

БАГАТОФАКТОРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МЕХАНІЧНОЇ ШВИДКОСТІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА ПЛОЩАХ ШАХТОУПРАВЛІННЯ «ПОКРОВСЬКЕ» КОМПАНІЇ «ДОНЕЦЬКСТАЛЬ»

¹В.М. Мойсишин, ¹Р.Б. Щербій, ²В.А. Турчин, ²В.Л. Шевелєв, ²С.А. Зінченко

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727131,
e-mail: math@nimg.edu.ua

²ПрАТ «Донецьксталь» – металургійний завод»; м. Донецьк, вул. Челюскінців, 174;
тел. 067 6227848

З метою встановлення багатофакторної математичної моделі механічної швидкості буріння, яка враховує спільний вплив режимних параметрів та жорсткості компоновки низу бурильної колони (КНБК) на механічну швидкість буріння, було застосовано метод раціонального планування експериментів. За цим методом з 19.05.2011 по 31.10.11 в шахтоуправлінні «Покровське» компанії «Донецьксталь» автоматизованим буровим комплексом Utra Single 150 було пробурено вісім дегазаційних свердловин глибиною 676-758 м. Комбінація змінних чинників, до яких відносяться осьове статичне навантаження F_{CT} , частота обертання долота n_d і жорсткість C КНБК, зустрічається тільки один раз. Загальну функцію механічної швидкості буріння подано у вигляді добутку окремих залежностей від змінних чинників – $V_{MEX} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n_d) \cdot f(C)$. Постійними чинниками під час проведення планованого експерименту були витрата промивальної рідини, тип і діаметр тришарошкового долота типу SS-TMGC та твердість гірської породи (алевроліти) – 960МПа.

За результатами планованого експерименту рівняння багатофакторної математичної моделі механічної швидкості буріння набуло вигляду: $V_{MEX} = 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot F_{CT}^{0,6031514} \cdot n_d^{2,292906} \cdot C^{-0,6032162}$.

Ключові слова: механічна швидкість буріння, компоновка низу бурильної колони, планований експеримент, змінний чинник, гірська порода.

С целью установления многофакторной математической модели механической скорости бурения, учитывающей совместное влияние режимных параметров и жесткости компоновки низа бурильной колонны (КНБК) на механическую скорость бурения, был использован метод рационального планирования экспериментов. Согласно этого метода с 19.05.2011 по 31.10.11 в шахтоуправлении «Покровское» компании «Донецксталь» автоматизированным буровым комплексом Utra Single 150 было пробурено восемь дегазационных скважин глубиной 676-758 м. Комбинация переменных факторов, к которым относят осевую статическую нагрузку F_{CT} , частоту вращения долота n_d и жесткость C КНБК, встречается только один раз. Общая функция механической скорости бурения представлена произведением отдельных зависимостей от переменных факторов – $V_{MEX} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n_d) \cdot f(C)$. Постоянными факторами при проведении планированного эксперимента были расход промывочной жидкости, тип и диаметр трехшарошечного долота типа SS-TMGC и твердость горной породы (алевролиты) – 960МПа.

По результатам планированного эксперимента уравнение многофакторной математической модели механической скорости бурения имеет вид: $V_{MEX} = 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot F_{CT}^{0,6031514} \cdot n_d^{2,292906} \cdot C^{-0,6032162}$.

Ключевые слова: механическая скорость бурения, компоновка низа бурильной колонны, планированный эксперимент, переменный фактор, горная порода.

With the purpose of establishment of multifactor mathematical model of mechanical speed of the boring drilling which takes into account common influence of regime parameters and inflexibility of arrangement of bottom of drilling column (ABDC) on mechanical speed of the boring drilling method of the rational planning of experiments was used. After that one from 19.05.2011 to 31.10.2011 year in the office of mine management of the «Pokrovsk» of company «Donetsstal» 8 degas drilling holes were bored by automated by drilling complex Utra Single 150 to depth 676-758 m. Combination of variable factors which include axial static loading F_{CT} , frequency of rotation of chisel n_d , inflexibility C of ABDC meets only one time. A public multidimensional function is given by work of separate dependences on variable factors – $V_{MEX} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n_d) \cdot f(C)$. Were are permanent factors during conducting of the planned experiment expense of washing liquid 15 l/s, type and diameter of chisel is SS-TMGC 193,7 mm and hardness of rock is 960 MPa what was represented by aleвроllites.

As a result of the planned experiment of equalization of multifactor mathematical model of mechanical speed of the boring drilling has a kind $V_{MEX} = 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot F_{CT}^{0,6031514} \cdot n_d^{2,292906} \cdot C^{-0,6032162}$.

Keywords: mechanical speed of the boring drilling, arrangement of bottom of drilling column, planned experiment, variable factor, rock.

Таблиця 1 – Результати буріння восьми дегазаційних свердловин

№ свердловини	С, кН/м	Інтервал буріння, м	Проходка на долото, м	Час буріння, год.	Механічна швидкість буріння, м/год	Режим буріння		
						F _{ос} , кН	n _о , хв ⁻¹	Q, л/с
ДС6	2100	548-675,64	62,35	9,9	6,3	4,5	70	11
ДС16		74,3-726,4	20,5	1,2	17,08	8,2	85	14
ДС18		74,76-757,72	37,84	2,1	18,02	7	90	13
ДС4	4200	70,48-550,99	318,82	33,7	9,46	7,0	85	15
		550,99-675,58	62,35	9,3	6,70	8,2	70	10
ДС11		75,26-554,48	321,43	34,38	9,35	4,5	90	14
ДС3	8400	68,56-603,48	278,34	46,86	5,94	4,5	85	17
ДС5		73,72-555,48	319,1	44,94	7,10	8,2	90	14
ДС12		556,44-670,19	62,35	12,7	4,91	7,0	70	12

Одним із головних завдань буріння свердловин є підвищення техніко-економічних показників буріння: проходки на долото h та механічної швидкості буріння $V_{\text{мех}}$. За результатами експериментальних досліджень, проведених у стендових та промислових умовах [1, 3, 4], за використання в компоновці низу бурильної колони (КНБК) віброзахисних пристроїв (ВЗП) змінюється жорсткість та коефіцієнт демпфування бурильної колони загалом.

Обґрунтований вибір ВЗП (амортизаторів, регуляторів, демперів, пружних муфт, тощо) для конкретних умов буріння можна здійснити на основі кореляційних залежностей між їх характеристиками та механічною швидкістю буріння.

Для встановлення таких залежностей було вибрано метод стендових експериментальних досліджень, під час проведення яких режим буріння і параметри компоновки бурильного інструменту мають строго фіксовані значення та можливість їх зміни в певних межах для конкретних фізико-механічних характеристик гірської породи [7, 8].

Враховуючи зазначене вище, з метою встановлення багатофакторної математичної моделі механічної швидкості буріння, яка враховує спільний вплив режимних параметрів та параметрів бурильного інструменту, на буровому стенді ІФНТУНГ [6] були проведені експериментальні дослідження з використанням методу раціонального планування експериментів [2, 5].

Постійними факторами під час проведення планового експерименту були витрата промивальної рідини (вода), тип і діаметр тришарошкового долота та твердість гірської породи за штампом.

За результатами планованого експерименту рівняння багатофакторної математичної моделі механічної швидкості буріння мало вигляд:

$$V_{\text{MEK}} = 1,6703 \cdot 10^{-3} \cdot F_{\text{CT}}^{1,565623} \cdot n_o^{0,64089277} \times \beta^{-0,03314602} \cdot C^{-4,550764 \cdot 10^{-2}}$$

Для підтвердження результатів стендових експериментальних досліджень з 19.05.11 по 31.10.11 в шахтоуправлінні «Покровське» компанії «Донецьксталь» автоматизованим буровим комплексом Ultra Single 150 [9] було пробурено вісім дегазаційних свердловин глибиною 676-758 м. В інтервалі буріння під кондуктор (68-78 м) використовувались долота 295,3 мм типу SS-TMGC (код IADC117M), а під час буріння нижче кондуктора до проектної глибини свердловини (676-758 м) використовувались долота 193,7 мм типу SS-TMGC (код IADC117) з фрезованим зубом та герметизованою фрикційною опорою. Буріння нижче кондуктора до глибин 676-758 м велось в кам'яновугільних відкладах (світи амвросієвська C_1^5 і бешевська C_1^4), що представлені товщею перешарованих вугільних пропластків, аргілітів, алевролітів, дрібно- та середньозернистих пісковиків. Найбільшу потужність в інтервалі свердловин 68-757 м мають піщано-глинисті сланці (алевроліти).

Під час буріння свердловин системою верхнього приводу (СВП) використовувалась жорстка компоновка низу бурильної колони (КНБК) з двома центраторами, один з яких встановлювався над долотом, другий – над першою обваженою бурильною трубою. У процесі буріння з пристроєм зміни осьової жорсткості КНБК конструкції ІФНТУНГ останній встановлювався над долотом та центратором. Жорсткість пружного вузла пристрою визначалась кількістю пружин стискання, встановлених паралельно, і під час буріння відповідно складала 2100, 4200 та 8400кН/м.

Під час проведення промислового експерименту до постійних факторів, перерахованих вище, ми відносили також і коефіцієнт демпфування β , який для пружин стиску є незначним (до 0,1 кНс/м).

В таблиці 1 наведено результати буріння восьми свердловин шарошковими долотами в гірській породі представленій алевролітами, коефіцієнт міцності f яких за шкалою Прото-

Таблиця 2 – Результати досліджень за планованим трифакторним експериментом

№ досл.	Частота обертання $n_d, \text{хв}^{-1}$	Осьове статичне навантаження на долото $F_{ст}, \text{кН}$	Жорсткість $C, \text{кН/м}$	Механічна швидкість буріння $V_{МЕХ}, \text{м/год}$
1	4,5	70	2100	6,3
2	4,5	85	8400	5,94
3	4,5	90	4200	9,35
4	7	70	8400	4,91
5	7	85	4200	9,46
6	7	90	2100	18,02
7	8,2	70	4200	6,7
8	8,2	85	2100	17,08
9	8,2	90	8400	7,1

Таблиця 3 – Результати експерименту з визначення $V_{МЕХ}$ усереднені за різних значень режимних параметрів

$n_d, \text{хв}^{-1} \backslash F_{ст}, \text{кН}$	4,5	7	8,2	Сума	Середнє
70	6,3	4,91	6,7	17,91	5,97
85	5,94	9,46	17,08	32,48	10,83
90	9,35	18,02	7,1	34,47	11,49
Сума	21,59	32,39	30,88	84,86	
Середнє	7,2	10,80	10,29		

Таблиця 4 – Результати експерименту з визначення $V_{МЕХ}$ усереднені за різних значень осьового статичного навантаження на вибій та жорсткості КНБК

$F_{ст}, \text{кН} \backslash C, \text{кН/м}$	2100	4200	10000	Сума	Середнє
4,5	6,3	9,35	5,94	21,59	7,2
7	18,02	9,46	4,91	32,39	10,8
8,2	17,08	6,7	7,1	30,88	10,29
Сума	41,4	25,51	17,95	84,86	
Середнє	13,8	8,50	5,98		

Таблиця 5 – Результати експерименту з визначення $V_{МЕХ}$ усереднені за різних значень частоти обертання долота та жорсткості КНБК

$n_d, \text{хв}^{-1} \backslash C, \text{кН/м}$	2100	4200	8400	Сума	Середнє
70	6,3	6,7	4,91	17,91	5,97
85	17,08	9,46	5,94	32,48	10,83
90	18,02	9,35	7,1	34,47	11,49
Сума	41,4	25,51	17,95	84,86	
Середнє	13,8	8,50	5,98		

дяконова рівний 6. Границя міцності алевролітів на стискання визначається за формулою:

$$\sigma_{ст} = 10 \cdot f = 10 \cdot 6 = 60 \text{ МПа}, \quad (1)$$

а твердість за штампом складає

$$p_{ш} = 16\sigma_{ст} = 16 \cdot 60 = 960 \text{ МПа}. \quad (2)$$

Згідно з класифікацією гірських порід за твердістю по штампу ця порода відноситься до

п'ятої категорії, яка представлена пластично-крихкими породами (алевроліти, ангідрити і т.д.).

Матрицю планованого експерименту із експериментальними значеннями механічної швидкості буріння наведено в таблиці 2.

У таблиці 3 наведено результати експерименту з визначення $V_{МЕХ}$, усереднені за режим-

ними параметрами, а в таблицях 4 і 5 – усереднені за одним з режимних параметрів та жорсткістю КНБК.

Підбір частинних емпіричних залежностей між змінними чинниками та механічною швидкістю буріння за експериментальними даними таблиці 2 наведено у таблиці 6.

Згідно з таблицями 4 і 5 найбільш потужним чинником зміни V_{MEX} є жорсткість КНБК. Під час зміни жорсткості з 2100 до 8400 кН/м швидкість зменшилась у 2,31 рази. Ймовірність Р існування емпіричної залежності між швидкістю та жорсткістю за криволінійною регресією більша за 0,9.

Для підсилення впливу інших змінних чинників на швидкість проведено нейтралізацію впливу жорсткості здійснюється двома способами: за методикою Протодяконова [2] та за методикою Яремійчука-Райхерта [5]. За методикою Протодяконова всі експериментальні

дані $V_{MEX.1.i}$ таблиці 2 коригуються (перераховуються) за формулою:

$$V_{MEX.1.i} = V_{MEX.i} + [f(C_{CP}) - f(C_i)], \quad (3)$$

де $f(F_{CT,CP})$ – значення енергоємності, визначене за формулою $V_{MEX} = 1362,288 \cdot C^{-0,6032162}$ та за середнім значенням $C_{CP} = 4900 \text{кН/м}$;

$f(C_{CT,i})$ – значення механічної швидкості, визначені за формулою $V_{MEX} = 1362288 \cdot C^{-0,6032162}$ та за значеннями $C=2100, 4200, \text{ і } 8400 \text{кН/м}$.

За методикою Яремійчука-Райхерта всі експериментальні дані $V_{MEX.1.i}$ таблиці 2 коригуються за формулою:

$$V_{MEX.2.i} = V_{MEX.i} \cdot f(C_{CP}) / f(C_i). \quad (4)$$

Скориговані за методикою Протодяконова та усереднені за режимними параметрами результати експерименту наведені у таблицях 7 і 8, а за методикою Яремійчука-Райхерта – у таблицях 9 і 10.

Таблиця 6 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей за експериментальними даними

Змінний чинник	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення	Співвідношення $0,1T_{CP} / \sigma_0$
Осьове статичне навантаження	$V_{MEX} = 2,711 \cdot F_{CT}^{0,6647584}$	0,8984 0,7<P<0,8	0,8196	1,15
Частота обертання долота	$V_{MEX} = 3,1176 \cdot 10^{-4} \cdot n_d^{2,2723321}$	0,9156 0,7<P<0,8	0,5378	1,753
Жорсткість КНБК	$V_{MEX} = 1362,288 \cdot C^{-0,6032162}$	0,965 0,9<P<0,95	0,3599	2,620

Таблиця 7 – Скориговані результати експерименту за методикою Протодяконова (Ск.1) та усереднені за різних значень жорсткості КНБК та статичного навантаження на вибій

$F_{CT}, \text{кН}$ \ / \ $C, \text{кН/м}$	2100	4200	8400	Сума	Середнє
4,5	0,9	8,56	8,19	17,65	5,88
7	12,62	8,67	7,16	28,45	9,48
8,2	11,68	5,91	9,35	26,94	8,98
Сума	25,2	23,14	24,7	73,04	
Середнє	8,4	7,71	8,23		

Таблиця 8 – Скориговані результати експерименту за методикою Протодяконова (Ск.1) та усереднені за різних значень жорсткості КНБК та частоти обертання долота

$n_d, \text{ХВ}^{-1}$ \ / \ $C, \text{кН/м}$	2100	4200	8400	Сума	Середнє
70	0,9	5,91	7,16	13,97	4,66
85	11,68	8,67	8,19	28,54	9,51
90	12,62	8,56	9,35	30,53	10,18
Сума	25,2	23,14	24,7	73,04	
Середнє	8,4	7,71	8,23		

Результати підбору частинних степеневих емпіричних залежностей між змінними чинниками та швидкістю за скоригованими даними, одержаними у ході нейтралізації впливу жорсткості за методиками Протодьяконова та Яремійчука-Райхерта, зведені у таблиці 11 і 12.

Згідно з таблицями 3 і 5 другим за ступенем впливу чинником зміни V_{MEX} є частота обертання долота. З підвищенням частоти обертання від 70 до 90 xv^{-1} швидкість збільшилась у 1,92 рази.

В таблиці 13 наведено результати підбору частинних залежностей $V_{MEX} = f(n_d)$, які подано у вигляді степеневі функції за експериментальними та скоригованими даними.

За цією таблицею кращою частинною залежністю $V_{MEX} = f(n_d)$ є залежність, підібрана за скоригованими даними $V_{MEX.CK.2.i}$.

У випадку використання залежності $V_{MEX} = 3,2166 \cdot 10^{-4} \cdot n_d^{2,292906}$ емпіричне значення

Таблиця 9 – Скориговані результати експерименту за методикою Яремійчука-Райхерта (Ск.2) та усереднені за різних значень жорсткості КНБК та статичного навантаження на вибій

F_{CT}, kH \ C, кН/м	2100	4200	8400	Сума	Середнє
4,5	3,78	8,52	8,23	20,53	6,84
7	10,81	8,62	6,80	26,23	8,74
8,2	10,25	6,10	9,83	26,18	8,73
Сума	24,84	23,24	24,86	72,94	
Середнє	8,28	7,75	8,29		

Таблиця 10 – Скориговані результати експерименту за методикою Яремійчука-Райхерта (Ск.2) та усереднені за різних значень жорсткості КНБК та частоти обертання долота

n_d, xv^{-1} \ C, кН/м	2100	4200	8400	Сума	Середнє
70	3,78	6,10	6,80	16,68	5,56
85	10,25	8,62	8,23	27,1	9,03
90	10,81	8,52	9,83	29,16	9,72
Сума	24,84	23,24	24,86	72,94	
Середнє	8,28	7,75	8,29		

Таблиця 11 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей за даними скоригованими за методикою Протодьяконова

Змінний чинник	Частинні емпіричні залежності за скоригованими даними (Ск.1)	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення	Співвідношення $0,1T_{CP} / \sigma_0$
Осьове статичне навантаження	$V_{MEX} = 1,85 \cdot F_{CT}^{0,7867184}$	0,8996 0,7 < P < 0,8	0,8321	0,975
Частота обертання долота	$V_{MEX} = 3,1673 \cdot 10^{-4} \cdot n_d^{3,253537}$	0,9865 0,8 < P < 0,9	0,5777	1,41

Таблиця 12 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей за даними скоригованими за методикою Яремійчука-Райхерта

Змінний чинник	Частинні емпіричні залежності за скоригованими даними (Ск.2)	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення	Співвідношення $0,1T_{CP} / \sigma_0$
Осьове статичне навантаження	$V_{MEX} = 3,571 \cdot F_{CT}^{0,4385919}$	0,9467 0,7 < P < 0,8	0,3137	2,583
Частота обертання долота	$V_{MEX} = 3,2166 \cdot 10^{-4} \cdot n_d^{2,292906}$	0,9913 0,9 < P < 0,95	0,3523	2,6341

Таблиця 13 – Результати підбору частинної залежності $V_{MEX} = f(n_{\partial})$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення	Співвідношення $0,1T_{CP} / \sigma_0$
Експериментальні дані	$V_{MEX} = 3,1176 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\partial}^{2,2723321}$	0,9156 0,7 < P < 0,8	0,5378	1,753
Скориговані дані (Ск.1) $F \approx \text{const}$	$V_{MEX} = 3,1673 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\partial}^{3,253537}$	0,9865 0,8 < P < 0,9	0,5777	1,41
Скориговані дані (Ск.2) $F \approx \text{const}$	$V_{MEX} = 3,2166 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\partial}^{2,292906}$	0,9913 0,9 < P < 0,95	0,3523	2,6341

Таблиця 14 – Скориговані результати експерименту за методикою Протодяконова (Ск.3) та усереднені за різних значень режимних параметрів

F_{CT} , кН \ n_{∂} , хв. ⁻¹	4,5	7	8,2	Сума	Середнє
70	6,12	9,14	8,44	23,7	7,9
85	7,57	7,96	9,59	25,12	8,37
90	6,69	8,98	8	23,67	7,89
Сума	20,38	26,08	26,03	72,49	
Середнє	6,79	8,69	8,68		

Таблиця 15 – Скориговані результати експерименту за методикою Яремійчука-Райхерта (Ск.4) та усереднені за різних значень режимних параметрів

F_{CT} , кН \ n_{∂} , хв. ⁻¹	4,5	7	8,2	Сума	Середнє
70	9,05	7,06	9,63	25,74	8,58
85	5,47	8,71	15,73	29,91	9,97
90	7,55	14,56	5,74	27,85	9,28
Сума	22,07	30,33	31,1	83,5	
Середнє	7,36	10,11	10,37		

кореляції та відношення $0,1T_{CP} / \sigma_0$ будуть найбільшими, а середньоквадратичне відхилення – найменшим. Ймовірність існування емпіричної залежності між швидкістю обертання та механічною швидкістю буріння більша за 0,9.

Нейтралізуємо вплив частоти обертання на осьове статичне навантаження. За методикою Протодяконова всі скориговані дані $V_{CK.2.i}$ таблиці 10 перераховуються за формулою:

$$V_{MEX.CK.3.i} = V_{MEX.CK.2.i} + [f(n_{CP}) - f(n_{\partial i})], \quad (5)$$

де $f(n_{CP})$ – значення енергоємності, визначене за формулою $V_{MEX} = 3,2166 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\partial}^{2,292906}$ та за середнім значенням $n_{CP} = 82 \text{ хв}^{-1}$;

$f(n_{\partial i})$ – значення енергоємності, визначені за формулою $V_{MEX} = 3,2166 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\partial}^{2,292906}$ та за значеннями $n_{\partial} = 70, 85$ і 90 хв^{-1} .

За методикою Яремійчука-Райхерта всі скориговані дані $V_{CK.2.i}$ таблиці 10 перераховуються за формулою:

$$V_{MEX.CK.4.i} = V_{MEX.CK.2.i} \cdot f(n_{CP}) / f(n_{\partial i}). \quad (6)$$

Скориговані за методикою Протодяконова та усереднені за режимними параметрами результати експерименту зведені в таблицю 14, а

за методикою Яремійчука-Райхерта – в таблицю 15.

В таблиці 16 наведено результати підбору частинних залежностей $V_{MEX} = f(F_{CT})$ у вигляді степеневі функції за експериментальними та скоригованими даними.

За цією таблицею кращою частинною залежністю $V_{MEX} = f(F_{CT})$ є залежність, підібрана за скоректованими даними $V_{MEX.CK.4.i}$.

За цієї залежності $V_{MEX} = 3,002 \cdot F_{CT}^{0,6031514}$ емпіричне значення кореляції та відношення $0,1T_{CP} / \sigma_0$ найбільші, а середньоквадратичне відхилення – найменше. Ймовірність існування емпіричної залежності між швидкістю обертання долота та механічною швидкістю буріння більша за 0,95.

Якщо кожна комбінація значень змінних чинників зустрічається тільки один раз, то загальну багатофакторну функцію можна подати у вигляді добутку окремих залежностей від змінних чинників $V_{MEX} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n_{\partial}) \cdot f(C)$. Частинні залежності між кожним чинником та механічною швидкістю буріння наведено у таблиці 17.

Таблиця 16 – Результати підбору частинної залежності $V_{MEX} = f(F_{CT})$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення	Співвідношення $0,1I_{CP} / \sigma_0$
Експериментальні дані	$V_{MEX} = 2,711 \cdot F_{CT}^{0,6647584}$	0,8984 0,7 < P < 0,8	0,8196	1,15
Скориговані дані (Ск.1) $C \approx \text{const}$	$V_{MEX} = 1,85 \cdot F_{CT}^{0,7867184}$	0,8996 0,7 < P < 0,8	0,8321	0,975
Скориговані дані (Ск.2) $C \approx \text{const}$	$V_{MEX} = 3,571 \cdot F_{CT}^{0,4385919}$	0,9467 0,7 < P < 0,8	0,3137	2,583
Скориговані дані (Ск.2) $C \approx \text{const}$, (Ск.3) $n \approx \text{const}$	$V_{MEX} = 3,516 \cdot F_{CT}^{0,444588}$	0,9496 0,7 < P < 0,8	0,6323	2,633
Скориговані дані (Ск.2) $C \approx \text{const}$, (Ск.4) $n \approx \text{const}$	$V_{MEX} = 3,002 \cdot F_{CT}^{0,6031514}$	0,9971 0,95 < P < 0,98	0,3061	3,0317

Таблиця 17 – Частинні залежності $V_{MEX} = f(F_{CT})$, $V_{MEX} = f(n_d)$, $V_{MEX} = f(C)$

F_{CT} , кН	4,5	7	8,2
Скориговані значення V_{MEX}	7,36	10,11	10,37
$V_{MEX} = 3,002 \cdot F_{CT}^{0,6031514}$	7,44	9,71	10,68
$F_{CT}^{0,6031514}$	2,4773	3,2339	3,5577
n_d, XB^{-1}	70	85	90
Скориговані значення V_{MEX}	5,56	9,03	9,72
$V_{MEX} = 3,2166 \cdot 10^{-4} \cdot n_d^{2,292906}$	5,47	8,54	9,73
$n_d^{2,292906}$	17007,334	26544,611	30261,754
C , кН/м	2100	2400	8400
Експериментальні значення V_{MEX}	13,8	8,5	5,98
$V_{MEX} = 1362,288 \cdot C^{-0,6032162}$	13,50	8,89	5,85
$C^{-0,6032162}$	$9,9079 \cdot 10^{-3}$	$6,5222 \cdot 10^{-3}$	$4,2935 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 18 - Значення коефіцієнта В для усіх дослідів планованого експерименту

№ експ.	1	2	3	4	5
В	$1,50919 \cdot 10^{-3}$	$2,10308 \cdot 10^{-3}$	$1,91225 \cdot 10^{-3}$	$2,07925 \cdot 10^{-3}$	$1,5890 \cdot 10^{-3}$
№ експ.	6	7	8	9	
В	$1,85846 \cdot 10^{-3}$	$1,69776 \cdot 10^{-3}$	$1,82472 \cdot 10^{-3}$	$1,53597 \cdot 10^{-3}$	

В таблиці 18 подано значення коефіцієнта В, визначені за формулою:

$$B_i = \frac{V_{MEX,i}}{f(F_i) \cdot f(n_{di}) \cdot f(C_i)}, \quad (7)$$

де $V_{MEX,i}$ – значення швидкості за даними таблиці 1, яка відповідає і-тому досліді;

$f(F_{CT,i}) \cdot f(n_{di}) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних чинників, величини яких відповідають умовам і-того досліді таблиці 19.

За даними таблиці 18 середнє значення ко-

ефіцієнта В – $1,79 \cdot 10^{-2}$. В таблиці 19 наведено значення механічної швидкості буріння, визначені за рівнянням багатofакторної математичної моделі (8) та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними даними дослідів:

$$V_{MEX} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n_d) \cdot f(C) = 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot F_{CT}^{0,6031514} \cdot n_d^{2,292906} \cdot C^{-0,6032162}, \quad (8)$$

$$ВП = \frac{V_{MEX,EKC} - V_{MM}}{V_{MEX,EKC}} \cdot 100.$$

Таблиця 19 – Результати досліджень за планованим трифакторним експериментом та рівнянням багатфакторної математичної моделі

№ досл.	F _{СТ} , кН	n _д , хв ⁻¹	C, кН/м	V, м/год	V _{МЕХ} , м/год за рівнянням (8)	ВП, %
1	4,5	70	2100	6,3	7,47	-18,6
2	4,5	85	8400	5,94	5,06	14,8
3	4,5	90	4200	9,35	8,75	6,4
4	7	70	8400	4,91	4,23	13,8
5	7	85	4200	9,46	10,02	-5,9
6	7	90	2100	18,02	17,36	3,7
7	8,2	70	4200	6,7	7,06	5,4
8	8,2	85	2100	17,08	16,75	1,9
9	8,2	90	8400	7,1	8,27	-16,5

Середнє значення відносної похибки між експериментальними даними та значеннями швидкості, обчисленими за рівнянням багатфакторної математичної моделі, склало 9,7%.

Висновки

1. Методом раціонального планування експерименту встановлено багатфакторну математичну модель між механічною швидкістю буріння та осьовим статичним навантаженням на вибій, частотою обертання долота і жорсткістю компоновки бурильної колони, яка має вигляд:

$$V_{МЕХ} = B_{CP} \cdot f(F_{СТ}) \cdot f(n_d) \cdot f(C) = 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot F_{СТ}^{0,6031514} \cdot n_d^{2,292906} \cdot C^{-0,6032162}$$

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

2. Частинні залежності $V_{МЕХ} = f(F_{СТ})$, $V_{МЕХ} = f(n_d)$, $V_{МЕХ} = f(C)$ одержані методом планованого експерименту, апроксимуються емпіричними степеневими залежностями з ймовірністю для $F_{СТ}$ більшою за 0,95, а для n_d і C з ймовірністю більшою за 0,9.

Література

1 Алликвандер Э. Современное глубокое бурение [Текст] / Э. Алликвандер. – М.: Недра, 1969. – 232 с.
 2 Протодьяконов М.М. Методика рационального планирования эксперимента [Текст] / М.М. Протодьяконов. – М., 1970. – 76 с.
 3 Беликов В.Г. Рациональная отработка и износостойкость шарошечных долот [Текст] / В.Г. Беликов, С.А.Посташ. – М.: Недра, 1972. – 149 с.
 4 Потапов Ю.Ф. Разрушение горных пород трехшарошечными долотами малого диаметра [Текст] / Ю.Ф.Потапов, В.В. Симонов. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 86 с.
 5 Яремийчук Р.С. Бурение стволов большого диаметра [Текст] / Р.С.Яремийчук, Л.А.Райхерт. – М.: Недра, 1966. – 174 с.

6 Буровой стенд для дослідження процесу руйнування гірських порід і динаміки бурильного інструменту [Текст] / Б.Д.Борисевич, В.М.Мойсишин, Р.Б.Щербій [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 3(32). – С. 23-29.

7 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 і газових родовищ. – 2010. – № 4(37). – С.47-54.

8 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 і газових родовищ. – 2012. – №4(37). – С.47-54.

9 Кожушок О.Д. Эффективность использования бурового оборудования при сооружении дегазационных скважин [Текст] / О.Д.Кожушок, С.А.Зинченко, В.Л. Шевелев, М.Г.Черман // Уголь Украины. – 2013. – № 6. – С.13-17.

Стаття надійшла до редакційної колегії 03.09.13

Рекомендована до друку професором Коцкуличем Я.С. (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором Харченком Є.В. (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)