cdot \beta^{-4,174010^2}$	0,8965	0,04 < 0,46

У четвертому розділі подано результати експериментальних досліджень впливу параметрів C , β бурильного інструменту на енергоємність процесу руйнування породи, що визначається за формулами (1) та (4).

Для вивчення енергоємності \bar{W}_{II} використовувались ті ж серії дослідів, що і для механічної швидкості \bar{v}_m . На основі перевірки параметричних гіпотез з ймовірністю 0,95 встановлено, що за умови відповідності типу долота твердості породи зменшення жорсткості C веде до зниження середнього значення енергоємності \bar{W}_{II} паралельних дослідів (серії 1 – 10, 13 – 18, табл. 1). Вплив демпфування β на енергоємність \bar{W}_{II} незначний.

На рис. 2а зображено графіки степеневих емпіричних залежностей $\bar{W}_{II} = f(F_{CT})$.



1 – $C = 6000$ кН/м 2 – $C = 1480$ кН/м, III-93Т-ЦА
3 – $C = 6000$ кН/м 4 – $C = 225$ кН/м, III-76ОК-ЦА

1 – $C = 225$ кН/м
2 – $C = 6000$ кН/м

Рисунок 2 – Залежності енергоємності процесу руйнування гірської породи від осьового статичного навантаження на долото (а) та від частоти обертання долота (б)

Аналіз графіків дозволяє стверджувати, що характер зміни енергоємності \bar{W}_{II} за збільшення осьового статичного навантаження F_{CT} залежить не тільки від жорсткості, але й від конструкції озброєння шарошок. Так для доліт типу Т, зубці шарошок яких фрезеровані, зі збільшенням навантаження вплив жорсткості посилюється (криві 1, 2 розходяться). Це свідчить про те, що зменшення жорсткості під час буріння долотами з фрезерованим зубцем є більш ефективним в зонах втомного та об'ємного руйнувань. Для доліт типу ОК, шарошки яких армовані циліндричними зубцями, різниця між значеннями енергоємності \bar{W}_{II} за жорсткості $C = 6000$ кН/м та $C = 225$ кН/м зменшується із зростанням F_{CT} (криві 3, 4 сходяться). Це свідчить про те, що зменшення жорсткості під час буріння долотами типу К, ОК є більш ефективним в зонах поверхневого та втомного руйнувань.

За результатами 90 – 101 серій експериментів з ймовірністю більшою за 0,9 підібрано емпіричні залежності $\bar{W}_{II} = f(n_d)$ за різних рівнів жорсткості бурильного інструменту, твердість породи та типорозмір долота були незмінними ($p_m = 3120$ МПа, долото III-76ОК-ЦА), графіки зображено на рис. 2б.

За зміни числа обертів в діапазоні 133 – 188 хв⁻¹ енергоємність \bar{W}_{II} змінюється незначно (ділянки графіків лінійні). В області більш низьких $n_d < 133$ хв⁻¹ та більш високих $n_d > 188$ хв⁻¹ частот обертання ефективність процесу руйнування породи

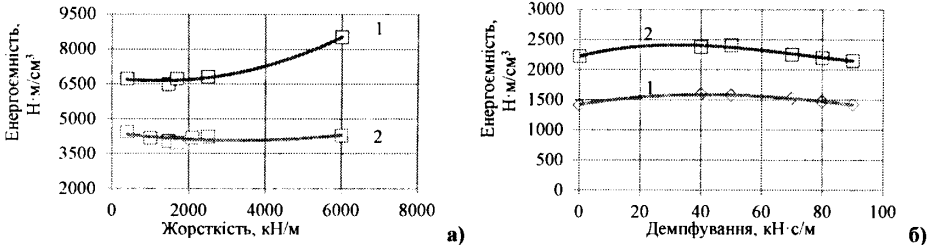
зростає (зокрема швидкість $v_{ш}^c$ збільшується) а енергоємність \bar{W}_{II} спадає (криві 1, 2 розходяться).

У табл. 8 наведено емпіричні залежності $\bar{W}_{II} = f(C)$, що вперше одержані за результатами експериментальних досліджень. Графіки поліномів другого степеня зображено на рис. 3а. Зі збільшенням твердості породи мінімум кривої $\bar{W}_{II} = f(C)$ зміщується в бік вищих значень жорсткості (при $p_{ш} = 2500$ МПа жорсткість $C_{min} = 1480$ кН/м, а при $p_{ш} = 3120$ МПа жорсткість $C_{min} = 1700$ кН/м).

Таблиця 8 – Результати підбору залежностей $\bar{W}_{II} = f(C)$

№ серії	$p_{ш}$, МПа	Долото	Емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{W}_{II}$
110 – 117	3120	III-76ОК-ЦА	$\bar{W}_{II} = 4632.6633 - 0,5163 \cdot C + 6,73 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$	0,9604	142 < 404
118 – 122	2500	III-93Т-ЦА	$\bar{W}_{II} = 6658,5871 - 0,2576 \cdot C + 9,48 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$	0,9804	328 < 694

Вперше одержані емпіричні залежності $\bar{W}_{II} = f(\beta)$ подано в табл. 9. Графіки поліномів другого порядку зображено на рис. 3б. Аналіз графіків дозволяє стверджувати, що із збільшенням твердості породи максимум кривої $\bar{W}_{II} = f(\beta)$ зміщується в бік більших значень коефіцієнта β (при $p_{ш} = 1440$ МПа демпфування $\beta_{max} = 20$ кН·с/м, а при $p_{ш} = 2050$ МПа $\beta_{max} = 60$ кН·с/м).



1 – $p_{ш} = 2500$ МПа, 2 – $p_{ш} = 3120$ МПа,

1 – $p_{ш} = 1440$ МПа 2 – $p_{ш} = 2050$ МПа

Рисунок 3 – Графіки залежностей енергоємності процесу руйнування гірської породи від жорсткості (а) та від демпфування (б)

Таблиця 9 – Результати підбору залежностей $\bar{W}_{II} = f(C)$

№ серії	$p_{ш}$, МПа	Емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{W}_{II}$
135 – 140	1440	$\bar{W}_{II} = 1430,6847 + 2,9833 \cdot \beta - 0,2322 \cdot \beta^2$	0,9875, P>0,95	24 < 204
141 – 146	2050	$\bar{W}_{II} = 2342,9691 + 24,3812 \cdot \beta - 0,7929 \cdot \beta^2$	0,9915, P>0,95	56 < 194

Зауважимо, що у порівнянні з F_{CT} , η_L , C демпфування β є найменш потужним фактором зміни енергоємності процесу руйнування гірської породи.

У п'ятому розділі наведено вперше одержані багатфакторні емпіричні моделі механічної швидкості $\bar{v}_{ш}$ та енергоємності \bar{W}_{II} процесу буріння.

Для встановлення залежностей \bar{v}_m , \bar{W}_H від параметрів F_{CT} , n_D , C та β проводились дослідження за плановим експериментом, розробленим на основі греко-латинського квадрата 4x4. Згідно плану досліджень комбінація значень незалежних факторів F_{CT} , n_D , C та β зустрічалась тільки один раз. Кожний з факторів змінювався на чотирьох рівнях, загальна кількість дослідів – 32. Буріння велось долотом III-93Т-ЦА у блоках пісковика воротищенської світи, складених двома пропластками твердістю 1440 та 2050 МПа, за постійної витрати промивальної рідини 7 л/с.

Матрицю планованого експерименту зі значеннями механічної швидкості поглиблення свердловини для двох пропластків твердістю 1440 та 2050 МПа наведено в табл. 10. В наступних табл. 11, 12 подано результати експерименту, усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n_D та параметрами бурильного інструменту C та β для пропластка твердістю 1440 МПа. Дані таблиць свідчать, що за вагомістю впливу на v_m фактори розміщуються в наступному порядку F_{CT} , n_D , C та β .

Таблиця 10 – Матриця планованого експерименту зі значеннями механічної швидкості буріння

№ досліду	n_D , хв ⁻¹	F_{CT} , кН	C , кН/м	β , кН-с/м	v_m , м/год	
					$p_w = 1440$ МПа	$p_w = 2050$ МПа
1	82	10	400	0,1	2,18	1,05
2	82	15	2500	40	2,58	1,46
3	82	20	800	70	5,33	2,77
4	82	25	1700	90	6,22	4,41
5	133	10	800	90	2,43	1,47
6	133	15	1700	70	4,10	2,05
7	133	20	400	40	5,29	3,2
8	133	25	2500	0,1	8,97	5,78
9	188	10	1700	40	3,31	1,92
10	188	15	800	0,1	4,51	3,02
11	188	20	2500	90	8,1	4,84
12	188	25	400	70	10,56	7,44
13	285	10	2500	70	2,67	1,83
14	285	15	400	90	7,40	3,64
15	285	20	1700	0,1	11,45	7,54
16	285	25	800	40	12,87	7,91

Таблиця 11 – Результати експерименту з визначення v_m усереднені по значеннях режимних параметрів (пропласток твердістю 1440 МПа)

F_{CT} , кН	n_D , хв ⁻¹	82	133	188	285	Сума	Середнє
		v_m , м/год					
10		2,18	2,43	3,31	2,67	10,59	2,6475
15		2,58	4,10	4,51	7,40	18,59	4,6475
20		5,33	5,29	8,1	11,45	30,17	7,5425
25		6,22	8,97	10,56	12,87	38,62	9,655
	Сума	16,31	20,79	26,48	34,39	97,97	–
	Середнє	4,0775	5,1975	6,62	8,5975	–	–

Для підвищення впливу більш слабких факторів проводилась поступова нейтралізація більш вагомих факторів за методиками Протодьяконова та Яремійчука-Райхерта.

Таблиця 12 – Результати експерименту з визначення v_m усереднені по значеннях параметрів бурильного інструменту (пропласток твердістю 1440 МПа)

β , кН·с/м ¹	C , кН/м				Сума	Середнє
	400	800	1700	2500		
	v_m , м/год					
0,1	2,18	4,51	11,45	8,97	27,11	6,7775
40	5,29	12,87	3,31	2,58	24,05	6,0125
70	10,56	5,33	4,10	2,67	22,66	5,665
90	7,4	2,43	6,22	8,1	24,15	6,0375
Сума	25,43	25,14	25,08	22,32	97,97	–
Середнє	6,3675	6,285	6,27	5,58	–	–

Рівняння багатофакторної емпіричної механічної швидкості буріння для пропластку твердістю 1440 МПа має вигляд:

$$\bar{v}_m = 7,141 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^{1,416} \cdot n_D^{0,6218} \cdot \beta^{-2,53130^2} \cdot C^{-7,41410^2} \quad (5)$$

Обробка значень \bar{v}_m планованого експерименту для пропластку $p_m = 2050$ МПа проводилась за тією ж методикою, що і для пропластку з $p_m = 1440$ МПа. Рівняння моделі має вигляд:

$$\bar{v}_m = 1,6703 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^{1,5656} \cdot n_D^{0,6408} \cdot \beta^{-3,314610^2} \cdot C^{-4,550710^2} \quad (6)$$

Максимальне значення відносної похибки між експериментальними даними та значеннями швидкості, обчисленими за рівнянням багатофакторної емпіричної моделі, становить 13,6 %, а середнє значення – 7,65 %.

Наведені результати стендових досліджень дозволяють змінити умову оптимізації цільового критерію – початкової механічної швидкості буріння, яка містить параметри C , β бурильного інструменту:

$$\frac{dh}{dt_b} = B_{CT} \cdot F_{CT}^a \cdot n_D^{\alpha_2} \cdot \beta^{-\alpha_3} \cdot C^{-\alpha_4} \quad (7)$$

На основі цього розроблено "Методику адаптації багатофакторної емпіричної моделі механічної швидкості буріння до промислових умов". За цією методикою з метою адаптації моделей (5) і (6) до промислових умов на площах шахтоуправління "Покровське" компанії "Донецьксталь – металургійний завод" було пробурено 8 свердловин глибиною 676 – 758 м з використанням пристрою зміни жорсткості низу бурильної колони, витрата промивальної рідини та демпфування бурильного інструменту при цьому залишалось незмінним. Буріння велось в алевролітах твердістю 960 МПа тришаршковими долотами діаметром 193,7 мм типу SS-TMGC з фрезерованим зубом та герметизованою фрикційною опорою.

Методом раціонального планування експерименту одержано наступну емпіричну модель:

$$v_m = 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot F_{CT}^{0,6031} \cdot n_D^{2,2929} \cdot C^{-0,6032} \quad (8)$$

Максимальне значення відносної похибки при використанні моделі склало 16,5 %, а середнє значення – 9,7 %.

Співставлення мультиплікативних моделей (5), (6), (8) свідчить, що якісний характер впливу незалежних факторів на v_m однаковий. Частинні залежності моделей степеневі, при цьому показники степенів при режимних параметрах додатні, а при жорсткості C – від'ємні. За цими ж результатами досліджень

встановлено, що зменшення жорсткості КНБК з 8400 до 2100 кН/м дозволяє збільшити механічну швидкість буріння в 1,6 рази.

Обробка значень енергоємності \bar{W}_H планованого експерименту, матрицю якого наведено в табл. 13, проводилась за тією ж методикою, що і обробка значень механічної швидкості v_u .

Рівняння багатofакторних емпіричних моделей енергоємності процесу руйнування гірської породи мають вигляд:

– для пропластку з $p_m = 1440$ МПа

$$\bar{W}_H = 2351,197 \cdot F_{CT}^{-0,7731} \cdot n_D^{0,2822} \cdot (1 + 4,5698 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 5,6794 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2) \cdot (1 - 2,5354 \cdot 10^{-4} \cdot C + 9,2168 \cdot 10^{-8} \cdot C^2); \quad (9)$$

– для пропластку з $p_m = 2050$ МПа

$$\bar{W}_H = 626,237 \cdot e^{-1,503510 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2} \cdot n_D^{0,2846} \cdot (1 - 3,0569 \cdot 10^{-4} \cdot C + 9,5403 \cdot 10^{-8} \cdot C^2) \times (1 + 3,7665 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 2,9313 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2). \quad (10)$$

Таблиця 13 – Матриця планованого експерименту зі значеннями енергоємності процесу руйнування гірської породи

№ досліду	$n_D, \text{хв}^{-1}$	$F_{CT}, \text{кН}$	$C, \text{кН/м}$	$\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$\bar{W}_H, \text{Н}\cdot\text{м/см}^3$	
					$p_m = 1440 \text{ МПа}$	$p_m = 2050 \text{ МПа}$
1	82	10	400	0,1	1225	1874
2	82	15	2500	40	1080	1576
3	82	20	800	70	555	901
4	82	25	1700	90	570	691
5	133	10	800	90	1384	1991
6	133	15	1700	70	1119	1759
7	133	20	400	40	1020	1325
8	133	25	2500	0,1	635	897
9	188	10	1700	40	1275	1995
10	188	15	800	0,1	1240	1538
11	188	20	2500	90	912	1248
12	188	25	400	70	825	1046
13	285	10	2500	70	2028	2440
14	285	15	400	90	1039	2215
15	285	20	1700	0,1	942	1231
16	285	25	800	40	918	1278

Максимальні та середні значення відносних похибок відповідно складають: для пропластка твердістю 1440 МПа – 15,3 % та 6,8 %; для пропластка твердістю 2050 МПа – 11,1 % та 5,7 %.

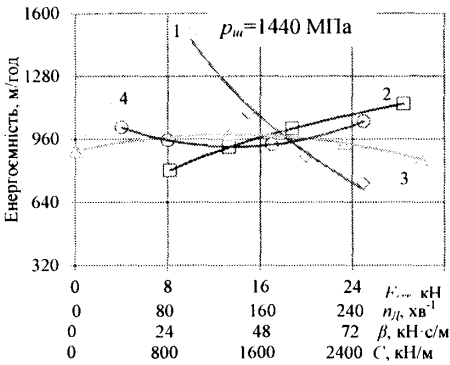
Всі частинні залежності емпіричних моделей (9), (10), графіки яких зображено на рис. 4, задовільно апроксимуються підібраними степеневими функціями та поліномами другого степеня з ймовірностями більшими за 0,95.

Просторові графіки залежностей $\bar{W}_H = f(C, \beta)$ для двох пропластків за фіксованих значень режимних параметрів подано на рисунках 5 – 8. Вони мають форми параболічних гіперболоїдів і характеризуються наявністю мінімаксів (для породи з $p_m = 1440$ МПа – $C_{min} = 1375$ кН/м, $\beta_{max} = 40$ кН·с/м; для породи з $p_m = 2050$ МПа – $C_{min} = 1602$ кН/м, $\beta_{max} = 64$ кН·с/м).

Зі збільшенням твердості породи за штампом екстремальні значення демпфування та жорсткості бурильного інструменту переміщуються в область більших значень.

Різниця між значеннями енергоємності, одержаними для $\beta = 0,1$ кН·с/м та $\beta = 90$ кН·с/м для пропластку твердістю $p_{ш} = 1440$ МПа склала 8,3 %, а для пропластку твердістю $p_{ш} = 2050$ МПа – 10,2 %. Ці значення знаходяться в межах відносної похибки, максимальні значення якої відповідно склали відповідно 15,3 % та 13,1 %.

Практично визначення мінімуму енергоємності \bar{W}_{II} , враховуючи незначний вплив демпфування на енергоємність руйнування породи, доцільно проводити за трьома чинниками: осьовим статичним навантаженням на вибій F_{CT} , частотою обертання долота n_d та жорсткістю бурильного інструменту C .

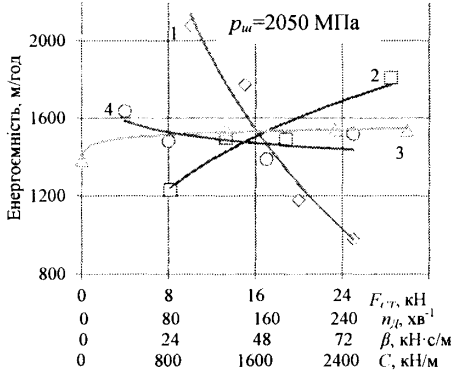


$$1 - \bar{W}_{II} = 8852,348 \cdot F_{CT}^{-0,7731}$$

$$2 - \bar{W}_{II} = 231,018 \cdot n_d^{0,2822}$$

$$3 - \bar{W}_{II} = 900,5002 + 4,1151 \cdot \beta - 0,0511 \cdot \beta^2$$

$$4 - \bar{W}_{II} = 1114,2671 - 0,2825 \cdot C + 1,027 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$$



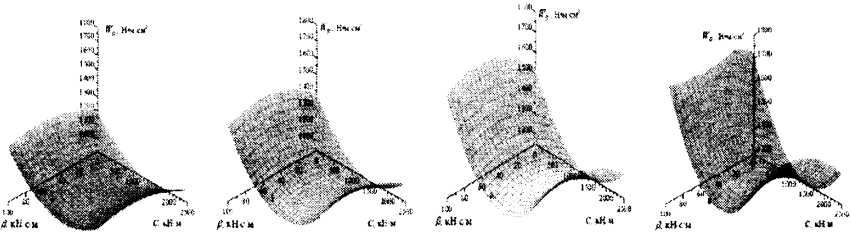
$$1 - \bar{W}_{II} = 2381,986 \cdot e^{-1,503510 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2}$$

$$2 - \bar{W}_{II} = 354,788 \cdot n_d^{0,2846}$$

$$3 - \bar{W}_{II} = 1387,3669 + 5,2296 \cdot \beta - 4,0621 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$$

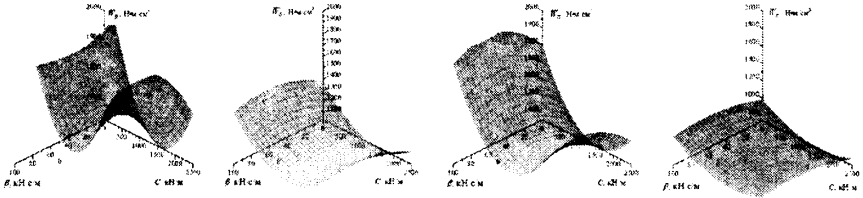
$$4 - \bar{W}_{II} = 1826,9796 - 0,5584 \cdot C + 1,743 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$$

Рисунок 4 – Частинні залежності $\bar{W}_{II} = f(F_{CT})$, $\bar{W}_{II} = f(n_d)$, $\bar{W}_{II} = f(C)$ і $\bar{W}_{II} = f(\beta)$, одержані методом планованого експерименту

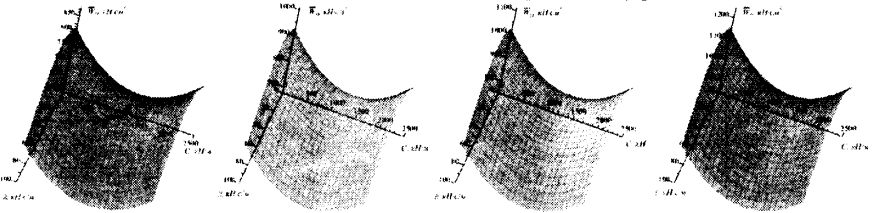


а) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 82$ хв⁻¹ б) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹ в) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 188$ хв⁻¹ г) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 285$ хв⁻¹

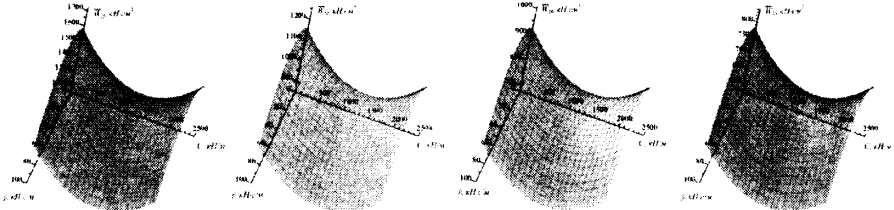
Рисунок 5 – Графіки залежностей $\bar{W}_{II} = f(C, \beta)$ за постійного статичного навантаження та змінної частоти обертання долота для пропластку $p_{ш} = 1440$ МПа



а) $F_{CT} = 10$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹ б) $F_{CT} = 15$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹ в) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹ г) $F_{CT} = 25$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹
Рисунок 6 – Графіки залежностей $\bar{W}_{II} = f(C, \beta)$ за постійної частоти обертання долота та змінного статичного навантаження для пропластку $p_{III} = 1440$ МПа



а) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 82$ хв⁻¹ б) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹ в) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 188$ хв⁻¹ г) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 285$ хв⁻¹
Рисунок 7 – Графіки залежностей $\bar{W}_{II} = f(C, \beta)$ за постійного статичного навантаження та змінної частоти обертання долота для пропластку $p_{III} = 2050$ МПа



а) $F_{CT} = 10$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹ б) $F_{CT} = 15$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹ в) $F_{CT} = 20$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹ г) $F_{CT} = 25$ кН, $n_d = 133$ хв⁻¹
Рисунок 8 – Графіки залежностей $\bar{W}_{II} = f(C, \beta)$ за постійної частоти обертання долота та змінного статичного навантаження для пропластку $p_{III} = 2050$ МПа

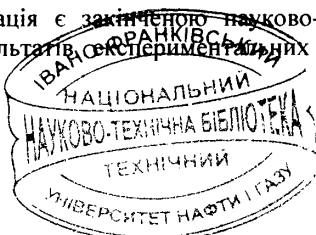
Наведені вище результати стендових досліджень є вагомою підставою для введення нового критерію оптимізації буріння – мінімуму енергоємності процесу руйнування гірської породи

$$W_{II} = B_{CTP} \cdot e^{-\alpha_5 F_{CT}} \cdot n_d^{\alpha_6} \cdot (1 - \alpha_7 \cdot C + \alpha_8 \cdot C^2). \quad (11)$$

На основі цього критерію розроблено "Методику підбору пристроїв зміни жорсткості КНБК для буріння свердловин роторним способом", яку передано для впровадження Прикарпатському УБР ПАТ "Укрнафта".

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій на підставі аналізу результатів експериментальних стендових та промислових досліджень



розв'язано актуальну задачу з підвищення ефективності роторного поглиблення свердловин шарошковим долотом.

1. Удосконалено методику обробки записів поглиблення свердловин шарошковими долотами та розроблено методику визначення енергоємності руйнування гірської породи, які дозволяють виділяти однорідні за буримістю інтервали розрізу свердловини і визначати статистичні характеристики вибірок механічної швидкості та енергоємності процесу буріння.

2. Експериментально з ймовірністю більшою за 0,95 встановлено вплив жорсткості C та демпфування β бурильного інструменту на механічну швидкість та енергоємність буріння свердловин шарошковими долотами.

За одержаними емпіричними залежностями механічної швидкості від параметрів C і β встановлено, що:

- більш інтенсивне зростання механічної швидкості має місце за низьких значень жорсткості (в діапазоні від 600 до 1600 кН/м за буріння долотами III-93Т-ЦА в блоках пісковиків воротищенської та стрийської світ);

- зі зменшенням жорсткості бурильного інструменту від 6000 до 600 кН/м механічна швидкість зростає на 26,5 % – 70,6 %;

- вплив демпфування бурильного інструменту спостерігається тільки в області низьких значень β (в діапазоні 0,1 – 30 кН·с/м);

- зі зменшенням демпфування β бурильного інструменту від 90 до 0,1 кН·с/м механічна швидкість зростає на 34,3 % – 38,3 %.

3. Вперше одержано залежності енергоємності \bar{W}_{II} процесу руйнування породи від параметрів C , β бурильного інструменту, які представлені поліномами другого степеня. Встановлено, що зі збільшенням твердості породи мінімум залежності $\bar{W}_{II} = f(C)$ зміщується в бік більших значень жорсткості, а максимум залежності $\bar{W}_{II} = f(\beta)$ зміщується в бік вищих значень демпфування.

4. Вперше за результатами експериментальних досліджень одержано багатofакторні емпіричні моделі механічної швидкості та енергоємності процесу буріння шарошковими долотами, що враховують режимні параметри та жорсткість і демпфування бурильного інструменту.

Наведені результати стендових досліджень дозволяють уточнити з урахуванням жорсткості та демпфування бурильного інструменту цільовий критерій вибору оптимальних режимів буріння – максимум механічної швидкості проходки та запропонувати новий критерій – мінімум енергоємності процесу руйнування гірської породи.

5. Вперше у промислових умовах одержано багатofакторну емпіричну модель механічної швидкості буріння свердловин шарошковими долотами, що враховує режимні параметри і жорсткість КНБК.

Розроблено "Методику підбору пристроїв зміни жорсткості КНБК для буріння роторним способом», передану для впровадження Прикарпатському УБР ПАТ "Укрнафта", та "Методику адаптації багатofакторної емпіричної моделі механічної швидкості буріння до промислових умов". За результатами впровадження методик одержано збільшення механічної швидкості при бурінні 15

дегазаційних свердловин на площах шахтоуправління "Покровське" ПрАТ "Донецьксталь-металургійний завод".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Щербій Р.Б. Встановлення кореляційних емпіричних залежностей між коефіцієнтом демпфування бурильного стенового інструменту та енергоємністю процесу руйнування породи [Текст] / Р.Б. Щербій, М.В. Мойсишин // *Нафтова та газова промисловість* – 2012.– №4. – С. 22-24.

2. Щербій Р.Б. Кореляційні емпіричні залежності між статичною складовою навантаження на долото та механічною швидкістю буріння за різних значень жорсткості компоновки стенового інструменту [Текст] / Р.Б. Щербій, В.М. Мойсишин, Б.Д. Борисевич // *Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ.* – 2010. – 4(37). – С. 47-54.

3. Щербій Р.Б. Встановлення кореляційних емпіричних залежностей між коефіцієнтом демпфування бурильного інструменту та механічною швидкістю буріння нафтових та газових свердловин [Текст] / Р.Б. Щербій, В.М. Мойсишин, О.М. Лисканич // *Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ.* – 2012. – 1(42). – С. 79-88.

4. Moisyshyn V., Borysevych B., Sheherbiy R. Multifactorial mathematical model of mechanical drilling speed / *Mining of Mineral Deposits.* – CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, Leiden; a Balcema Book, 2013, p. 359-368.

5. Б.Д. Борисевич. Буровий стенд для дослідження процесу руйнування гірських порід і динаміки бурильного інструменту / Б.Д. Борисевич, В.М. Мойсишин, Р.Б. Щербій, Б.В. Долішній // *Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ.* – 2009. – 3(32). – С. 23-29.

6. Б.Д. Борисевич. Пристрої зміни динаміки буріння на буровому стенді ІФНТУНГ [Текст] / Б.Д. Борисевич, В.М. Мойсишин, Р.Б. Щербій, Б.В. Долішній // *Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ.* – 2009. – 4(33). – С. 18-23.

7. В.М. Мойсишин. Багатофакторна емпірична модель енергоємності процесу руйнування гірської породи [Текст] / В.М. Мойсишин, Б.Д. Борисевич, Р.Б. Щербій, А.І. Бандура, І.Р. Михайлюк // *Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ.* – 2013. – 1(46). – С. 66-78.

8. В.М. Мойсишин. Багатофакторна емпірична модель механічної швидкості буріння свердловин на площах шахтоуправління "Покровське" компанії "Донецьксталь" [Текст] / В.М. Мойсишин, Р.Б. Щербій, В.А. Турчин, В.Л. Шевелєв, С.А. Зінченко // *Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ.* – 2013. – 3(48). – С.180-187.

9. Щербій Р.Б. Про вплив жорсткості стенового інструменту на механічну швидкість буріння [Текст] / Р.Б. Щербій, В.М. Мойсишин, Б.Д. Борисевич // *Тези доповідей науково-технічної конференції "Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтовидобутку на родовищах України".* м. Івано-Франківськ, 16-18 листопада 2010 р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – С. 16-22.

10. Щербій Р.Б. Оцінка впливу жорсткості та демпфування компоновки низу бурового інструменту на середнє значення обертового моменту під час буріння шарошковими долотами [Текст] / Р.Б. Щербій // Анотації міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова енергетика-2011", м. Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011 р. – Івано-Франківськ: ІФНУНГ, 2011. – 121 с.

11. В.М. Мойсишин. Методика підбору пристроїв зміни жорсткості КНБК для буріння свердловин роторним способом [Текст] / В.М. Мойсишин, Б.Д. Борисевич, Р.Б. Щербій, І.М. Наумко, В.І. Пилипець, В.В. Радченко, О.Д. Кожушок, Є.М. Халімендіков, С.А. Зінченко, В.А. Шевелєв, Є.О. Юшков, В.А. Турчин – Івано-Франківськ: ІФНУНГ, 2013. – 40 с.

12. В.М. Мойсишин. Методика адаптації багатofакторної моделі механічної швидкості буріння до промислових умов [Текст] / В.М. Мойсишин, Б.Д. Борисевич, Р.Б. Щербій, І.М. Наумко, В.І. Пилипець, В.В. Радченко, О.Д. Кожушок, Є.М. Халімендіков, С.А. Зінченко, В.А. Шевелєв, Є.О. Юшков, В.А. Турчин – Івано-Франківськ: ІФНУНГ, 2013. – 16 с.

АНОТАЦІЯ

Щербій Р.Б. Підвищення ефективності роботи шарошкових доліт на основі експериментальних досліджень процесу буріння. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.10 – Буріння свердловин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2014.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності поглиблення свердловин за результатами експериментальних досліджень впливу жорсткості та демпфування бурильного інструменту на руйнування гірської породи.

На основі статистичної обробки результатів стендових досліджень одержано емпіричні залежності механічної буріння та енергоємності процесу руйнування гірської породи від характеристик бурильного інструменту за різних значень режимних параметрів буріння свердловин шарошковими долотами.

Запропоновано багатofакторні емпіричні моделі механічної швидкості та енергоємності буріння свердловин на основі результатів планованого експерименту.

Розроблено методики адаптації результатів експериментальних досліджень до промислових умов поглиблення свердловин шарошковими долотами.

Ключові слова: буріння свердловини, шарошкове долото, механічна швидкість буріння, енергоємність процесу руйнування гірської породи, жорсткість і демпфування бурильного інструменту, планований експеримент, емпірична модель.

АННОТАЦИЯ

Щербий Р.Б. Повышение эффективности работы шарошечных долот на основании экспериментальных исследований процесса бурения. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.10 – Бурение скважин. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2014.

Диссертация посвящена повышению эффективности бурения скважин на основании результатов экспериментальных исследований влияния жесткости и демпфирования бурильного инструмента на разрушение горной породы.

В первом разделе приведен анализ исследований влияния характеристик бурильного инструмента на основные технико-экономические показатели бурения скважин и энергоёмкость процесса разрушения горных пород.

Во втором разделе предложено методику обработки аналоговых записей проходки на долото, состоящей из трех этапов:

- выделение однородных по буримости интервалов разреза скважин;
- определение статистических характеристик выборок значений механической скорости бурения на выделенных однородных участках и проверка соответствия этих выборок нормальному закону распределения;
- выделение выборок значений механической скорости бурения, принадлежащих одной генеральной совокупности, с использованием статистической проверки параметрических гипотез.

Предложена методика определения энергоёмкости процесса разрушения горной породы по записям проходки и вращательного момента на долоте.

В третьем и четвертом разделах приведены результаты стендовых исследований влияния жесткости и демпфирования бурильного инструмента на механическую скорость v_m и энергоёмкость \bar{W}_n процесса бурения.

Для изменения жесткости C использовались винтовые пружины сжатия, а для изменения демпфирования β – гидравлические поглотители колебаний с разным числом дроссельных отверстий.

За результатами статистической обработки получены эмпирические зависимости v_m и \bar{W}_n от характеристик бурильного инструмента при различных значениях режимных параметров углубления скважин шарошечными долотами.

Зависимости энергоёмкости \bar{W}_n процесса разрушения породы от параметров C , β представлены полиномами второй степени. Установлено, что с увеличением твердости породы минимум зависимости $\bar{W}_n = f(C)$ смещается в сторону больших значений жесткости, а минимум зависимости $\bar{W}_n = f(\beta)$ в сторону больших значений демпфирования.

Результаты стендовых исследований позволяют уточнить с учетом жесткости и демпфирования бурильного инструмента целевой критерий выбора оптимальных режимов бурения – максимум механической скорости проходки и предложить новый критерий – минимум энергоёмкости процесса разрушения горной породы.

В пятом разделе по результатам планируемого эксперимента предложены многофакторные эмпирические модели механической скорости и энергоёмкости бурения скважин шарошечными долотами, которые учитывают режимные параметры, жесткость и демпфирование бурильного инструмента и имеют

одинаковый качественный характер с моделями, полученными на основе анализа размерностей с использованием критериев подобия.

Разработаны методики адаптации результатов стендовых экспериментальных исследований к условиям бурения нефтяных, газовых и дегазационных скважин.

Ключевые слова: бурение скважин, энергоёмкость процесса разрушения горных пород, жесткость и демпфирование бурильного инструмента, планированный эксперимент, эмпирическая модель.

ANNOTATION

Shcherbiy R.B. Increase of efficiency of work of roller cone bits on the basis of experimental researches of drilling process. – The manuscript.

Thesis for the candidate of engineering science on a speciality 05.15.10 – Drilling of mining holes. Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivs'k, 2014.

The thesis is devoted to increase of efficiency of deepening of mining holes as a result of experimental researches of influencing of inflexibility and dampfenation of boring instruments on destruction of mountain breed.

On the basis of statistical treatment of results of stand researches empiric dependences of mechanical are got boring drilling and energy capacity of process of destruction of mountain breed from descriptions of boring instrument at different values of regime parameters of the boring drilling of mining holes by roller cone bits.

The multifactor empirical models of mechanical speed and energy capacity of the boring drilling of mining holes are offered on the basis of results of the planned experiment.

The methods of adaptation of results of experimental researches to the industrial terms of deepening of mining holes are developed by roller cone bits.

Keywords: drilling of mining holes, roller cone bit, mechanical speed of the drilling, energy capacity of process of destruction of mountain breed, inflexibility and dampfenation of boring instruments, planned experiment, empirical model.