

УДК 519.87:622.233



О.І. Повзун

ІІ ДонНТУ, м. Покровськ, Україна, povzun.aleksey@gmail.com

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ ПІДРИВНИХ СВЕРДЛОВИН У ГІРСЬКИХ МАСИВАХ

В статті приведені результати дослідження технологічних показателів буріння взривних скважин діаметром 215,9 мм в известняке крепостью 8 по шкале проф. М. М. Протодьяконова серійно випускаемым трьохшарошечным и разработанным одношарошечным долотом с вертикальной цапфой. Применение предлагаемого долота повышает скорость бурения и значительно уменьшает уровень вибраций на патроне вращателя бурового станка.

ДОЛОТО, ШВИДКІСТЬ БУРІННЯ, ЕНЕРГОЄМНІСТЬ, РІВЕНЬ ВІБРАЦІЇ, ДІАГРАМА ТРИВИ-МІРНА, ФАКТОР ВАРІЮВАННЯ, ПАРАМЕТР ОПТИМІЗАЦІЇ

### Вступ

Бурові шарошкові долота – основний інструмент, за допомогою якого здійснюється руйнування гірської породи і влаштування свердловин у гірництві, геологорозвідці, а також в умовах глибокого буріння на нафту і газ.

Процес заглиблення свердловин у гірських масивах пов'язаний з необхідністю застосування ефективних породоруйнівних доліт. Утруднення умов буріння визначається збільшенням глибини залягання природних енергоресурсів (руда, вугілля, нафта, газ) та ускладненням гірничо-геологічних умов (висока міцність, неоднорідність, шаруватість гірських порід тощо).

Буріння горизонтів, складених твердими породами, є найважчим процесом, що вимагає великої витрати доліт і визначає загальний ресурс часу для буріння свердловин у цілому.

Окрім того, останнім часом набули поширення свердловини складних профілів, в тому числі з проведенням похило направлених і горизонтальних ділянок стовбурів; тому наразі до ефективних конструкцій породоруйнівних елементів інтерес суттєво зріс.

Під час буріння в породах від середньої міцності до найміцніших абразивних близько 70% відмов доліт відбувається через псування частини породоруйнівних зубів і руйнування корпусів шарошок. Підвищення довговічності спорядження бурових доліт залежить від цілого комплексу конструктивних і технологічних факторів, що впливають на стійкість і надійність роботи зубів і шарошок у цілому. Поліпшення будь-якого фактору здатне лише частково збільшити ресурс роботи долота; тому підвищення ефективності його роботи можливе тільки за умови одночасного проведення взаємопов'язаних досліджень.

Серед опорних доліт найчастіше використовують тришарошкові долота, і чим більша глибина свердловини, тим частіше їх застосовують. Однак зі зменшенням діаметрів доліт тришарошкові долота все більше стають проблемними, оскільки вони мають слабку опору, і тому їх ресурс знижується.

Міцніші за опорою одношарошкові долота застосовують обмежено. Це пов'язано з тим, що механізм буріння такими долотами з одного боку не достатньо вивчений, а з іншого – спостерігається консерватизм у влаштуванні свердловин і у виробництві самих доліт.

Таким чином, проблема підвищення ефективності бурового одношарошкового долота є актуальною для гірничої, нафтової і газової промисловостей та геологорозвідки.

### 1. Аналіз досліджень та формулювання завдань дослідження

Наразі, у зв'язку зі значним подорожчанням бурових установок, шарошкових доліт і електроенергії, основним джерелом підвищення ефективності функціонування всієї бурової системи «гірська порода – бурове долото – бурова установка» є вибір типів доліт і параметрів їх відпрацювання відповідно до існуючих фізико-механічних властивостей порід певної копалини.

Принципове значення при виборі шарошкового долота і режиму буріння має питання кількісної оцінки властивостей гірських порід.

Шарошкові долота найбільш поширені. На них припадає 90-95% всього об'єму проходження свердловин. За ДСТУ ГОСТ 20692:2004 шарошкові долота для суцільного буріння свердловин виготовляються трьох типів: одношарошкові, двошарошкові і тришарошкові [1].

У найбільш широких асортименті і кількості виготовляють долота діаметрами 190 (190,5) мм і особливо 214 (215,9) мм. Це пояснюється порівняно великим об'ємом проходження і різноманітністю фізико-механічних властивостей гірських порід, які припадають.

Досить відомим є тришарошкове долото [1] – Ш АВ-215,9 Т-П. Позначення долота розшифровують рівень вібрацій на патроні обертача бурового верстата під час буріння U, дБа, ться так: Ш – тришарошкове; А – на двох і більше підшипниках ковзання; В – тіла кочення; 215,9 – діаметр свердловини в мм; Т – для буріння малоабразивних твердих порід; П – долото з центральною продуквою.

Шарошкові долота виготовляють із *суцільним* або *зварним корпусом*.

*Суцільні* (корпусні) конструкції використовують для доліт діаметром понад 394 мм.

*Долота зі зварним корпусом*, які називають секційними, мають переважне поширення в світовій практиці. Корпус секційних доліт зварюється з попередньо зібраних секцій, число яких дорівнює числу шарошок долота. Кожна секція складається з лапи 1 з похилою цапфою 2 і конусоподібної шарошки 4, яка обертається на підшипниках 3 (рис. 1).

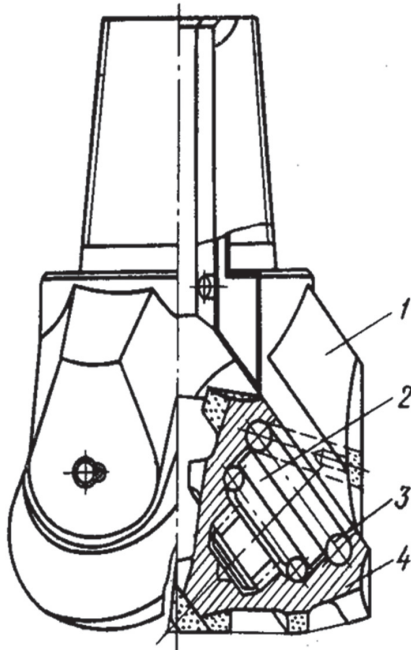


Рис. 1. Тришарошкове долото III АВ-215,9 Т-П

В плані шарошки розміщуються зі зміщенням осей відносно осі долота в напрямку обертання долота. У вертикальній площині кут між віссю долота і осями обертання шарошок змінюється в межах 52-57°.

Шарошки оснащені дрібними зубцями з великим кутом загострення.

Загальна особливість доліт всіх типів – зниження проходження на долото зі зменшенням його діаметра.

Загальним недоліком тришарошкового долота є утворення на забої свердловини багато пилу і, як наслідок, значна витрата енергії на руйнування породи.

В практиці експлуатації кар'єрів одним з найпоширеніших показників опору гірських порід руйнуванню є найбільш простий, зручний і універсальний коефіцієнт тертя, запропонований професором М.М. Протодьяконовим [2].

Основними вхідними оперативно регульованими параметрами забойного процесу є осьове навантаження на долото  $P$  і швидкість його обертання  $W$ . Головними вихідними параметрами є швидкість буріння  $V_{\text{бур.}}$ , енергоємність буріння  $E_{\text{бур.}}$  і рівень вібрацій долота  $U$  [2].

При розв'язанні задачі оптимізації складного процесу буріння безпосередньо у виробничих умовах одним з головних є питання вибору форм і методів визначення параметрів базових технологічних залежностей для оцінки ефективності руйнування гірських порід і інтенсивності зносу шарошкового долота.

Під час об'ємного руйнування породи по мірі збільшення поточної проходки долота швидкість буріння зменшується (внаслідок зносу долота) за лінійним законом до моменту відмови долота, точніше, до моменту переходу об'ємного руйнування породи в режим стирання [2]. Вибір раціонального типу шарошкового долота полягає у порівнянні питомих витрат  $S_{\text{б. min}}$  при бурінні базовим долотом і новим (рекомендованим)  $S_{\text{н. min}}$ , тобто визначається умовою  $S_{\text{н. min}} < S_{\text{б. min}}$ . Осьове навантаження встановлюють не вище за допустиме за міцністю долота, що зазначена у паспорті на нього.

Метою даної роботи є розроблення математичної моделі технологічних параметрів буріння підричних свердловин базовим і розробленим долотами і визначення оптимальних режимів буріння.

Використовуючи метод математичного планування експерименту, завданнями дослідження є:

- експериментальне визначення швидкості буріння базовим тришарошковим долотом і розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою;
- розрахункове обчислення енергоємності буріння базовим тришарошковим долотом і розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою;
- натурне вимірювання рівня вібрацій на патроні обертача бурового станка зазначеними долотами;
- порівняння одержаних результатів експерименту.

## 2. Розроблення плану експерименту режимних параметрів процесу буріння

В даній роботі представлено розроблене одношарошкове долото з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30, яке дає можливість передавати осьове зусилля через його корпус безпосередньо на шарошку.

Позначення пропонованого долота означають: О – одношарошкове; Д – долото; В – вертикальна цапфа; 215,9 – діаметр свердловини в мм; 30 – кут між віссю долота і осями обертання шарошок в градусах.

Схема одношарошкового долота з вертикальною цапфою, що пропонується, представлена на рис. 2. При дії долота на забій твердосплавні зубки 7 заглиблюються в породу; шарошка 1 утримується від обертання. Під час обертання корпусу 2 долота воно своєю похилою торцевою поверхнею через радіально-упорний підшипник 6 тисне на шарошку 1, яка змінює своє положення відносно забою, нахилиючись в різні боки по мірі обертання

корпусу. На шарошку діють сили з боку торцевої поверхні корпусу і з боку сферичного підшипника, встановленого на вертикальній цапфі, які утримують бурову головку від зсуву і дозволяють перетворити момент обертання корпусу долота в момент обертання шарошки, що діє на забій у площині, яка проходить через вісь обертання корпусу долота.

Вихідними параметрами процесу буріння на трьох рівнях було прийнято: зусилля подачі бурового долота на забій  $P$ , кН ( $X_1$ ) і частота обертання бурового інструмента  $W$ , рад./с ( $X_2$ ).

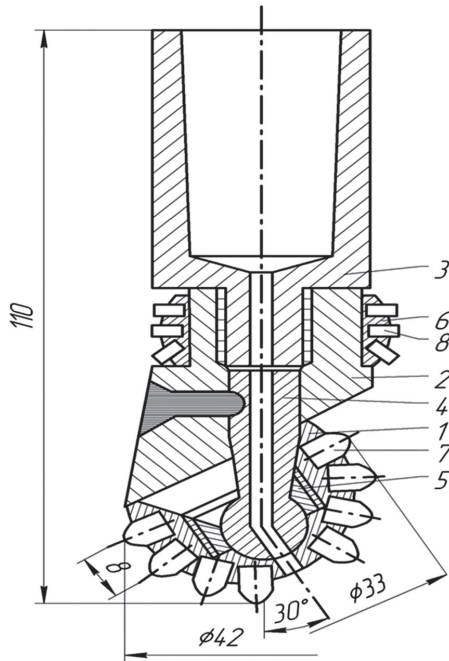


Рис. 2. Одношарошкове долото ОДВ-215,9-30:

- 1 — шарошка; 2 — корпус; 3 — цапфа;
- 4 — сферичний підшипник; 5 — гайка;
- 6 — радіально-упорний підшипник;
- 7 — твердосплавні зубки; 8 — гайка;

Вихідними (реєстрованими) факторами були: термін буріння одного метра свердловини, струм і напруга ротора електродвигуна. За результатами вимірів було розраховано швидкість буріння  $V_{бур}$ , м/хвил. ( $Y_1$ ) і потужність, що була споживана електродвигуном ротора бурового станка під час буріння. Енергоємність буріння  $E_{бур}$ , мДж/м ( $Y_2$ ) обчислювали шляхом ділення витраченої потужності на швидкість буріння одного метра свердловини. Рівень вібрацій бурового станка  $U$ , дБА вимірювали за допомогою приладу ІШВ-1, датчик прискорень якого було встановлено на патроні ротора бурового верстата.

Середні значення експериментальних даних наведено в табл. 1.

Оптимальні параметри процесу буріння визначали як оптимальні області допустимих значень факторів  $X_1, X_2$  (табл. 2).

Ці оптимальні області обмежені поверхнями рівня функції відклику за кожним з параметрів оптимізації (табл. 3).

Як критерій оптимальності плану прийнято критерій D-оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією об'єму еліпсоїду розсіювання оцінок параметрів рівнянь регресії [3], з урахуванням якого було побудовано план експерименту (табл. 4).

Таблиця 2

Значення факторів варіювання

Вхідні параметри	Фізичний зміст фактору		
	Зусилля подачі бурового долота на забій, $P$ , кН	Частота обертання бурового станка, $W$ , рад./с	
	$X_1$	$X_2$	
Інтервал варіювання	45	5	
Рівні фактору	-1	90	5
	0	135	10
	+1	180	15

Таблиця 1

Швидкість буріння  $V_{бур}$ , енергоємність буріння  $E_{бур}$ , та рівень вібрацій  $U$  на патроні обертача бурового станка для базового (серійного) ІІІ АВ-215,9 Т-П та розробленого (пропонованого) ОДВ-215,9-30 доліт

№, з п	Вхідні (варійовані) фактори				Вихідні (вимірювані) параметри						
	Кодовані		Натурні		Одношарошкове долото ОДВ-215,9-30			Тришарошкове долото ІІІ АВ-215,9 Т-П			
	$X_1$	$X_2$	$P$ , кН	$W$ , рад./с	$V_{бур}$ ( $Y_1$ ), м/хвил.	$E_{бур}$ ( $Y_2$ ), мДж/м	$U$ ( $Y_3$ ), дБА	$V_{бур}$ ( $Y_1''$ ), м/хвил.	$E_{бур}$ ( $Y_2''$ ), мДж/м	$U$ , дБА	
1	-1	-1	90	5,0	0,223	7,1	34	0,207	3,6	63	
2	-1	0	90	10,0	0,343	6,6	35	0,250	5,8	75	
3	-1	1	90	15,0	0,457	6,0	36	0,300	6,2	75	
4	0	-1	135	5,0	0,278	5,7	34	0,240	3,6	65	
5	0	0	135	10,0	0,425	5,2	35	0,345	4,7	70	
6	0	1	135	15,0	0,500	4,8	36	0,370	5,4	65	
7	1	-1	180	5,0	0,336	4,7	33	0,370	5,4	65	
8	1	0	180	10,0	0,497	4,2	34	0,265	3,6	64	
9	1	1	180	15,0	0,539	4,0	36	0,422	3,7	64	
Середні значення вихідних параметрів					0,459	5,37	34,78	0,313	4,64	66,7	
Значення вихідних параметрів відносно тришарошкового долота					1,466	1,157	0,52	1	1	1	

Таблиця 3

Параметри оптимізації режиму буріння

№ з.п.	Код параметра оптимізації	Фізичний зміст параметра оптимізації
1	Y <sub>1</sub>	Швидкість буріння, V <sub>бур</sub> , м/хвил.
2	Y <sub>2</sub>	Енергоємність буріння, E <sub>бур</sub> , мДж/м
3	Y <sub>3</sub>	Рівень вібрацій на патроні обертача бурового станка, U, дБа

Таблиця 4

Матриця плану експерименту

№ з.п.	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>
1	1	-1	-1	1	1	1
2	1	-1	0	0	1	0
3	1	-1	1	-1	1	1
4	1	0	-1	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0
6	1	0	1	0	0	1
7	1	1	-1	-1	1	1
8	1	1	0	0	1	0
9	1	1	1	1	1	1

Для створеного плану експерименту (табл. 4) за методом найменших квадратів обчислено коефіцієнти рівнянь регресії за виразом (1)

$$b_i = (X^* \cdot X)^{-1} \cdot X^* \cdot Y, \quad (1)$$

де b<sub>i</sub> – коефіцієнт рівняння регресії; X – матриця плану експерименту; X\* – транспонована матриця плану експерименту; (X\*·X)<sup>-1</sup> – матриця, обернена до добутку матриці плану експерименту на його транспоновану матрицю; Y – вектор-стовпець результатів експерименту.

Обробка результатів експерименту і визначення коефіцієнтів рівнянь регресії з урахуванням їхньої значущості дозволили одержати поліноміальні моделі.

Статистичний аналіз отриманих результатів містить перевірку двох статистичних гіпотез:

– про значущість отриманих коефіцієнтів моделі;

– про адекватність представлення результатів експерименту здобутих рівняннями регресії [4], [5]. Коефіцієнти рівняння регресії підставлені в поліноміальну форму вигляду:

$$Y_1 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2. \quad (2)$$

Для кожного з параметрів оптимізації за формулою (1) знайдено коефіцієнти регресії, які підставлені в рівняння (2). Рівняння регресії для кожного параметра оптимізації мають такий вигляд:

$$Y_1' = 0,423 + 0,058 \cdot X_1 + 0,109 \cdot X_2 - 0,008 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,002 \cdot X_1^2 - 0,033 \cdot X_2^2;$$

$$Y_2' = 5,2 - 1,133 \cdot X_1 - 0,45 \cdot X_2 + 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,2 \cdot X_1^2 + 0,05 \cdot X_2^2;$$

$$Y_3' = 34,889 - 0,333 \cdot X_1 + 1,166 \cdot X_2 + 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,333 \cdot X_1^2 + 0,167 \cdot X_2^2;$$

$$Y_1'' = 0,345 + 0,057 \cdot X_1 + 0,062 \cdot X_2 + 0,014 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,008 \cdot X_1^2 - 0,039 \cdot X_2^2;$$

$$Y_2'' = 4,655 - 0,517 \cdot X_1 + 1,0 \cdot X_2 - 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,117 \cdot X_1^2 - 0,133 \cdot X_2^2;$$

$$Y_3'' = 69,555 - 4,167 \cdot X_1 + 1,333 \cdot X_2 - 4,0 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,167 \cdot X_1^2 - 4,333 \cdot X_2^2.$$

Згідно з отриманими рівняннями регресії в тривимірному просторі побудовано діаграми поверхонь функцій відклику, які показують залежність відповідного параметра оптимізації, а саме:

– швидкість буріння V<sub>бур</sub>, м/хвил., розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 (Y<sub>1</sub>') (рис. 3, а) та серійним тришарошковим долотом ІІІ АВ-215,9 Т-П (Y<sub>1</sub>'') (рис. 3, б) відповідно;

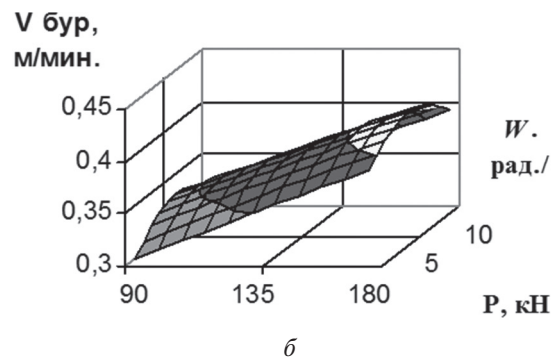
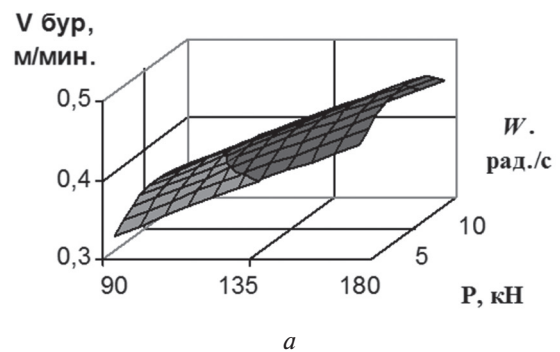


Рис. 3. Діаграма для швидкості буріння V<sub>бур</sub>, м/хвил.:

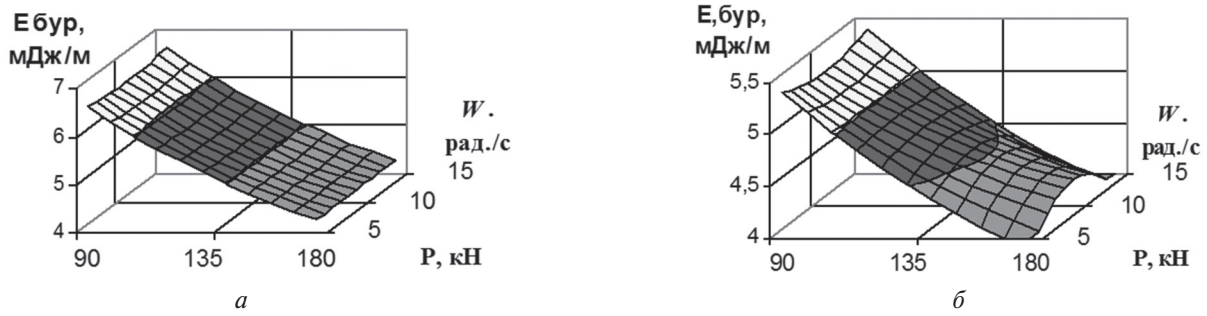
а – розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 (Y<sub>1</sub>');

б – серійним тришарошковим долотом ІІІ АВ-215,9 Т-П (Y<sub>1</sub>'')

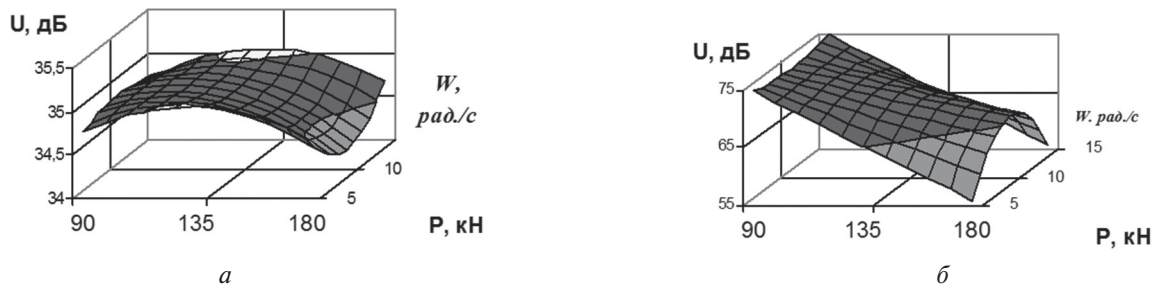
– енергоємність буріння E<sub>бур</sub>, мДж/м, розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 (Y<sub>2</sub>') (рис. 4, а) та серійним тришарошковим долотом ІІІ АВ-215,9 Т-П (Y<sub>2</sub>'') (рис. 4, б) відповідно;

– рівень вібрацій на патроні обертача бурового станка під час буріння U, дБа, розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 (Y<sub>3</sub>') (рис. 5, а) та серійним тришарошковим долотом ІІІ АВ-215,9 Т-П (Y<sub>3</sub>'') (рис. 5, б) відповідно;

від:  
– зусилля подачі бурового долота на забій P, кН (X<sub>1</sub>);  
– частоти обертання бурового станка W, рад./с. (X<sub>2</sub>).



**Рис. 4. Діаграма для енергоємності буріння  $E_{\text{бур.}}$ , мДж/м:**  
 а – розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 ( $Y_2'$ );  
 б – серійним тришарошковим долотом ІІІ АВ-215,9 Т-П ( $Y_2''$ )



**Рис. 5. Діаграма для рівня вібрацій на патроні обертача бурового станка під час буріння  $U$ , дБа:**  
 а – розробленим одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 ( $Y_3'$ );  
 б – серійним тришарошковим долотом ІІІ АВ-215,9 Т-П ( $Y_3''$ )

Режимні параметри буріння підривних свердловин наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Діаграмні значення швидкості буріння  $V_{\text{бур.}}$ , енергоємності буріння  $E_{\text{бур.}}$  та рівня вібрацій  $U$  для базового (серійного) ІІІ АВ-215,9 Т-П та розробленого (пропонованого) ОДВ-215,9-30 доліт

Показники	Зусилля подачі долота на забій, кН						
	ОДВ-215,9-30			ІІІ АВ-215,9 Т-П			
	90	135	180	90	135	180	
	Швидкість буріння $V_{\text{бур.}}$ , м/хвил.						
Частота обертання бурового станка, рад./с	5	0,330907	0,390056	0,445538	0,367334	0,383520	0,391434
	10	0,362889	0,422889	0,479222	0,396093	0,411040	0,418333
	15	0,330907	0,390056	0,445538	0,367334	0,383520	0,391434
		Енергоємність буріння $E_{\text{бур.}}$ , мДж/м					
	5	6,628333	5,250000	4,271667	5,405556	4,522222	3,872222
	10	6,533333	5,200000	4,266667	5,288889	4,655556	4,255556
	15	6,628333	5,250000	4,271667	5,405556	4,522222	3,872222
		Рівень вібрацій $U$ , дБа					
	5	34,76389	35,05056	34,68056	74,88889	65,22222	55,88889
	10	34,88889	34,88889	34,22222	73,88889	68,72889	65,55556
	15	34,76389	35,05056	34,68056	74,88889	65,22222	55,88889

За будь-якого значення зусилля подачі бурового долота на забій  $P$ , кН, ( $X_1$ ) всі параметри оптимізації режиму буріння будь-яким долотом при частоті обертання бурового станка  $W$ , ( $X_2$ ) = 5 рад./с та  $W$ , ( $X_2$ ) = 15 рад./с мають однакові величини (табл. 5). Однак при  $W$ , ( $X_2$ ) = 10 рад./с швидкість буріння  $V_{\text{бур.}}$ , м/хвил., ( $Y_1$ ) є максимальною, а енергоємність ( $Y_2'$ ) та рівень вібрацій на патроні обертача

бурового станка під час буріння  $U$ , дБа ( $Y_3'$ ) для розробленого одношарошкового долота з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30 – мінімальні.

Для серійного тришарошкового долота ІІІ АВ-215,9 Т-П (табл. 5) енергоємність ( $Y_2''$ )  $E_{\text{бур.}}$  = 5,288889 мДж/м та рівень вібрацій ( $Y_3''$ )  $U$  = 73,88889 дБа мінімальні лише при зусиллі подачі бурового долота на забій  $P$ , кН, ( $X_1$ ) = 90 кН, а

при  $P = 135$  кН та  $P = 180$  кН вони – максимальні ( $E_{\text{бур.}} = 4,655556$  мДж/м,  $E_{\text{бур.}} = 4,255556$  мДж/м та  $U = 68,72889$  дБа,  $U = 65,55556$  дБа відповідно).

Максимальна швидкість буріння розробленим (пропонованим) долотом ОДВ-215,9-30 становить  $0,479222$  м/хвил. при зусиллі подачі бурового долота на забій  $P, (X_1) = 180$  кН та частоті обертання бурового станка  $W, (X_2) = 10$  рад./с, що на  $12,7$  % вища за таку серійним тришарошковим долотом ІІ АВ-215,9 Т-П (табл. 5).

Мінімальні енергоємність буріння ( $E_{\text{бур.}} = 4,266667$  мДж/м.) та рівень вібрацій ( $U = 34,22222$  дБа) для пропонованого долота визначено за тих самих значеннях факторів варіювання (табл. 5). Рівень вібрацій для долота ОДВ-215,9-30 майже вдвічі нижчий, ніж для долота ІІ АВ-215,9 Т-П.

### Висновки

Вперше проведено математичне й комп'ютерне дослідження і визначено оптимальні режимні параметри буріння підривних свердловин у гірських масивах розробленим (пропонованим) одношарошковим долотом з вертикальною цапфою ОДВ-215,9-30, а саме: зусилля подачі бурового долота на забій має бути  $180$  кН, а частота обертання бурового станка –  $10$  рад./с. За таких умов швидкість

буріння максимальна, а енергоємність і рівень вібрацій – мінімальні.

Розроблене одношарошкове долото ОДВ-215,9-30 має суттєві переваги перед тришарошковим долотом ІІ АВ-215,9 Т-П, що серійно випускається: швидкість буріння на  $12,7$  % вище, а рівень вібрацій для долота ОДВ-215,9-30 майже вдвічі нижчий, ніж для долота ІІ АВ-215,9 Т-П.

### Список літератури:

1. Долота шарошкові. Технічні умови (ГОСТ 20692-2003, ІДТ):ДСТУ ГОСТ 20692:2004 – [чинний з 2004-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 14 с. – (Національний стандарт України).
2. Буткин, В.Д. Оценка способности шарошечных долот и режимов бурения шарошечными станками в производственных условиях / В.Д. Буткин, А.В. Гилев, С.Н. Вершинский // Территория нефтегаз. -2008. - № 2. – С. 32-35.
3. Голикова, Т.И. Свойства D-оптимальных планов и методы их построения / Т.И. Голикова, Н.Г. Микешина // Новые идеи в планировании эксперимента. – М.: 1969. – С. 34-39.
4. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1971. – 496 с.
5. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 30 с.

Надійшла до редколегії 30.05.2017