

Буріння свердловин

УДК 622.24

DOI: 10.31471/2304-7399-2024-19(73)-105-125

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГІЇ ЗУБЦЕВИХ КОЛИВАНЬ ДИНАМІЧНОГО СКЛАДНИКА ОБЕРТОВОГО МОМЕНТУ НА ДОЛОТІ

В. М. Мойсишин, А. П. Івасютин

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380(3422)71-72-31; e-mail: math@nung.edu.ua*

Метою пропонованої статті є встановлення за результатами стендових експериментальних досліджень впливу твердості гірської породи та зовнішніх незалежних чинників, до яких віднесено осьове статичне навантаження $F_{СТ}$, частоту обертання долота n , жорсткість C і коефіцієнт демпфування β бурильного інструменту, на енергію зубцевих коливань $E_{ЗК}$ динамічного складника обертового моменту на долоті. Стендові дослідження проводились за методом раціонального планування експериментів, згідно якого комбінація перелічених незалежних чинників зустрічається тільки один раз. Планований факторний експеримент проведено у блоках пісковика воротищенської світи, складених з двох пропластків твердістю 1440 і 2050 МПа. Постійними факторами під час буріння у стендових умовах були тип і діаметр тришарошкового долота та витрата промивальної рідини (води).

За результатами досліджень, проведених у пропластку твердістю 2050 МПа, побудовано рівняння багатофакторної емпіричної моделі енергії зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті, проведено аналіз впливу на цю енергію зовнішніх незалежних чинників, встановлено основні закономірності зміни частинних залежностей $E_{ЗК} = f(F_{СТ})$, $E_{ЗК} = f(n)$, $E_{ЗК} = f(C)$ і $E_{ЗК} = f(\beta)$ від твердості породи.

Зауважимо, що результати стендових досліджень у пропластку твердістю 1440 МПа нами опубліковано раніше у статті «Багатофакторні емпіричні моделі низькочастотних та зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті».

Ключові слова: *планований експеримент, змінний чинник, жорсткість бурильного інструменту, твердість гірської породи, спектральна щільність, енергія випадкового процесу, емпірична модель, енергія зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті.*

Вступ

Під час обертання породоруйнівного інструменту внаслідок опору поверхні вибою переміщенню зубців шарошок виникає реактивний момент і для його подолання до долота прикладають зовнішній обертовий момент, який є другим за значимістю основним параметром, що характеризує процес взаємодії долота з вибоєм. Величина моменту залежить від заглиблення зубців, яка у свою чергу визначається твердістю гірської породи, параметрами процесу буріння і конструктивними чинниками компонування низу бурильної колони.

Зміна миттєвих значень обертового моменту на долоті T_{di} являє собою такий же випадковий процес, як і процес зміни осьового зусилля на долоті [1,6]. Миттєве значення T_{di} можна подати у вигляді – $T_{di} = \bar{T}_d \pm T_{d,дин.i}$, де \bar{T}_d – середнє значення моменту на долоті, $T_{d,дин.i}$ – динамічний складник обертового моменту на долоті, який виникає в результаті зміни осьового навантаження на долото, різної комбінації фаз роботи елементів озброєння і нерівномірності руйнування вибою свердловини [3].

Враховуючи сказане, значний інтерес викликають дослідження, за результатами яких можна встановити залежності між енергією зубцевих коливань $T_{d,дин.i}$ та режимними і конструктивними чинниками процесу руйнування гірської породи різної твердості.

До конструктивних чинників віднесемо жорсткість C та коефіцієнт демпфування β бурильного інструменту, а до режимних чинників – осьове статичне навантаження F_{CT} та частоту обертання долота n .

Одним із методів встановлення таких залежностей є стендові експериментальні дослідження.

Метою роботи є встановлення багатofакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції між енергією зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті та зовнішніми незалежними чинниками при бурінні в пропластку твердістю 2050 МПа блоків пісковика воротищеської світи. Експериментальні дослідження було проведено на буровому стенді ІФНТУНГ [4] з використанням методики раціонального планування експерименту. За цією методикою комбінація значень незалежних зовнішніх чинників зустрічалась тільки один раз. Кожний з чинників змінювався на чотирьох рівнях. Тип і діаметр три шарошкового долота та витрата промивальної рідини (води) під час проведення експериментів залишались постійними.

Результати досліджень процесу зміни зубцевих коливань і умови їх проведення у пропластку твердістю 1440 МПа наведені в [9].

Основні закономірності розподілу загальної енергії процесу зміни обертового моменту на долоті по частотах спектру. За результатами експериментальних досліджень [4-7] процесу зміни осьової динамічної сили енергія повздовжніх коливань корпусу шарошкового долота розподіляється між двома складниками спектру, низькочастотним і зубцевим, який виникає при перекочуванні шарошок долота з зубця на зубець.

Теоретичне значення зубцевої частоти цих коливань залежить від розміщення зубців на поверхні шарошок і визначається за формулою

$$f_{зуб} = \frac{D_{дол} \cdot n \cdot Z_{min}}{d_{ш} \cdot 60} \text{ Гц}, \quad (1)$$

де $D_{дол}$ – діаметр долота, мм; $d_{ш}$ – діаметр шарошки, мм; n – частота обертання долота, хв^{-1} ; Z_{min} – мінімальне число зубців периферійного вінця шарошки долота.

Геометричні параметри долота Ш-93Т-ЦА наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Геометричні параметри долота Ш-93Т-ЦА

№ шарошки	Діаметр шарошки	Периферійний вінець	
		крок зубців t , мм	число зубців Z_{min}
I	58,3	13,4	14
II	58,75	14,1	13
III	59,45	12,2	15

Під час буріння шарошковими долотами із фрезерованими зубцями на вибої свердловини утворюється зубчаста периферійна рейка [5, 7], яка впливає на процес взаємодії долота з вибоєм і збільшує або зменшує коефіцієнт проковзування. Результатом цього є відмінність між теоретичним і експериментальним значеннями частоти зубцевих коливань.

За кількістю виступів периферійної рейки експериментальне значення частоти зубцевих коливань визначається за формулою

$$f_{зуб} = \frac{1}{t_{зуб}} = \frac{Z_p}{T} \text{ Гц}, \quad (2)$$

де $t_{зуб}$ – період зубцевих коливань, с; Z_p – число виступів рейки; T – час руху шарошки по периферійній рейці, с, що визначається за формулою

$$T = \frac{L}{V} = \frac{\pi \cdot d_{CB}}{\omega_{ш} \cdot R_{ш}} = \frac{\pi \cdot d_{CB} \cdot i}{\omega_D \cdot R_{ш}} = \frac{\pi \cdot d_{CB} \cdot 30 \cdot d_{ш}}{\pi \cdot n \cdot R_{ш} \cdot D_{дол}} = \frac{d_{CB} \cdot 60}{n \cdot D_{дол}} \text{ с}; \quad (3)$$

де L – відстань, пройдена шарошкою, мм; V – швидкість її проходження, мм/с; d_{CB} – діаметр свердловини, мм; ω_{III} – кутова швидкість обертання шарошки, c^{-1} ; R_{III} – радіус шарошки, мм; i – передавальне число; ω_D – кутова швидкість обертання долота, c^{-1} ; $D_{ДОЛ}$ – діаметр долота, мм.

В табл. 2 наведено теоретичні $f_{ЗУБ}^T$ і експериментальні $f_{ЗУБ}^E$ значення зубцевих коливань долота для різних частот n його обертання.

Таблиця 2. Теоретичні та експериментальні значення частот зубцевих коливань долота

$n = 82$			$n = 133$		
$f_{ЗУБ}^T$	T	$f_{ЗУБ}^E$	$f_{ЗУБ}^T$	T	$f_{ЗУБ}^E$
28,1	0,732	24,6...26	45,6	0,451	39,9...42,13
$n = 188$			$n = 285$		
$f_{ЗУБ}^T$	T	$f_{ЗУБ}^E$	$f_{ЗУБ}^T$	T	$f_{ЗУБ}^E$
64,48	0,3191	56,4...59,54	97,75	0,2105	85,5...90,26

На рис. 1 наведено типову спектрограму внутрішньої структури (графік спектральної щільності) обертового моменту на долоті. На ньому $S_{f_{ЗУБ}}$ – значення спектральної щільності (дисперсії) на частоті зубцевих коливань; B_e – еквівалентна розрізняюча здатність енергетичного спектру; $S_{f_{ЗУБ \pm B_e/2}}$ – значення спектральної щільності (дисперсії) на частотах $f_{ЗУБ - B_e/2}$ і $f_{ЗУБ + B_e/2}$.

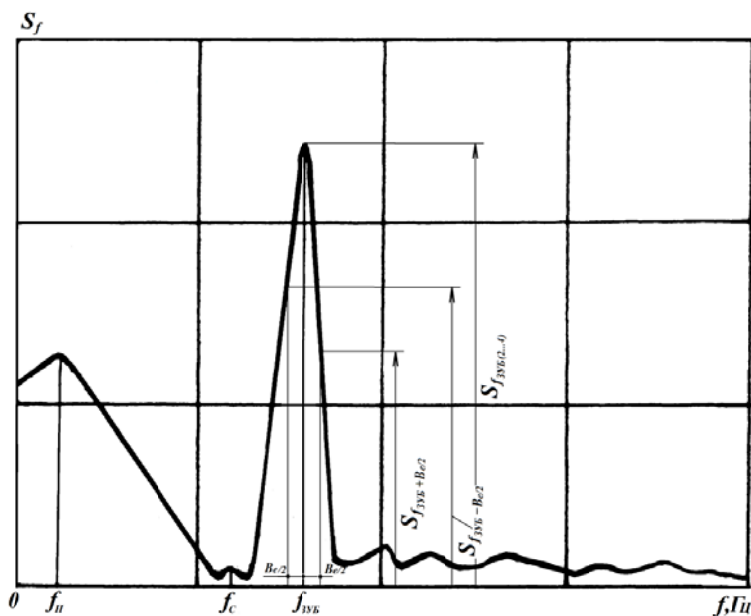


Рис. 1. Типова спектрограма (графік спектральної щільності) внутрішньої структури обертового моменту на долоті

Еквівалентна розрізняюча здатність енергетичного спектру визначається за формулою

$$B_e = \frac{1}{mh} \Gamma c, \quad (4)$$

де m – число кроків кореляційної функції; h – інтервал дискретності, c ;

Для одержання достовірної оцінки спектральної щільності (СЩ) на частоті зубцевих коливань за результатами аналізу тільки однієї реалізації використовується метод, який називається «вирівнюванням по частоті» [2]. За цим способом достовірна оцінка СЩ одержана шляхом усереднення значень СЩ в інтервалі частот рівних B_e і визначається за формулою

$$\bar{S}_{3VB} = (S_{3VB-B/2} + S_{3VB} + S_{3VB+B/2}) / 3. \quad (5)$$

Сумарна енергія СЩ в інтервалі B_e складає

$$CE = S_{3VB-B/2} + S_{3VB} + S_{3VB+B/2}. \quad (6)$$

Матрицю планованого експерименту зі значеннями енергії (дисперсії) зубцевих коливань $E_{3K} \equiv \bar{S}_{3VB}$ процесу зміни динамічного складника моменту на долоті подано в табл. 3.

Таблиця 3. План чотирифакторного експерименту зі значеннями енергії (дисперсії) зубцевих E_{3K} коливань при бурінні у пропластку твердістю 2050 МПа

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента β , кН·с/м	E_{3K} , $H^2 \cdot M^2$
1	82	10	400	0,1	5,7027
2	82	15	2500	40	5,5026
3	82	20	800	70	6,5937
4	82	25	1700	90	7,3089
5	133	10	800	90	1,2571
6	133	15	1700	70	7,7476
7	133	20	400	40	5,2472
8	133	25	2500	0,1	8,7351
9	188	10	1700	40	2,4956
10	188	15	800	0,1	6,1534
11	188	20	2500	90	6,5071
12	188	25	400	70	5,2934
13	285	10	2500	70	1,0431
14	285	15	400	90	1,1888
15	285	20	1700	0,1	5,5051
16	285	25	800	40	13,1053

У табл. 4-5 подано результати визначення енергії E_{3K} , усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Таблиця 4. Результати експерименту визначення енергії $E_{зк}$, усереднені за значеннями режимних параметрів

$n, \text{хв}^{-1}$ $F_{СТ}, \text{кН}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	5,7027	1,2571	2,4956	1,0431	10,4985	2,6246
15	5,5026	7,7476	6,1534	1,1888	20,5924	5,1481
20	6,5937	5,2472	6,5071	5,5051	23,8531	5,9633
25	7,3089	8,7351	5,2934	13,1053	34,4427	8,6107
Сума	25,1079	22,987	20,4495	20,8423	89,3867	22,3467
Середнє	6,27698	5,74675	5,1124	5,2106	22,3467	5,5867

Таблиця 5. Результати експерименту визначення енергії $E_{зк}$, усереднені за значеннями параметрів бурильного інструменту

$C, \text{кН/м}$ $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	5,7027	6,1534	5,5051	8,7351	26,0963	6,5241
40	5,2472	13,1053	2,4956	5,5026	26,3507	6,5877
70	5,2934	6,5937	7,7476	1,0431	20,6778	5,16945
90	1,1888	1,2571	7,3089	6,5071	16,2619	4,0655
Сума	17,4321	27,1095	23,0572	21,7879	89,3867	22,3467
Середнє	4,3580	6,7774	5,7643	5,44697	22,3467	5,5867

Результати підбору частинних емпіричних залежностей за усередненими експериментальними значеннями енергії зубцевих коливань $E_{зк}$ процесу зміни динамічного складника обертового моменту і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 6, в якій $P=1-\alpha$ – ймовірність існування кореляційної залежності між змінними факторами та величиною $E_{зк}$, σ_0 – величина основної помилки у разі заміни експериментальних даних відповідними емпіричними залежностями, визначеними за програмою підбору десяти залежностей App.1 і програмою апроксимації даних поліномами 2-го і 3-го ступенів.

Дані табл. 6 свідчать, що ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $E_{зк}$ та зовнішніми незалежними змінними факторами (чинниками), а саме n і $F_{СТ}$ більша за 0,98; ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими і умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{зк}$ виконується. Для β ймовірність існування залежності рівна 0,88, що дещо менше за допустимий нижній рівень ймовірності 0,9. З метою збільшення величини вибіркового коефіцієнта кореляції для емпіричної залежності $E_{зк.f} = f(\beta)$ була використано методику обробки результатів досліджень, проведених за планом факторного експерименту [8].

Таблиця 6. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності				Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{зк}$
$n, \text{ хв}^{-1}$	82	133	188	285	0,9983 0,998<P<0,999	0,1750<0,559
	6,2770	5,7468	5,1124	5,2106		
	$E_{зк.f} = (n / 0,2071328 \cdot n - 3,70773)$					
$F_{ст}, \text{ кН}$	10	15	20	25	0,9826 0,98<P<0,99	0,4585<0,559
	2,6246	5,1418	5,9633	8,6107		
	$E_{зк.f} = 0,37547 \cdot F - 0,98405$					
$C, \text{ кН/м}$	400	800	1700	2500	1 P=1	0,1267 <0,559
	4,358	6,7774	5,7643	5,447		
	$E_{зк.f} = 2,83211 \cdot 10^{-9} \cdot C^3 - 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 + 1,93546 \cdot 10^{-2} \cdot C - 1,3680183$					
$\beta, \text{ кН}\cdot\text{с/м}$	0,1	40	70	90	0,8896 0,88=P<0,9	0,551<0,559
	6,5241	6,5877	5,1694	4,0655		
	$E_{зк.f} = -0,027447 \cdot \beta + 6,959693$					

За цією методикою з метою підсилення впливу коефіцієнта демпфування бурильного інструменту було нейтралізовано вплив найбільш потужних зовнішніх чинників, тобто осевого статичного навантаження на долото і коефіцієнта жорсткості бурильного інструменту, але досягнути збільшення коефіцієнта кореляції не вдалось і тому при створенні багатофакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції енергії зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту використовується емпіричне рівняння регресії $E_{зк.f} = f(\beta)$, підібране за первинними експериментальними даними. Для чинника C апроксимація експериментальних даних проведена поліномом третього степеня, який характеризується наявністю мінімаксів, ймовірність частинної залежності рівна 1, умова існування такої залежності $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{зк}$ виконується, тобто це задовільний результат.

Для зменшення значення степеня полінома, який використовувався для апроксимації експериментальних даних залежності $E_{зк} = f(C)$ також застосовувалась методика нейтралізації впливу осевого навантаження і частоти обертання [8]. Результат апроксимації усереднених, скорегованих за цією методикою, експериментальних даних поліномом 2-го степеня незадовільний, умова $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{зк}$ не виконується.

У табл. 7 подано усереднені експериментальні значення енергії $E_{зк}$ процесу зміни динамічного складника обертового моменту на до-

лоті і значення, знайдені за рівняннями регресії частинних емпіричних залежностей $E_{3K} = f(F_{CT})$, $E_{3K} = f(n)$, $E_{3K} = f(C)$ і $E_{3K} = f(\beta)$.

Таблиця 7. Усереднені експериментальні значення енергії E_{3K} процесу зміни динамічного складника обертового моменту на долоті і значення, знайдені за рівняннями регресії частинних емпіричних залежностей

$n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Усереднені первинні експериментальні значення E_{3K}	6,2770	5,7468	5,1124	5,2106
$E_{3K.f} = n / (0,2071328 \cdot n - 3,70773)$	<u>6,1760</u>	<u>5,5786</u>	<u>5,3359</u>	<u>5,1514</u>
$F_{CT}, \text{кН}$	10	15	20	25
Усереднені первинні експериментальні значення E_{3K}	2,6246	5,1418	5,9633	8,617
$E_{3K.f} = 0,37547 \cdot F - 0,98405$	<u>2,7706</u>	<u>4,648</u>	<u>6,5254</u>	<u>8,4027</u>
$C, \text{кН/м}$	400	800	1700	2500
Усереднені первинні експериментальні значення E_{3K}	4,358	6,7774	5,7643	5,447
$E_{3K.f} = 2,83211 \cdot 10^{-9} \cdot C^3 - 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 + 1,93546 \cdot 10^{-2} \cdot C - 1,3680183$	<u>4,3631</u>	<u>6,7977</u>	<u>5,8560</u>	<u>5,6452</u>
$\beta, \text{кН/с/м}$	0,1	40	70	90
Усереднені первинні експериментальні значення E_{3K}	6,5241	6,5877	5,1694	4,0655
$E_{3K.f} = -0,027447 \cdot \beta + 6,959693$	<u>6,9569</u>	<u>5,8618</u>	<u>5,0384</u>	<u>4,4895</u>

У табл. 8 подано значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою

$$B_i = \frac{E_{3K.E.i}}{f(F_i) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (7)$$

де $E_{3K.E.i}$ – експериментальні значення енергії зубцевих коливань за даними табл. 1, яка відповідає i -тому дослід; $f(F_{CT.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід і виділені у табл. 7.

Таблиця 8. Значення коефіцієнта B_i для всіх дослідів планованого експерименту

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	$1,097965 \cdot 10^{-2}$	$5,792742 \cdot 10^{-3}$	$4,77053 \cdot 10^{-3}$	$5,357063 \cdot 10^{-3}$	$2,665083 \cdot 10^{-3}$	$1,012703 \cdot 10^{-2}$
№експ.	7	8	9	10	11	12
B	$5,635975 \cdot 10^{-3}$	$4,744917 \cdot 10^{-3}$	$4,917692 \cdot 10^{-3}$	$5,246426 \cdot 10^{-3}$	$7,373867 \cdot 10^{-3}$	$5,370569 \cdot 10^{-3}$
№експ.	13	14	15	16		
B	$2,569536 \cdot 10^{-3}$	$2,534686 \cdot 10^{-3}$	$4,019906 \cdot 10^{-3}$	$7,598184 \cdot 10^{-3}$		

У табл. 9 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$). Тут

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,34 \cdot 2,4275 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{17/16} = 3,352961 \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

де t_{KP} – критична точка розподілу Стьюдента, визначена за рівнем значущості $\alpha=0,2$ та числом степенів вільності $\kappa=N-1$; N – об’єм сукупності значень коефіцієнта B_i . Отже, інтервал виділення артефактів ($2,539538 \cdot 10^{-3}$; $9,245461 \cdot 10^{-3}$).

Таблиця 9. Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн. N	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$5,8925 \times 10^{-3}$	$5,892 \times 10^{-6}$	$2,4275 \times 10^{-3}$	1,34 $\alpha=0,2$	$1,097965 \times 10^{-2}$; $1,012703 \times 10^{-2}$; $2,534686 \times 10^{-3}$	$5,0817 \times 10^{-3}$	$2,1751 \times 10^{-6}$	$1,4748 \times 10^{-3}$

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Коефіцієнт варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma}{R_{CP}} \cdot 100\% = \frac{0,0014748}{0,0050817} \cdot 100\% = 29\%. \quad (9)$$

Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33%, тобто сукупність однорідна, середньої мінливості і середнє значення $5,0817 \cdot 10^{-3}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

Згідно проведених досліджень **рівняння багатofакторної емпіричної моделі множинної кореляції** визначається за експериментальними даними і буде мати вигляд

$$\begin{aligned} E_{ЗК} = & B_{CP} \cdot f(n_0) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 5,0817 \cdot 10^{-3} \times \\ & \times n / (0,2071328 \cdot n - 3,70773) \cdot (0,37547 \cdot F - 0,98405) \times \\ & \times (2,83211 \cdot 10^{-9} \cdot C^3 - 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 + 1,93546 \cdot 10^{-2} \cdot C - \\ & - 1,3680183) \times (-0,027447 \cdot \beta + 6,959693), H^2 \cdot M^2. \end{aligned} \quad (10)$$

В табл. 10 наведено значення енергії $E_{ЗКМ}$, визначені за рівнянням багатofакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту – $E_{ЗКЕ}$ з табл. 4.1. Відносні похибки знайдено за формулою

$$ВП\% = \frac{E_{ЗКЕ} - E_{ЗКМ}}{E_{ЗКЕ}} \cdot 100. \quad (11)$$

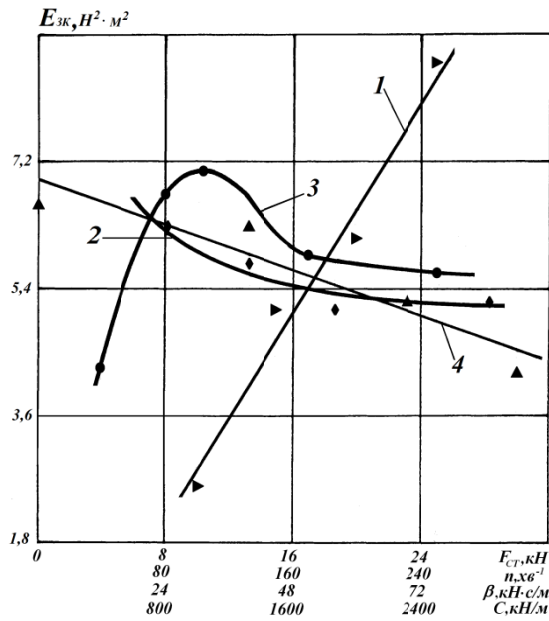
Таблиця 10. Експериментальні значення енергії $E_{зк}$ процесу зміни динамічного складника обертового моменту на долоті і значення, знайдені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції для пропластка твердістю 2050 МПа

№ досл.	Частота обертання n , хв^{-1}	Осьове статичне навантаження на долото $F_{ст}$, кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента β , кН·с/м	$E_{зкЕ}$, $\text{Н}^2 \cdot \text{м}^2$	$E_{зкМ}$, $\text{Н}^2 \cdot \text{м}^2$	ВП%
1	82	10	400	0,1	5,7027	Не визн.	-
2	82	15	2500	40	5,5026	4,8272	12,3
3	82	20	800	70	6,5937	7,0142	-6,4
4	82	25	1700	90	7,3089	6,9332	5,1
5	133	10	800	90	1,2571	1,397	-11,1
6	133	15	1700	70	7,7476	Не визн.	-
7	133	20	400	40	5,2472	4,7312	9,8
8	133	25	2500	0,1	8,7351	9,3551	-7,1
9	188	10	1700	40	2,4956	2,5788	-3,3
10	188	15	800	0,1	6,1534	5,9602	3,1
11	188	20	2500	90	6,5071	4,4844	31,1
12	188	25	400	70	5,2934	5,0087	5,4
13	285	10	2500	70	1,0431	Не визн.	-
14	285	15	400	90	1,1888	1,3834	-16,4
15	285	20	1700	0,1	5,5051	6,9592	-26,4
16	285	25	800	40	13,1053	8,7649	33,1

Примітка: Середнє значення відносної похибки без відбракованих значень $V_{CP,i}$ (1, 6 і 13 досліди) – $V_{CP}=10,7\%$.

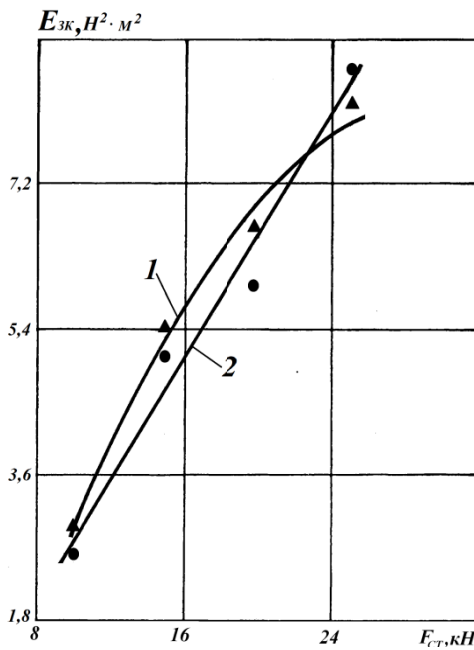
На рис. 2 наведено графіки частинних залежностей, побудовані за даними табл. 7.

За табл. 7 і рис. 2 найбільш впливовим фактором на величину енергії зубцевих коливань є осьове статичне навантаження, при збільшенні якого з 10 кН до 25 кН величина цієї енергії збільшилась 3,3 рази. Другим за впливовістю є жорсткість компонування бурильного інструмента, величина енергії від мінімального до максимального значень збільшилась в 1,63 рази. Для коефіцієнта демпфування в діапазоні 0,1-90 кН·с/м енергія зменшилась в 1,6 рази, а для частоти обертання n в діапазоні 82-285 хв^{-1} енергія зменшилась в 1,23 рази. В опублікованій статті [9] наведено результати досліджень проведених за факторним планом у пропластку пісковика воротищенської світи твердістю 1440 МПа. З урахуванням цих результатів на рис. 3-6 зображено графіки частинних емпіричних залежностей енергії зубцевих коливань від кожного зовнішнього чинника окремо для двох пропластків різної твердості пісковика воротищенської світи.



1(▲) – $E_{3K} = f(F_{CT})$; 2(◆) – $E_{3K} = f(n)$; 3(●) – $E_{3K} = f(C)$;
4(▲) – $E_{3K} = f(\beta)$

Рис. 2. Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту



1(▲) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рис. 3. Графіки частинних залежностей $E_{3K} = f(F_{CT})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різних за твердістю пропластків пісковика воротищенської світи

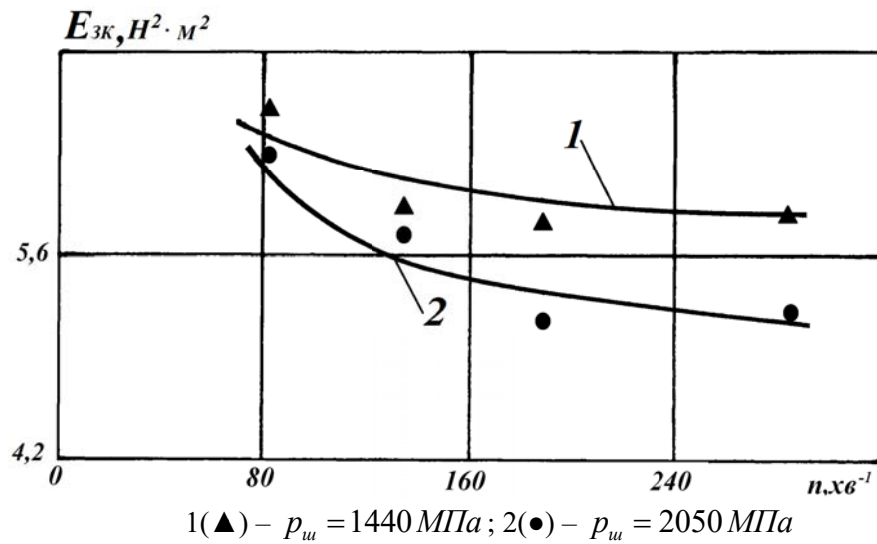


Рис. 4. Графіки частинних залежностей $E_{зк} = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різних за твердістю пропластків пісковика воротищенської світи

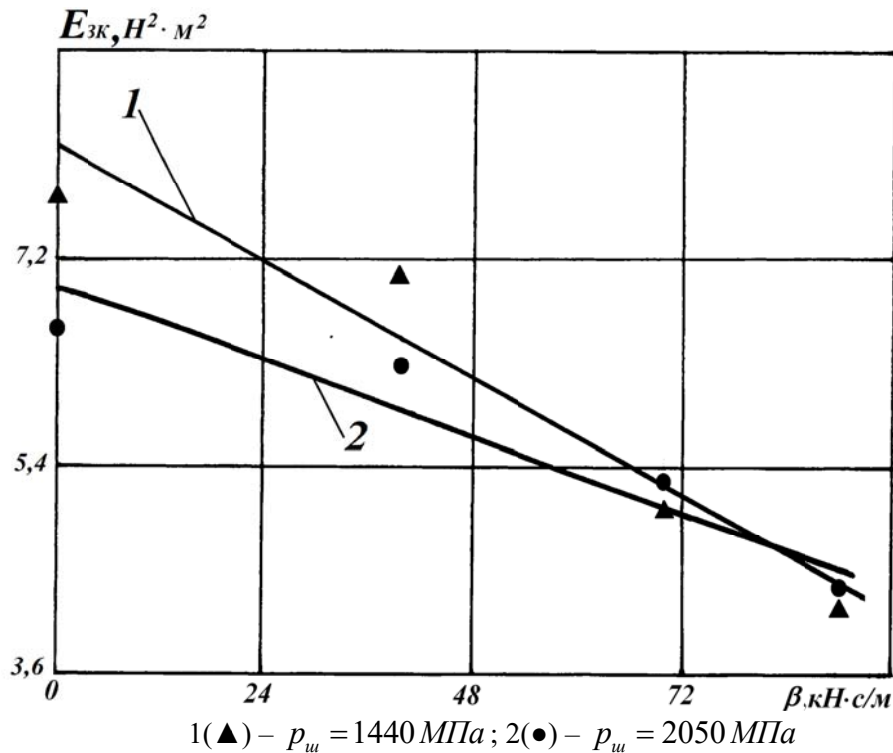


Рис. 5. Графіки частинних залежностей $E_{зк} = f(\beta)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різних за твердістю пропластків пісковика воротищенської світи

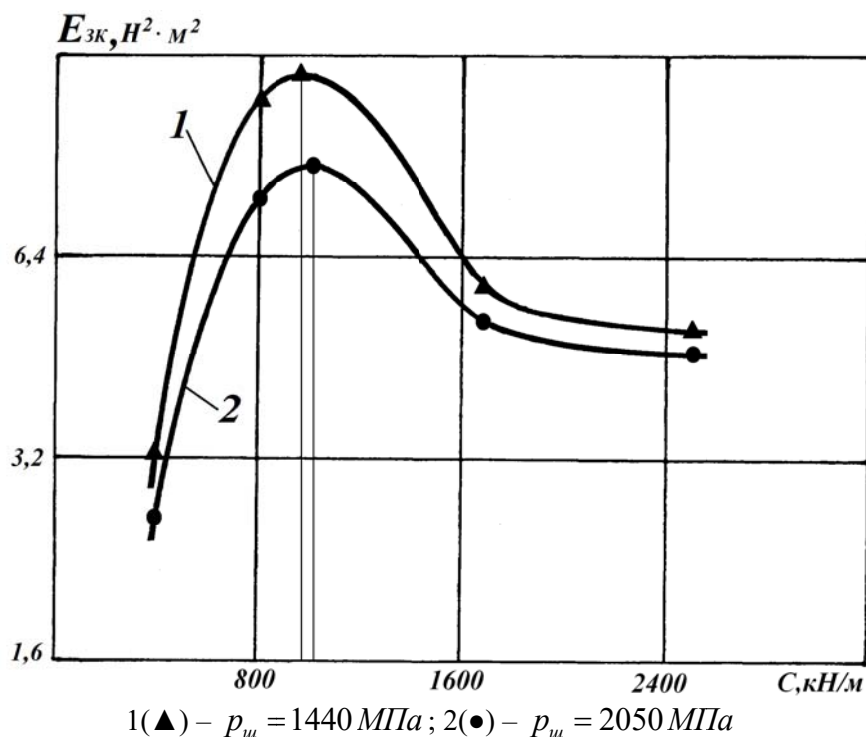


Рис. 6. Графіки частинних залежностей $E_{зк} = f(C)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різних за твердістю пропластків пісковика воротищенської світи

Дані табл. 7 і рис. 3-6 свідчать, що різниця між значеннями частинних залежностей, обчисленими за різними рівнями зовнішніх незалежних чинників, у багатьох варіантах є незначною. Однією з причин такої незначної різниці між значеннями, обчисленими за формулами, може бути випадкова похибка, яка виникає під час аналізу експериментальних даних. Методика врахування випадкової похибки при оцінюванні впливу незалежних зовнішніх чинників наступна:

1. Для всіх рівнів зовнішніх незалежних чинників обчислюється відносна похибка, яка визначається за формулою

$$ВП\% = \frac{E_{зк.f} - E_{зк.i}}{E_{зк.f}} \cdot 100, \text{ де } E_{зк.i} - \text{експериментальне значення енергії}$$

зубцевих коливань обертового моменту на долоті, а $E_{зк.f}$ – значення цієї енергії, обчислене за формулою частинної залежності, яке сприймається як дійсне значення енергії.

2. За значеннями похибки знаходимо інтервал невизначеності значення енергії $E_{зк.f}$ за формулою $E_{зк.f} \pm ВП\%$, якщо $ВП\% < ВП\%_{CP}$, і за формулою $E_{зк.f} \pm ВП\%$, якщо $ВП\% > ВП\%_{CP}$, де $ВП\%_{CP}$ – середнє значення відносної похибки.

3. Для прийнятої гіпотези впливу зовнішнього чинника на енергію зубцевих коливань порівнюються границі інтервалів невизначеності для двох суміжних рівнів цього фактору. Якщо ці границі перетинаються, то різниця між значеннями енергії пояснюється випадковою похибкою, у протилежному випадку ця зміна пояснюється впливом зовнішнього чинника.

В табл. 11 для частинних залежностей $E_{зк.f} = f(F_{СТ})$ наводяться значення відносної похибки та інтервали невизначеності значень $E_{зк.f}$.

Таблиця 11. Значення $ВП\%$ та інтервали невизначеності значень $E_{зк.f}$ для частинних залежностей $E_{зк.f} = f(F_{СТ})$

$F_{СТ}$, кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $E_{зк.i} - 1440$ МПа	2,8904	5,4378	6,609	8,2788
$E_{зк.f} = -10,198387 + 5,702286 \cdot \ln F_{СТ}$	2,9316	5,2437	6,8841	8,1566
Відносна похибка	1,405	-3,702	3,996	1,498
	Середнє значення $ВП\%_{ср} = 2,65$			
Інтервал невизначеності $E_{зк.f} \pm ВП\%$	2,8539 - 3,0093	5,1047 - 5,3827	6,7017 - 7,0665	7,9404 - 8,3727
Експериментальні значення $E_{зк.i} - 2050$ МПа	2,6246	5,1418 (2,65)	5,9633 (2,65)	8,617
$E_{зк.f} = 0,37547 \cdot F_{СТ} - 0,98405$	2,7706	4,648	6,5254	8,4027
Відносна похибка	5,27	-10,624	8,614	-2,550
	Середнє значення $ВП\%_{ср} = 6,76$			
Інтервал невизначеності $E_{зк.f} \pm ВП\%$	2,5833 - 2,9579	4,3338 - 4,9822	6,0843 - 6,9665	7,8347 - 8,9707

Порівняння інтервалів невизначеності значень здійснюється за попередньо прийнятою гіпотезою впливу того чи іншого чинника на енергію зубцевих коливань. Під час аналізу впливу осьового навантаження прийнято гіпотезу, що зі збільшенням навантаження енергія зубцевих коливань зростає. За такої гіпотези верхня границя інтервалу невизначеності при нижньому рівні навантаження повинна бути меншою за нижню границю інтервалу невизначеності для наступного рівня навантаження. Наприклад, при твердості породи 1440 МПа і рівня 10 кН верхня границя невизначеності – 3,0093, для наступного рівня 15 кН нижня границя – 5,1047. Отже, гіпотеза про збільшення енергії зубцевих коливань із зростанням осьового навантаження не відхиляється, оскільки $3,0093 < 5,1047$.

Для твердості породи 1440 МПа за такої умови одержано наступні нерівності: $3,0093 < 5,1047$; $5,3827 < 6,7017$; $7,0665 < 7,9404$. Для твердості породи 2050 МПа за такої умови аналогічні нерівності мають вигляд: $2,9579 < 4,3004$; $4,9956 < 6,0843$; $6,9665 < 7,8347$. Отже, гіпотеза про зрос-

тання енергії зубцевих коливань зі збільшенням осьового навантаження підтверджена для обох пропластків пісковика воротищенської світи.

Для підтвердження гіпотези про збільшення енергії зубцевих коливань зі зменшенням твердості породи для одного рівня осьового навантаження нижня границя інтервалу невизначеності значень енергії зубцевих коливань для породи твердістю 1440 МПа повинна бути більшою за верхню границю для породи твердістю 2050 МПа. Перший рівень – 10 кН: $2,8539 < 2,9579$, гіпотеза не підтверджується; другий рівень – 15 кН: $5,1047 > 4,9956$, гіпотеза підтверджується; третій рівень – 20 кН: $6,7017 < 6,9665$, гіпотеза не підтверджується; четвертий рівень – 25 кН: $7,9404 < 8,9707$, гіпотеза не підтверджується.

В табл. 12 для частинних залежностей $E_{зк.f} = f(n)$ наведено значення відносної похибки та інтервали невизначеності значень $E_{зк.f}$.

Таблиця 12. Значення $ВП\%$ та інтервали невизначеності значень $E_{зк.f}$ для частинних залежностей $E_{зк.f} = f(n)$

$n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $E_{зк.i} - 1440 \text{ МПа}$	6,6518	5,9356	5,0071	5,8963
$E_{зк.f} = n / (0,175717 \cdot n - 1,63173)$	6,4177	6,1181	5,9867	5,8826
Відносна похибка	-3,648	2,298	16,363	-0,233
	Середнє значення $ВП\%_{ср} = 5,64$			
Інтервал невизначеності $E_{зк.f} \pm ВП\%$	6,6518 - 6,1836	6,2587 - 5,9775	6,3243 - 5,6490 (5,64)	5,8963 - 5,8689
Експериментальні значення $E_{зк.i} - 2050 \text{ МПа}$	6,2770	5,7468	5,1124	5,2106
$E_T = n / (0,003401 \cdot n - 0,05683)$	6,1760	5,5786	5,3359	5,1514
Відносна похибка	-1,635	-3,0151	4,1886	-1,1492
	Середнє значення $ВП\%_{ср} = 2,497$			
Інтервал невизначеності $E_{зк.f} \pm ВП\%$	6,2770 - 6,075	5,7179 - 5,4393 (2,497)	5,4691 - 5,2027 (2,497)	5,2106 - 5,0922

Під час аналізу впливу частоти обертання прийнято гіпотезу, що зі збільшенням частоти обертання енергія зубцевих коливань зменшується. За такої гіпотези нижня границя (НГ) інтервалу невизначеності при нижньому рівні (НР) частоти обертання повинна бути більшою за верхню границю інтервалу невизначеності (ВГ) для наступного рівня частоти обертання.

Твердість породи 1440 МПа: інтервал 82-133 → НР=6,1836; ВР=6,2587 (6,1836 < 6,2587, впливу частоти обертання не виявлено); ін-

тервал 133-188→ $HP=5,9775$; $BP=6,3243$ ($5,9775 < 6,3243$, впливу частоти обертання не виявлено); інтервал 188-285→ $HP=5,649$; $BP=5,8963$ ($5,549 < 5,8963$, впливу частоти обертання не виявлено). Зі збільшенням частоти обертання від 82 до 285 $хв^{-1}$, тобто в інтервалі 82-285→ $HP=6,1836$; $BP=5,8963$ ($6,1836 < 6,2587$, впливу частоти обертання виявлено), причиною зменшення енергії зубцевих коливань в цьому інтервалі є зміна частоти обертання.

Твердість породи 2050 МПа: інтервал 82-133→ $HP=6,075$; $BP=5,7179$ ($6,075 > 5,7179$, впливу частоти обертання виявлено); інтервал 133-188→ $HP=5,4393$; $BP=5,4691$ ($5,4393 < 5,4691$, впливу частоти обертання не виявлено); інтервал 188-285→ $HP=5,2027$; $BP=5,2106$ ($5,2027 < 5,2106$, впливу частоти обертання не виявлено); інтервал 133 – 285→ $HP=5,4393$; $BP=5,2106$ ($5,4393 > 5,2106$, впливу частоти обертання виявлено).

За матеріалом, наведеним вище, вплив частоти обертання виявлено при збільшенні n від 82 до 133 $хв^{-1}$ та в інтервалі 133 – 285 $хв^{-1}$. При збільшенні n від 133 до 188 $хв^{-1}$ впливу частоти не виявлено. При подальшому збільшенні частоти енергія зубцевих коливань зменшується.

Впливу твердості породи не виявлено тільки для рівня 82 $хв^{-1}$ – $6,1836 < 6,2770$. Для рівня 133 $хв^{-1}$ – $5,9775 > 5,7179$; для рівня 188 $хв^{-1}$ – $5,649 > 5,4691$; для рівня 285 $хв^{-1}$ – $5,8689 > 5,2106$.

В табл. 13 для частинних залежностей $E_{зк.f} = f(\beta)$ наведено значення відносної похибки та інтервали невизначеності значень $E_{зк.f}$.

Таблиця 13. Значення $ВП\%$ та інтервали невизначеності значень $E_{зк.f}$ для частинних залежностей $E_{зк.f} = f(\beta)$

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $E_{зк.i}$ – 1440 МПа	7,6509	7,4005	5,045	4,1023
$E_{зк.f} = -1,04212 \cdot \beta + 470,8029$	8,1353	6,4718	5,2238	4,3918
Відносна похибка	5,954	-14,350	3,423	6,592
	Середнє значення $ВП\%_{ср} = 7,58$			
Інтервал невизначеності $E_{зк.f} \pm ВП\%$	8,6197 - 7,6509	6,9624 - 5,9812 (7,58)	5,4026 - 5,04498	4,6813 - 4,1023
Експериментальні значення $E_{зк.i}$ – 2050 МПа	6,5241	6,5877	5,1694	4,0655
$E_{зк.f} = -0,027447 \cdot \beta + 6,959693$	6,9569	5,8618	5,0384	4,4895
Відносна похибка	6,2212	-12,3836	-2,6	9,4442
	Середнє значення $ВП\%_{ср} = 7,662$			
Інтервал невизначеності $E_{зк.f} \pm ВП\%$	7,3897 - 6,5241	6,3109 - 5,4127 (7,662)	5,1694 - 4,9074	4,8335 - 4,1455 (7,662)

Під час аналізу впливу коефіцієнта демпфування прийнято гіпотезу, що зі збільшенням демпфування енергія зубцевих коливань зменшується. За такої гіпотези нижня границя (НГ) інтервалу невизначеності при нижньому рівні (НР) демпфування повинна бути більшою за верхню границю інтервалу невизначеності (ВГ) для наступного рівня коефіцієнта. Для породи твердістю 1440 МПа: інтервал 0,1-40 \rightarrow 7,6509 > 6,9624; інтервал 40-70 \rightarrow 5,9812 > 5,4026; інтервал 70-90 \rightarrow 5,04498 > 4,6813. Отже, збільшення коефіцієнта демпфування від 0,1 до 90 кН·с/м є причиною зменшення енергії зубцевих коливань. Для породи твердістю 2050 МПа: інтервал 0,1-40 \rightarrow 6,5241 > 6,3109; інтервал 40-70 \rightarrow 5,4127 > 5,1694; інтервал 70-90 \rightarrow 4,9074 > 4,8335. Висновок залишається таким же, тобто збільшення коефіцієнта демпфування від 0,1 до 90 кН·с/м є причиною зменшення енергії зубцевих коливань.

Вплив твердості породи виявлений тільки для рівня 0,1 – 7,6509 > 7,3897. Для рівнів 40, 70, 90 одержано наступні нерівності 5,9812 < 6,3109; 5,04498 < 5,1694; 4,1023 < 4,8335, тобто в інтервалі 40-90 кН·с/м впливу твердості породи на енергію зубцевих коливань не виявлено.

В табл. 14 для частинних залежностей $E_{зк.ф} = f(C)$ наведено значення відносної похибки та інтервали невизначеності значень $E_{зк.ф}$.

Під час аналізу впливу жорсткості компонування бурильного інструменту прийнято гіпотезу, що зі збільшенням жорсткості енергія зубцевих коливань зростає, досягаючи локального максимуму, а при подальшому збільшенні жорсткості – енергія зменшується. За такої гіпотези на ділянці зростання енергії верхня границя (ВГ) інтервалу невизначеності при нижньому рівні (НР) жорсткості повинна бути меншою за нижню границю інтервалу невизначеності (НГ) для наступного рівня коефіцієнта.

Для породи твердістю 1440 МПа: інтервал 400-800 \rightarrow 4,8592 < 7,647, прийнята гіпотеза підтверджується; інтервал 800-970 \rightarrow 7,6672 < 7,725, гіпотеза появи локального максимуму в цьому інтервалі підтверджується. Для породи твердістю 2050 МПа: інтервал 400-800 \rightarrow 4,3682 < 6,7774, прийнята гіпотеза підтверджується; інтервал 800-1045 \rightarrow 6,818 < 7,0308, гіпотеза появи локального максимуму в цьому інтервалі підтверджується.

Для значень жорсткості більших за локальний максимум прийнято гіпотеза про зменшення енергії зубцевих коливань при зростанні жорсткості. За такої гіпотези на ділянці верхня границя (ВГ) інтервалу невизначеності за наступного (за локальним максимумом) рівня жорсткості повинна бути меншою за нижню границю інтервалу невизначеності локального максимуму і т.д. Для породи твердістю 1440 МПа: інтервал 970-1700 \rightarrow 5,7643 < 7,725, прийнята гіпотеза підтверджується; інтервал 1700-2500 \rightarrow 5,9422 > 5,6365, прийнята гіпотеза не підтверджується. Для породи твердістю 2050 МПа: інтервал 1045-1700 \rightarrow

5,9364 < 7,0308, прийнята гіпотеза підтверджується; інтервал 1700-2500
 → 5,7227 < 5,7756, прийнята гіпотеза підтверджується.

Таблиця 14. Значення $ВП\%$ та інтервали невизначеності значень $E_{зк.f}$ для частинних залежностей $E_{зк.f} = f(C)$

C , кН/м	400	800	970	1700	2500
Експериментальні значення $E_{зк.i} - 1440$ МПа	4,8592	7,6672		5,7643	5,447
$E_{зк.f} = 4,01454 \cdot 10^{-9} \cdot C^3 -$ $-1,87 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 + 2,49448 \cdot 10^{-2} \cdot C -$ $-2,3861656$	4,8567	7,6571	7,8794	5,7004	5,8280
Відносна похибка	-0,051	-0,132	-	-1,121	6,537
	Середнє значення $ВП\%_{ср} = 1,960$				
Інтервал невизначеності $E_{зк.f} \pm ВП\%$	4,8592- 4,8542	7,6672- 7,6470	8,0338- 7,7250 (1,96)	5,7643- 5,6365	5,9422- 5,7138 (1,96)
C , кН/м	400	800	1045	1700	2500
Експериментальні значення $E_{зк.i} - 2050$ МПа	4,358	6,7774		5,7643	5,447
$E_{зк.f} = 2,83211 \cdot 10^{-9} \cdot C^3 -$ $-1,37 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 + 1,93546 \cdot 10^{-2} \cdot C -$ $-1,3680183$	4,3631	6,7977	7,1287	5,8560	5,6452
Відносна похибка	0,117	0,299	-	1,566	3,511
	Середнє значення $ВП\%_{ср} = 1,373$				
Інтервал невизначеності $E_{зк.f} \pm ВП\%$	4,3682- 4,358	6,8180- 6,7774	7,2266- 7,0308 (1,373)	5,9364- 5,7756 (1,373)	5,7227- 5,5677 (1,373)

Якщо твердість породи впливає на енергію зубцевих коливань, то нижня границя (НГ) інтервалу невизначеності для твердості породи 1440 МПа повинна бути більшою за верхню границю інтервалу невизначеності для твердості породи 2050 МПа. Зрозуміло, що порівнюються границі для одного і того ж рівня зовнішнього чинника.

За цією гіпотезою одержані наступні нерівності: 400 кН/м – 4,8542 > 4,3682; 800 кН/м – 7,6470 > 6,8180; локальний максимум – 7,7250 > 7,2266; 1700 кН/м – 5,6365 < 5,9364; 2500 кН/м – 5,7138 < 5,7227. Нерівності засвідчують, що вплив породи виявлений тільки на ділянці збільшення жорсткості від 400 кН/м до локального максимуму. При подальшому зростанні жорсткості впливу породи не виявлено.

Висновки:

1. Частинні емпіричні залежності $E_{зк} = f(F)$ свідчать, що осьове навантаження на долото є найбільш впливовим зовнішнім чинником на

енергію зубцевих коливань, яка збільшується при зростанні осьового навантаження на долото в кожному інтервалі його рівнів незалежно від твердості породи. Збільшення енергії цих коливань посилює силу ударів зубців шарошок об поверхню вибою, інтенсифікуючи таким чином процес руйнування породи.

2. За частинними залежностями $E_{зк} = f(n)$ енергія $E_{зк}$ зменшується. Інтенсивність цього зменшення незначна, в діапазоні 82-285 хв⁻¹ енергія зменшилась в 1,23 рази. Статистично значимими є зміна частоти обертання з 82 на 285 хв⁻¹ при бурінні в породі твердістю 1440 МПа, а також у двох інтервалах 82-133 хв⁻¹ та 133-285 хв⁻¹ при бурінні в породі твердістю 2050 МПа.

3. За частинними залежностями $E_{зк} = f(\beta)$ зі збільшенням коефіцієнта демпфування енергія коливань динамічної складової обертового моменту зменшується при переході від одного до іншого рівня коефіцієнта демпфування із-за безповоротної втрати її частини (внаслідок дисипації) в демпфуючому вузлі пристрою. При цьому віброзахист бурового обладнання покращується, а механічна швидкість буріння, яка є одною з основних техніко-економічних показників процесу руйнування породи, зменшується.

4. За залежностями $E_{зк} = f(C)$ спостерігається поява чітко вираженого локального максимуму, який виникає внаслідок зміни жорсткості компонування, тобто є статично значимим, а не наслідком випадкової похибки. Значення жорсткості, за якої зафіксовано цей максимум, знаходиться в тому ж інтервалі рівнів жорсткості (а саме 800-1700 кН/м), в якому зафіксовано мінімум енергоємності процесу руйнування породи [4].

Очевидно можна прогнозувати значення жорсткості бурильного інструменту, за якої енергоємність процесу руйнування гірської породи буде мінімальною. Практична реалізація цього твердження вимагає наступних кроків:

а) Зафіксувати процес зміни обертового моменту на столі ротора бурової при бурінні декількома (не менше трьох) компонуваннями низу бурильної колони, до складу яких входять пристрої зміни жорсткості різної конструкції. Одночасно слід фіксувати значення механічної швидкості буріння і визначити енергоємність процесу руйнування породи.

б) При наявності мінімуму енергоємності зафіксувати найближче до його величини значення жорсткості компонування низу бурильної колони (КНБК), за якої енергія зубцевих коливань досягає локального максимуму, і проводити подальший процес поглиблення свердловини тільки цією КНБК.

в) Оцінити ефективність використання КНБК із пристроєм зміни жорсткості, порівнюючи витрати потужності при бурінні із КНБК без пристрою зміни жорсткості і з ним.

5. За залежністю $E_{зк} = f(F_{СТ})$ вплив твердості породи на енергію зубцевих коливань зафіксований тільки для рівня 15кН. За залежністю $E_{зк} = f(n)$ вплив твердості породи на енергію зубцевих коливань зафіксований для трьох рівнів 133, 188 і 285хв⁻¹. За залежністю $E_{зк} = f(\beta)$ вплив твердості породи на енергію зубцевих коливань зафіксований для одного рівня 0,1кН·с/м. За залежністю $E_{зк} = f(C)$ вплив твердості породи на енергію зубцевих коливань зафіксований тільки для ділянки зростання енергії зубцевих коливань, тобто для трьох рівнів жорсткості, включаючи і жорсткість локального максимуму.

Ймовірність впливу твердості породи на енергію зубцевих коливань, враховуючи і рівень локального максимуму, становить $P=8/17=0,47$. Незначне значення ймовірності пояснюється спільним загальним впливом на енергію зубцевих коливань чотирьох незалежних чинників і твердості породи, але і це значення свідчить, що збільшення енергії зубцевих коливань при зменшенні твердості породи є статично значимим.

Література

- 1.Балицкий П.В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. – М.: Недра, 1975. – 293 с.
- 2.Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 464 с.
- 3.Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1979. – 239 с.
- 4.Стійкість і коливання бурильної колони / В.М. Мойсишин, Б.Д. Борисевич, Ю.Л. Гаврилів, С.А. Зінченко. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2013. – 590 с.
5. Борисевич Б.Д. Інформаційна модель процесу зміни осьової динамічної сили при бурінні компоновкою різної жорсткості / Б.Д. Борисевич, М.В. Лисканич, Ю.Я. Сітко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2001. – Вип.37 (Том 6). – С. 158-165.
6. Мойсишин В.М. Статистичний аналіз результатів стендових експериментальних досліджень зміни осьової сили при бурінні долотом Ш 93С / В.М. Мойсишин, О.М. Лисканич, А.І. Масьовський // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2015. – №1(29). – С.228-245.
7. Мойсишин В.М. Аналіз результатів стендових досліджень осьової динамічної сили при бурінні тришарошковими долотами / В.М. Мойсишин, О.М. Лисканич, Р.А. Жовнірук, Є.П. Майкович // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2019. – №1(53). – С.81-93.
8. Мойсишин В.М. Методика обробки результатів досліджень, проведених за планом факторного експерименту / В.М. Мойсишин, А.П. Івасютин, І.І. Возний // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2022. – №1(62). – С.81-93.

9. Мойсишин В.М. Багатофакторні емпіричні моделі енергії низькочастотних і зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті / В.М. Мойсишин, А.П. Івасютин, Л.В. Борисевич, О.М. Витвицька // Металофізика і новітні технології. – Київ, 2023. – Т.45, №10. – С.1205-1235.

Стаття надійшла до редакційної колегії 08.11.2024 р.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF ENERGY OF GEARING FLUCTUATION OF THE DYNAMIC COMPONENT OF THE TORQUE ON THE BIT

V. M. Moisyshyn, A. P. Ivasiutyn

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
15, Karpatska Street, Ivano-Frankivsk, 76019;
tel. +380 (342) 71-72-31; e-mail: math@nung.edu.ua*

The purpose of the proposed article is to establish, based on the results of bench-scale experimental studies, the influence of rock hardness and external independent factors, which include the axial static load F_{CT} , bit rotation frequency n , stiffness C and damping coefficient β of the drilling tool, on the energy of toothed oscillations of the E_{3K} dynamic component of the torque on chisels. Bench research was conducted according to the method of rational planning of experiments, according to which the combination of the listed independent factors occurs only once. The planned factorial experiment was carried out in sandstone blocks of the Vorotyshchensk world, composed of two interlayers with a hardness of 1440 and 2050 MPa. Constant factors during drilling in bench conditions were the type and diameter of the three-layer bit and the consumption of flushing fluid (water).

According to the results of the research carried out in the layer with a hardness of 2050 MPa, the equation of the multifactorial empirical model of the energy of tooth oscillations of the dynamic component of the torque on the bit was constructed, the influence of external independent factors on this energy were analyzed, and the main patterns of changes in partial dependencies $E_{3K} = f(F_{CT})$, $E_{3K} = f(n)$, $E_{3K} = f(C)$ і $E_{3K} = f(\beta)$ on the rock hardness were established.

We note that the results of bench research in a layer with a hardness of 1440 MPa were previously published by us in the article "Multifactorial empirical models of low-frequency and toothed oscillations of the dynamic component of the torque on the bit".

Keywords: *planned experiment, variable factor, rigidity of the drilling tool, rock hardness, spectral density, energy of a random process, empirical model, energy of toothed oscillations of the dynamic component of the torque on the bit.*