

Буріння свердловин

УДК 622.245

DOI: 10.31471/2304-7399-2021-16(60)-96-114

БАГАТОФАКТОРНІ ЕМПІРИЧНІ МОДЕЛІ СТАНДАРТІВ ВІДНОСНОГО СКЛАДНИКА КРУТНОГО МОМЕНТУ НА ДОЛОТІ

В. М. Мойсишин, Р. А. Жовнірук, І. І. Возний

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380(342)71-72-31; e-mail: math@nung.edu.ua*

З метою встановлення багатофакторної емпіричної моделі стандарту відносного складника крутного моменту на долоті методом раціонального планування проведено експериментальні дослідження на стенді Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Згідно цього методу комбінація змінних чинників, до яких відносяться осьове статичне навантаження $F_{СТ}$, частота обертання долота n , жорсткість C та коефіцієнт демпфування β бурильного інструмента, зустрічається тільки один раз. Стандарт подано добутком окремих залежностей від змінних чинників $\sigma_T = V_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{СТ}) \cdot f(\beta) \cdot f(C)$, де V_{CP} – середнє значення числового коефіцієнта для множини усіх дослідів. Постійними факторами під час проведення планованого експерименту були тип і діаметр тришарошкового долота та витрата промивальної рідини (води). Планований факторний експеримент було проведено у блоках пісковика воротищенської світи. За його результатами одержано рівняння багатофакторних емпіричних моделей стандарту відносного складника крутного моменту на долоті для пропластків твердістю 1440 МПа та 2050 МПа.

Ключові слова: *відносний складник крутного моменту на долоті, метод раціонального планування експериментів, змінний чинник, емпірична модель, енергія випадкового процесу, стандарт.*

Вступ.

Обертальний рух бурильної колони розкладемо на два складники – переносний і відносний [1, 2]. Переносний складник – це усталений обертальний рух з кутовою швидкістю ω_0 . Кут повороту $\varphi^e(x, t)$ x -перерізу компоновання в момент часу t подамо сумою двох доданків

$$\varphi^e(x, t) = \omega_0 t + \varphi^0(x). \quad (1)$$

Наявність другого доданка засвідчує закручування колони силами опору на кут $\varphi^0(x)$. Відносний складник $\varphi^r(x, t)$ відповідає за крутильні коливання x -перерізу бурильної колони і залежить від величини заглиблення зубців долота в гірську породу. Отже, сумарний кут повороту x -перерізу труб $\varphi(x, t)$ складає

$$\varphi(x, t) = \varphi^e(x, t) + \varphi^r(x, t).$$

Враховуючи зв'язки між кутами повороту і крутними моментами у відносному і переносному рухах бурильної колони

$$\begin{aligned} T^e(x, t) &= -jG \frac{\partial \varphi^e(x, t)}{\partial t}, \\ T^r(x, t) &= -jG \frac{\partial \varphi^r(x, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

значення сумарного крутного моменту $T(x, t)$ в x -перерізі труб подано сумою його відносного та переносного складників

$$T(x, t) = T^e(x) + T^r(x, t), \quad (3)$$

де j – полярний момент інерції поперечного перерізу труб, G – модуль зсуву, $T^e(x)$ – переносний крутний момент, $T^r(x, t)$ – відносний крутний момент.

В подальшому будемо говорити про крутний момент на долоті T_δ , тобто момент при $x = 0$, який необхідний для обертання долота в процесі руйнування породи на вибої свердловини.

Зміна миттєвих значень крутного моменту на долоті в часі $T_{\delta i}$ представляє собою випадковий процес [2]. Аналіз параметрів вибірок миттєвих значень обертового моменту, проведений авторами статті, встановив що процес їх зміни відповідає нормальному стаціонарному процесу. Значення $T_{\delta i}$ можна представити у вигляді – $T_{\delta i} = T_\delta^e \pm T_{\delta, \text{дин.}i}$ де T_δ^e – середнє значення (переносний складник) моменту на долоті, $T_{\delta, \text{дин.}i}$ – динамічний (відносний) складник моменту на долоті, який виникає в результаті зміни осьового навантаження на долото, різної комбінації фаз роботи елементів озброєння і нерівномірності руйнування вибою свердловини. Автори основних стендових і експериментальних досліджень впливу параметрів режиму буріння та характеристик гірської породи на динаміку бурильної колони вивчали тільки процес зміни середнього значення крутного моменту [3-7]. Дослідження процесу зміни динамічного складника моменту на долоті, практично, не проводились. Нормальний закон розподілу миттєвих значень крутного моменту двопараметричний, основні параметри – математичне сподівання

(середнє значення) та дисперсія вибірки. Для сцентрованого випадкового нормального закону математичне сподівання (середнє значення) рівне нулю і тому основним параметром є дисперсія вибірок миттєвих значень крутного моменту. Згідно [2] зв'язок між дисперсією вибірок сцентрованих миттєвих значень крутного моменту D_T та середнім значенням потужності процесу зміни крутного моменту на долоті \bar{P}^u описується рівнянням $D_T = Z^2 \frac{\hat{n}R}{n-1} \bar{P}^u$. де Z – коефіцієнт переходу, який відзначається за результатами тарування давача; \hat{n} – об'єм вибірки; R – вхідний опір вимірювального тракту, Ом. Оскільки $Z^2 \frac{\hat{n}R}{n-1} = const$, то закономірності зміни потужності процесу відповідають закономірностям зміни дисперсії.

Враховуючи вищесказане, значний інтерес представляють собою залежності між дисперсією процесу зміни крутного моменту, яка для сцентрованого нормального стаціонарного процесу є основною характеристикою динамічного складника моменту на долоті, та режимними і конструктивними чинниками процесу руйнування гірської породи на вибої свердловини. До конструктивних чинників віднесено жорсткість та коефіцієнт демпфування пристрою зміни жорсткості та демпфування, який входить до компонування бурильного інструменту, а до режимних чинників – осьове статичне навантаження та частоту обертання долота.

Одним із методів встановлення таких залежностей є стендові експериментальні дослідження. Під час їх проведення режим буріння і параметри компонування бурильного інструменту мають фіксовані значення з можливістю їх зміни у певних межах. За досліджуваній параметр вибрано стандарт (середнє квадратичне відхилення) σ_T , оскільки його розмірність співпадає з розмірністю відносного складника крутного моменту на долоті.

Постановка задачі дослідження

Метою роботи є встановлення за результатами експериментальних досліджень, проведених на буровому стенді ІФНТУНГ [2], багатофакторної емпіричної моделі стандарту σ_T процесу зміни відносного (динамічного) складника крутного моменту на долоті.

Під час проведення цих досліджень для зміни параметрів бурильного інструменту використовувались пристрої, конструкція яких дозволяла змінювати значення жорсткості та коефіцієнта демпфування пружного елемента незалежно одне від одного. Зміна жорсткості в інтервалі 400 – 2500 кН/м здійснювалась шляхом використання витих пружин.

жин стиску різних розмірів у пружному елементі пристрою. Коефіцієнт демпфування під час використання цих пружин практично незмінний.

Для зміни коефіцієнта демпфування компонування бурильного інструмента було використано гідравлічні поглиначі коливань KB3-ЛІИЖТ. Використання таких поглиначів з різною кількістю клапанних дросельних отворів змінювало коефіцієнт демпфування в інтервалі 40 – 90 кН·с/м.

Дослідження проводили у блоках пісковики воротищенської світи, складених із двох пропластків, твердість яких за штампом $R_{ш}$ відповідно складала 1440 та 2050 МПа.

Матрицю планованого експерименту зі значеннями середнього квадратичного відхилення σ_T процесу зміни динамічного складника крутного моменту подано в табл.1.

Таблиця 1. План чотирифакторного експерименту з результатами досліджень

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження $F_{СТ}$, кН	Жорсткість бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента β , кН·с/м	СКВ σ_T	
					$R_{ш}$, 1440 МПа	$R_{ш}$, 2050 МПа
1(17)	82	10	400	0,1	19,38	16,53
2(18)	82	15	2500	40	19,01	14,43
3(19)	82	20	800	70	19,66	18,53
4(20)	82	25	1700	90	25,56	25,34
5(21)	133	10	800	90	14,69	12,49
6(22)	133	15	1700	70	20,74	16,84
7(23)	133	20	400	40	21,41	16,67
8(24)	133	25	2500	0,1	24,11	23,47
9(25)	188	10	1700	40	13,73	10,4
10(26)	188	15	800	0,1	18,82	14,32
11(27)	188	20	2500	90	21,34	18,48
12(28)	188	25	400	70	25,46	22,44
13(29)	285	10	2500	70	9,18	10,26
14(30)	285	15	400	90	13,98	14,44
15(31)	285	20	1700	0,1	23,57	20,37
16(32)	285	25	800	40	27,48	19,74

Емпірична модель стандарту σ_T для пропластка твердістю 1440 МПа

У табл. 2,3 подано результати з визначення стандарту σ_T експерименту, усереднені відповідно за режимними параметрами $F_{СТ}$, n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Таблиця 2. Результати експерименту з визначення σ_T усереднені за значеннями режимних параметрів

$n_o, \text{хв}^{-1}$ / $F_{CT}, \text{кН}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	19,38	14,69	13,73	9,18	56,98	14,24
15	19,01	20,74	18,82	13,98	72,55	18,14
20	19,66	21,41	21,34	23,57	85,98	21,50
25	25,56	24,11	25,46	27,48	102,61	25,65
Сума	83,61	80,95	79,35	74,21	318,12	79,53
Середнє	20,90	20,24	19,84	18,55	79,53	19,88

Таблиця 3. Результати експерименту з визначення σ_T усереднені за значеннями параметрів бурильного інструменту

$C, \text{кН/м}$ / $\beta, \text{кН-с/м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	19,38	18,82	23,57	24,11	85,88	21,47
40	21,41	27,48	13,73	19,01	81,63	20,41
70	25,46	19,66	20,74	9,18	75,04	18,76
90	13,98	14,69	25,56	21,34	75,57	18,89
Сума	80,23	80,65	83,6	73,64	318,12	79,54
Середнє	20,06	20,16	20,9	18,42	79,54	19,88

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між середнім квадратичним відхиленням σ_T і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 4.

У табл. 4 позначено: $P=1-\alpha$ – ймовірність існування кореляційної залежності між змінними факторами та величиною σ_T , σ_0 – величина основної похибки у разі заміни експериментальних даних відповідними емпіричними залежностями.

За табл. 4 ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між σ_T та зовнішніми незалежними змінними факторами (чинниками) більша за 0,95 і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}_T$, де $\bar{\sigma}_T$ – середнє значення вибірки, також виконується. Для такого варіанту існування частинних емпіричних залежностей нейтралізація найбільш впливових зовнішніх чинників за методами Протодьяконова або Яремійчука-Райхерта не потрібна.

Таблиця 4. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних ($p_{ш}=1440$ МПа)

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}_T$
$n, \text{хв}^{-1}$	$\sigma_T = 21,832 - 1,133843 \cdot 10^{-2} \cdot n$	0,9951 0,99>P>0,998	0,098<2 (20,4)
$F_{CT}, \text{кН}$	$\sigma_T = 6,725 + 0,7518003 \cdot F$	0,9993 0,999>P>1	0,19<2 (10,5)
$C, \text{кН/м}$	$\sigma_T = 20,8125519 - 0,0033657 \cdot C + 0,0000042 \cdot C^2 - 1,30827 \cdot 10^{-9} \cdot C^3$	P=1	$2,45 \cdot 10^{-14} < 2$
$\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$\sigma_T = 1 / 0,04648 + 7,939979 \cdot 10^{-5} \cdot \beta$	0,9626 0,95>P>0,98	0,34<2 (5,9)

У табл. 5 подано первинні експериментальні значення σ_T планового експерименту і значення, підібрані за частинним емпіричними залежностями (див.табл.4).

Таблиця 5. Первинні експериментальні значення σ_T планового експерименту і значення, підібрані за частинним емпіричними залежностями (див.табл.4).

$n_0, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення σ_T	20,9	20,24	19,84	18,55
$\sigma_T = 21,832 - 1,133843 \cdot 10^{-2} \cdot n$	20,9	20,32	19,7	18,6
$F_{CT}, \text{кН}$	10	15	20	25
Експериментальні значення σ_T	14,24	18,14	21,5	25,65
$\sigma_T = 6,725 + 0,7518003 \cdot F$	14,24	18,0	21,76	25,52
$C, \text{кН/м}$	400	800	1700	2500
Експериментальні значення σ_T	20,06	20,16	20,9	18,42
$\sigma_T = 20,8125519 - 0,0033657 \cdot C + 0,0000042 \cdot C^2 - 1,30827 \cdot 10^{-9} \cdot C^3$	20,06	20,16	20,8	18,42
$\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	0,1	40	70	90
Експериментальні значення σ_T	21,47	20,41	18,76	18,89
$\sigma_T = 1 / 0,04648 + 7,939979 \cdot 10^{-5} \cdot \beta$	21,51	20,14	19,22	18,65

Отже, на основі експериментальних даних одержано наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між середнім квадратичним відхиленням дисперсії процесу зміни динамічного складника крутного моменту та змінними чинниками експерименту (рівняння ба-

гатофакторної емпіричної моделі стандарту σ_T для пропластку піско-вика воротищенської світи твердістю 1440 МПа):

$$\begin{aligned} \sigma_T &= B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = \\ &= 1,2891 \cdot 10^{-4} \cdot (21,832 - 1,133843 \cdot 10^{-2} \cdot n) \times (6,725 + 0,7518003 \cdot F) \times \\ &\times (20,8125519 - 0,0033657 \cdot C + 0,0000042 \cdot C^2 - 1,30827 \cdot 10^{-9} \cdot C^3) \times \\ &\times (1/0,04648 + 7,939979 \cdot 10^{-5} \cdot \beta), H \cdot m. \end{aligned} \quad (4)$$

У табл. 6 наведені значення коефіцієнта B , визначені за формулою:

$$B_i = \frac{\sigma_{T,i}}{f(F_{CT,i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (5)$$

де $\sigma_{T,i}$ – значення середнього квадратичного відхилення за даними табл. 1, яке 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, величини яких відповідають умовам i -того дослід (див. табл. 5).

Таблиця 6. Значення коефіцієнта B_i для дослідів 1–16 планованого експерименту ($p_{III}=1440$ МПа)

№ експ.	1	2	3	4	5	6
B	$1,5091 \cdot 10^{-4}$	$1,3621 \cdot 10^{-4}$	$1,1157 \cdot 10^{-4}$	$1,2294 \cdot 10^{-4}$	$1,3503 \cdot 10^{-4}$	$1,4116 \cdot 10^{-4}$
№ експ.	7	8	9	10	11	12
B	$1,1985 \cdot 10^{-4}$	$1,1734 \cdot 10^{-4}$	$1,1628 \cdot 10^{-4}$	$1,2239 \cdot 10^{-4}$	$1,4491 \cdot 10^{-4}$	$1,3135 \cdot 10^{-4}$
№ експ.	13	14	15	16		
B	$0,9899 \cdot 10^{-4}$	$1,1161 \cdot 10^{-4}$	$1,2954 \cdot 10^{-4}$	$1,4258 \cdot 10^{-4}$		

У табл. 7 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$). Величина Δ складає

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,143 \cdot 10^{-4} \sqrt{17/16} = 0,2580 \cdot 10^{-4}, \quad (6)$$

де t_{KP} – критична точка розподілу Стьюдента, визначена за рівнем значущості $\alpha=0,1$ та числом степенів вільності $\kappa=N-1$; N – об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i . Отже, інтервал виділення артефактів ($1,0124 \cdot 10^{-4}$; $1,5284 \cdot 10^{-4}$).

Таблиця 7. Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	t_{KP}	Артефакти	B'_{cp}	D'_B	σ'_B
$1,2704 \cdot 10^{-4}$	$2,0449 \cdot 10^{-10}$	$0,143 \cdot 10^{-4}$	1,75 $\alpha=0,1$	0,9899	$1,2891 \cdot 10^{-4}$	$1,5901 \cdot 10^{-10}$	$0,1261 \cdot 10^{-4}$

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

Величина коефіцієнта варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma}{R_{CP}} \cdot 100\% = \frac{0,1261}{1,2891} \cdot 100\% = 9,8\%. \quad (7)$$

Це значення знаходиться в інтервалі до 10%, тобто сукупність однорідна малої мінливості і середнє значення $1,2891 \cdot 10^{-4}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності [8].

В табл. 8 наведено значення середнього квадратичного відхилення процесу зміни крутного моменту, визначені за рівнянням багатofакторної моделі (4) – σ_{MM} , та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними даними дослідів – $\sigma_{ЕКСП}$, наведеними в табл. 1, що визначались за формулою

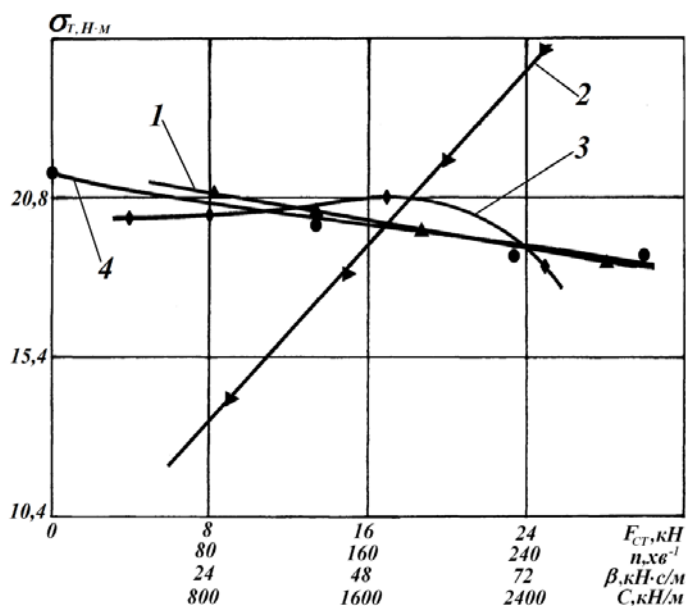
$$ВП\% = \frac{\sigma_{ЕКСП} - \sigma_{MM}}{\sigma_{ЕКСП}} \cdot 100 \quad (8)$$

Таблиця 8. Експериментальні значення середнього квадратичного відхилення процесу зміни крутного моменту і значення визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції ($p_{ш}=1440$ МПа)

№ досл.	Частота обертання n , $хв^{-1}$	Осьове статичне навантаження F_{CT} , кН	Жорсткість бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента β , кН·с/м	СКВ експ. $\sigma_{ЕКСП}$	СКВ за мат. мод. σ_{MM}	ВП, %
1	82	10	400	0,1	19,38	16,55	14,6
2	82	15	2500	40	19,01	17,99	5,4
3	82	20	800	70	19,66	22,72	-15,6
4	82	25	1700	90	25,56	26,8	-4,8
5	133	10	800	90	14,69	14,02	4,6
6	133	15	1700	70	20,74	18,94	8,7
7	133	20	400	40	21,41	23,03	-7,6
8	133	25	2500	0,1	24,11	26,49	-9,9
9	188	10	1700	40	13,73	15,22	-10,9
10	188	15	800	0,1	18,82	19,82	-5,3
11	188	20	2500	90	21,34	18,98	11,1
12	188	25	400	70	25,46	24,99	1,8
13	285	10	2500	70	9,18	12,09	-31,7
14	285	15	400	90	13,98	16,15	-15,5
15	285	20	1700	0,1	23,57	23,46	0,5
16	285	25	800	40	27,48	24,85	9,6

Статистична характеристика сукупності значень відносної похибки без відбракованих результатів 13-го досліду: середнє значення – 8,4.

Графіки частинних емпіричних залежностей $\sigma_T = f(n)$, $\sigma_T = f(F_{CT})$, $\sigma_T = f(C)$, $\sigma_T = f(\beta)$ за даними табл. 5 для пропластка твердістю 1440 МПа зображено на рис.1.



$$1(\blacktriangle) - \sigma_T = f(n); 2(\blacktriangleright) - \sigma_T = f(F_{CT}); 3(\blacklozenge) - \sigma_T = f(C); \\ 4(\bullet) - \sigma_T = f(\beta).$$

Рис. 1. Графіки частинних залежностей, одержані методом планованого експерименту ($p_{ш}=1440$ МПа)

Емпірична модель стандарту σ_T для пропластка твердістю 2050 МПа

У табл. 9, 10 подано результати з визначення стандарту σ_T експерименту, усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β . Мова йде про досліді 17 – 32 для пісковику воротищенської світи твердістю 2050 МПа.

Таблиця 9. Результати експерименту з визначення $\sigma_{НК}$ усереднені за значеннями режимних параметрів

$n_\theta, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
$F_{CT}, \text{кН}$						
10	16,53	12,49	10,4	10,26	49,68	12,42
15	14,43	16,84	14,32	14,44	60,03	15,01
20	18,53	16,67	18,48	20,37	74,05	18,51
25	25,34	23,47	22,44	19,74	90,99	22,75
Сума	74,83	69,47	65,64	64,81	274,75	68,69
Середнє	18,71	17,37	16,41	16,2	68,69	17,17

Таблиця 10. Результати експерименту з визначення $\sigma_{НК}$ усереднені за значеннями параметрів бурового інструменту

$\beta, \text{кН}\cdot\text{с}/\text{м}$ \diagdown $C, \text{кН}/\text{м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	16,53	14,32	20,37	23,47	74,69	18,67
40	16,67	19,74	10,4	14,43	61,24	15,31
70	22,44	18,53	16,84	10,26	68,07	17,02
90	14,44	12,49	25,34	18,48	70,75	17,69
Сума	70,08	65,08	72,95	66,64	274,75	68,69
Середнє	17,52	16,27	18,24	16,66	68,69	17,17

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між середнім квадратичним відхиленням σ_T і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 11.

Таблиця 11. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних ($p_{ш}=2050 \text{ МПа}$)

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}_T$
$n, \text{хв}^{-1}$	$\sigma_T = n / 0,065293 \cdot n - 0,959192$	0,9999 0,999>P>1	0,14<1,72 (12,3)
$F_{ст}, \text{кН}$	$\sigma_T = 10,498 + 1,978314 \cdot 10^{-2} \cdot F^2$	0,9993 0,999>P>1	0,08<1,72 (21,5)
$C, \text{кН}/\text{м}$	$\sigma_T = 21,7714164 - 0,0153764 \cdot C + 1,31 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 - 3,11283 \cdot 10^{-9} \cdot C^3$	P=1	$3,32 \cdot 10^{-14} < 1,72$
$\beta, \text{кН}\cdot\text{с}/\text{м}$	$\sigma_T = 18,694 - 0,2431 \cdot \beta + 5,0699 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 - 2,77 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3$	P=1	$1,49 \cdot 10^{-13} < 1,72$

За табл. 11 ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між σ_T та зовнішніми незалежними змінними факторами (чинниками) більша за 0,95 і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}_T$ також виконується.

Для такого варіанту існування частинних емпіричних залежностей нейтралізація найбільш впливових зовнішніх чинників за методами Протодьяконова або Яремійчука-Райхерта не потрібна.

У табл. 12 подано первинні експериментальні значення σ_T планового експерименту і значення підібрані за частинним емпіричними залежностями (див.табл.11).

Таблиця 12. Первинні експериментальні значення σ_T планового експерименту і значення підібрані за частинними емпіричними залежностями (див.табл.11).

$n_{\partial}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення σ_T	20,9	20,24	19,84	18,55
$\sigma_T = 21,832 - 1,133843 \cdot 10^{-2} \cdot n$	20,9	20,32	19,7	18,6
$F_{CT}, \text{кН}$	10	15	20	25
Експериментальні значення σ_T	14,24	18,14	21,5	25,65
$\sigma_T = 6,725 + 0,7518003 \cdot F$	14,24	18,0	21,76	25,52
$C, \text{кН/м}$	400	800	1700	2500
Експериментальні значення σ_T	20,06	20,16	20,9	18,42
$\sigma_T = 20,8125519 - 0,0033657 \cdot C + 0,0000042 \cdot C^2 - 1,30827 \cdot 10^{-9} \cdot C^3$	20,06	20,16	20,8	18,42
$\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	0,1	40	70	90
Експериментальні значення σ_T	21,47	20,41	18,76	18,89
$\sigma_T = 1/0,04648 + 7,939979 \cdot 10^{-5} \cdot \beta$	21,51	20,14	19,22	18,65

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між середнім квадратичним відхиленням дисперсії процесу зміни динамічного складника крутного моменту та змінними чинниками експерименту (рівняння багатофакторної емпіричної моделі стандарту σ_T для пропластка пісковика воротищенської світи твердістю 2050 МПа):

$$\sigma_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 1,9878 \cdot 10^{-4} \cdot (n/0,065293 \cdot n - 0,959192) \times (10,498 + 1,978314 \cdot 10^{-2} \cdot F^2) \times (21,7714164 - 0,0153764 \cdot C + 1,31 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 - 3,11283 \cdot 10^{-9} \cdot C^3) \times (18,694 - 0,2431 \cdot \beta + 5,0699 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 - 2,77 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3), \text{Н}\cdot\text{м}. \quad (9)$$

У табл. 15 наведено значення коефіцієнта B , визначені за формулою:

$$B_i = \frac{\sigma_{T,i}}{f(F_i) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (10)$$

де $\sigma_{T,i}$ – значення середнього квадратичного відхилення процесу зміни крутного моменту за даними табл. 1, яке 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, величини яких відповідають умовам i -того дослід (див. табл. 12).

Таблиця 13. Значення коефіцієнта B_i для дослідів 17–32 планованого експерименту ($p_{ш}=2050$ МПа)

№експ.	17	18	19	20	21	22
B	$2,17 \cdot 10^{-4}$	$2,0527 \cdot 10^{-4}$	$1,949 \cdot 10^{-4}$	$1,8451 \cdot 10^{-4}$	$2,0205 \cdot 10^{-4}$	$2,1909 \cdot 10^{-4}$
№експ.	23	24	25	26	27	28
B	$1,9604 \cdot 10^{-4}$	$1,9272 \cdot 10^{-4}$	$1,8006 \cdot 10^{-4}$	$1,8997 \cdot 10^{-4}$	$2,0616 \cdot 10^{-4}$	$1,9819 \cdot 10^{-4}$
№експ.	29	30	31	32		
B	$1,8519 \cdot 10^{-4}$	$1,9298 \cdot 10^{-4}$	$2,0163 \cdot 10^{-4}$	$2,1479 \cdot 10^{-4}$		

У табл. 14 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$).

Величина Δ складає

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,1162 \cdot 10^{-4} \sqrt{17/16} = 0,2096 \cdot 10^{-4}. \quad (11)$$

Отже, інтервал виділення артефактів ($1,7782 \cdot 10^{-4}$; $2,1974 \cdot 10^{-4}$).

Таблиця 14. Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	t_{KP}	Артефакти	B'_{cp}	D'_B	σ'_B
$1,9878 \cdot 10^{-4}$	$0,0135 \cdot 10^{-8}$	$0,1162 \cdot 10^{-4}$	1,75 $\alpha=0,1$	відсутні	$1,9878 \cdot 10^{-4}$	$0,0135 \cdot 10^{-8}$	$0,1162 \cdot 10^{-4}$

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

Величина коефіцієнта варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma}{R_{CP}} \cdot 100\% = \frac{0,1162}{1,9878} \cdot 100\% = 5,8\%. \quad (12)$$

Це значення знаходиться в інтервалі до 10%, тобто сукупність однорідна малої мінливості і середнє значення $1,9878 \cdot 10^{-4}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності [7].

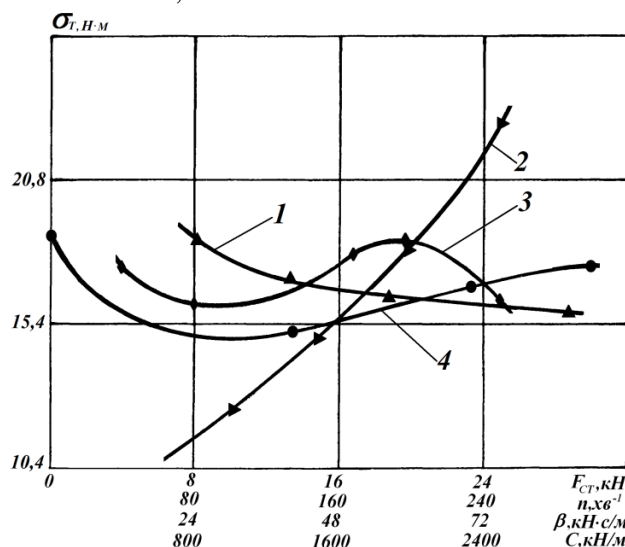
В табл.15 наведено значення середнього квадратичного відхилення процесу зміни крутного моменту, визначені за рівнянням багаточинної моделі (9) – σ_{MM} , та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними даними дослідів – $\sigma_{ЕКСП}$, наведеними в табл. 1 (див. формулу 5).

Графіки частинних емпіричних залежностей $\sigma_T = f(n)$, $\sigma_T = f(F_{CT})$, $\sigma_T = f(C)$, $\sigma_T = f(\beta)$ за даними табл. 12 для пропластка твердістю 2050 МПа зображено на рис. 2.

Таблиця 15. Експериментальні значення середнього квадратичного відхилення процесу зміни крутного моменту і значення визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції ($p_{ш}=2050$ МПа)

№ досл.	Частота обертання n , хв^{-1}	Осьове статичне навантаження $F_{СТ}$, кН	Жорсткість бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента β , кН·с/м	СКВ експ. $\sigma_{ЕКСП}$	СКВ за мат. мод. $\sigma_{ММ}$	ВП, %
1	82	10	400	0,1	16,53	15,14	8,4
2	82	15	2500	40	14,43	13,97	3,2
3	82	20	800	70	18,53	18,9	-2
4	82	25	1700	90	25,34	27,3	-7,7
5	133	10	800	90	12,49	12,29	1,6
6	133	15	1700	70	16,84	15,28	9,3
7	133	20	400	40	16,67	16,9	-1,4
8	133	25	2500	0,1	23,47	24,21	-3,2
9	188	10	1700	40	10,4	11,48	-10,4
10	188	15	800	0,1	14,32	14,98	-4,6
11	188	20	2500	90	18,48	17,82	3,6
12	188	25	400	70	22,44	22,51	-0,3
13	285	10	2500	70	10,26	11,01	-7,3
14	285	15	400	90	14,44	14,87	-3
15	285	20	1700	0,1	20,37	20,08	1,4
16	285	25	800	40	19,74	18,27	7,4

Статистична характеристика сукупності значень відносної похибки: середнє значення – 4,7.



1(\blacktriangle) – $\sigma_{HK} = f(n)$; 2(\blacktriangleright) – $\sigma_{HK} = f(F_{СТ})$; 3(\blacklozenge) – $\sigma_{HK} = f(C)$;
4(\bullet) – $\sigma_{HK} = f(\beta)$.

Рис. 2. Графіки частинних залежностей, одержані методом планованого експерименту ($p_{ш}=2050$ МПа)

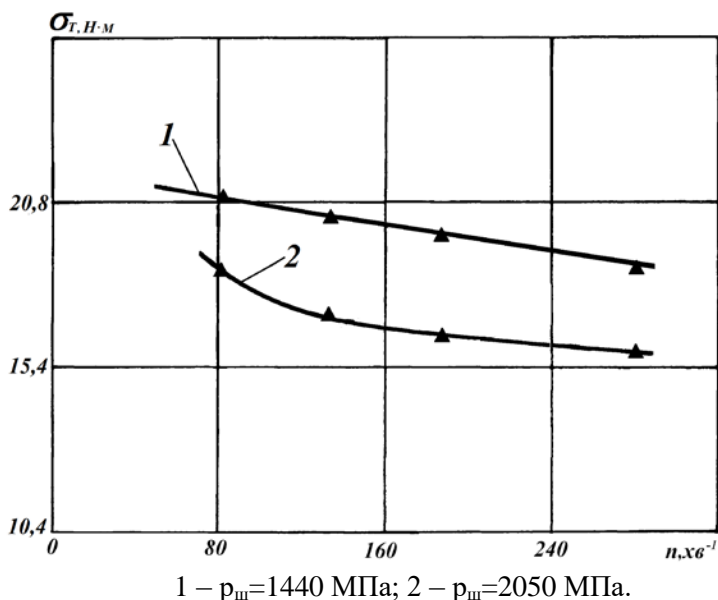


Рис. 3. Графіки частинних залежностей $\sigma_T = f(n)$, одержані методом планованого експерименту

Частинні емпіричні залежності $\sigma_T = f(n)$ (див.рис. 3) для обох пропластків монотонно спадні, тобто зі збільшенням частоти обертання долота енергія процесу зміни динамічної складової крутного моменту зменшується. Величина цієї енергії для пропластка твердістю 1440 МПа значно більша ніж для пропластка твердістю 2050 МПа. Мінімуми і максимуми стандарту для цих залежностей не спостерігаються.

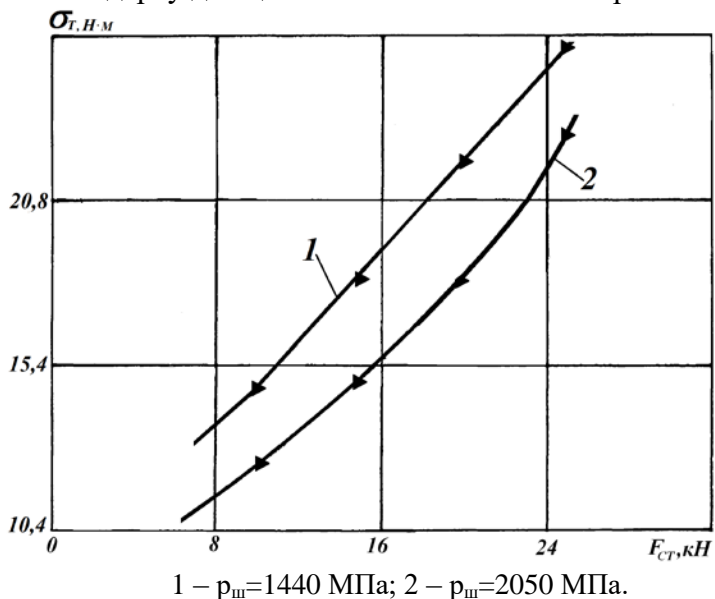


Рис. 4. Графіки частинних залежностей $\sigma_T = f(F_{CT})$, одержані методом планованого експерименту

Частинні емпіричні залежності $\sigma_T = f(F_{CT})$ (див.рис.4) для обох пропластків – монотонно зростаючі, тобто зі збільшенням статичного осьового навантаження на долото енергія процесу зміни динамічної складової крутного моменту збільшується. Величина цієї енергії для пропластка твердістю 1440 МПа значно більша, ніж в пропластка твердістю 2050 МПа. Мінімуми і максимуми стандарту для цих залежностей не спостерігаються.

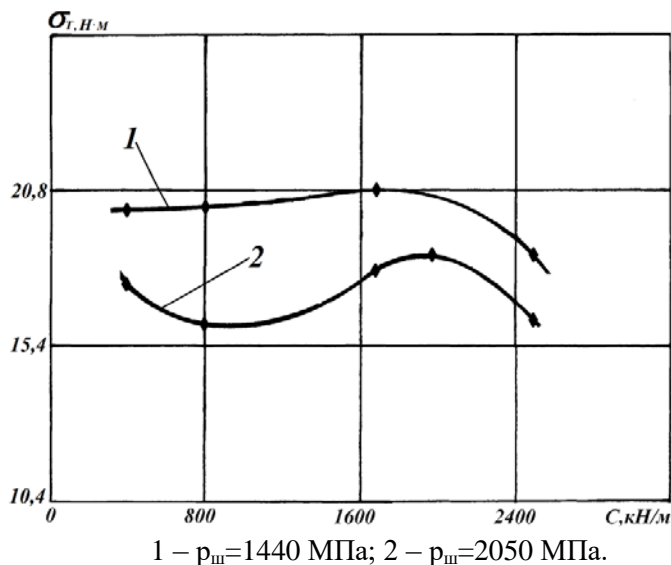


Рис. 5. Графіки частинних залежностей $\sigma_T = f(C)$, одержані методом планованого експерименту

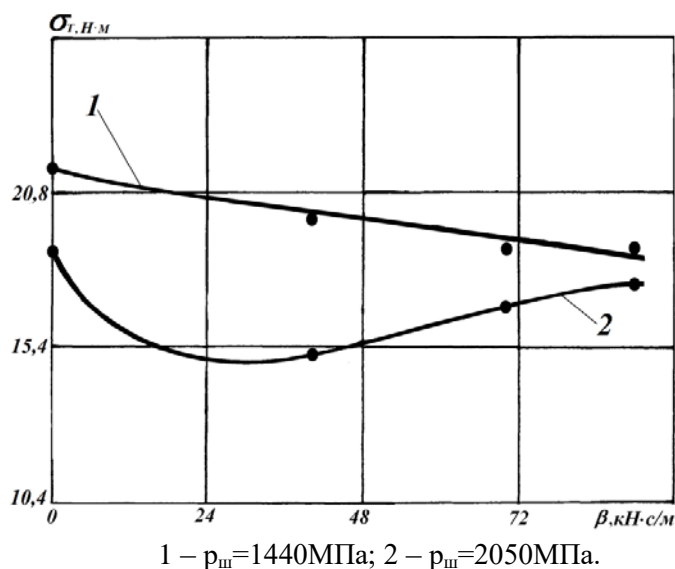
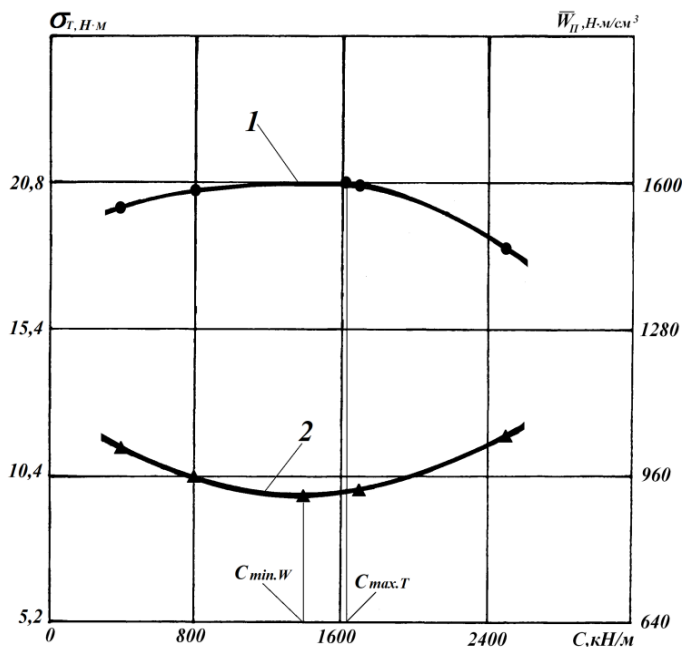


Рис. 6. Графіки частинних залежностей $\sigma_T = f(\beta)$, одержані методом планованого експерименту

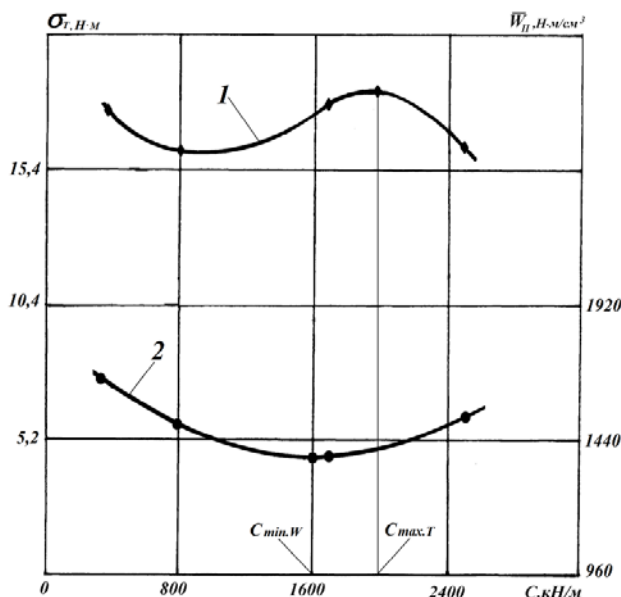
Частинні емпіричні залежності $\sigma_T = f(C)$ (див.рис. 5) для обох пропластків – поліноми третього степеня, які характеризуються наявністю мінімаксів. Для пропластка твердістю 1440 МПа мінімум енергії зафіксований для жорсткості 534 кН/м, а для пропластка твердістю 2050 МПа – для жорсткості 836 кН/м, тобто зі збільшенням твердості породи по штампу мінімум стандарту (а значить і енергії) переміщується в область більших значень жорсткості. Максимум стандарту для цих пропластків одержаний відповідно при значеннях жорсткості бурильного інструменту 1606 і 1970 кН/м, тобто зі збільшенням твердості породи максимум стандарту переміщується в область більших значень жорсткості.

Частинна емпірична залежність $\sigma_T = f(\beta)$ (див.рис. 6) для пропластка твердістю 1440 МПа – монотонно спадна, мінімум і максимум енергії для цієї залежності не спостерігаються. Для пропластка твердістю 2050 МПа ця залежність представлена поліномом третього степеня, мінімум спостерігається при коефіцієнті демпфування $\beta = 33 \text{кН} \cdot \text{с} / \text{м}$, максимум – при коефіцієнті демпфування $\beta = 89 \text{кН} \cdot \text{с} / \text{м}$.



$$1 - \sigma_T = f(C); 2 - \bar{W}_{II} = f(C).$$

Рис. 7. Графіки частинних залежностей $\sigma_T = f(C)$ і $\bar{W}_{II} = f(C)$, одержані методом планованого експерименту для пропластка твердістю 1440 МПа



$$1 - \sigma_T = f(C); 2 - \bar{W}_{II} = f(C).$$

Рис. 8. Графіки частинних залежностей $\sigma_T = f(C)$ і $\bar{W}_{II} = f(C)$, одержані методом планованого експерименту для пропластка твердістю 2050 МПа

На рис. 7 і 8 зображено графіки частинних залежностей $\sigma_T = f(C)$ і $\bar{W}_{II} = f(C)$ для пропластків твердістю 1440 і 2050 МПа. \bar{W}_{II} – це енергоємність процесу руйнування гірської породи, значення якої наведено в [2]. За цими графіками мінімум енергоємності не співпадає з максимумом енергії крутного моменту, тобто вони одержані при різних значеннях жорсткості бурильного інструменту. Для пропластка твердістю 1440 МПа ця різниця складає $1606 - 1375 = 231$ кН/м, для пропластку твердістю 1440 МПа – $1970 - 1602 = 368$ кН/м. Як мінімум енергоємності, так і максимум енергії крутного моменту зміщуються в область більш високих значень жорсткості зі збільшенням твердості гірської породи. За цими графіками, очевидно, можна прогнозувати значення жорсткості бурильного інструменту за якої енергоємність процесу руйнування гірської породи буде мінімальною. Практична реалізація цього твердження вимагає наступних кроків:

- зафіксувати процес зміни крутного моменту на столі ротора бурової;
- визначити дисперсію сцентрованого процесу для компонування низу бурильної колони (КНБК);

- зменшуючи жорсткість цієї КНБК, шляхом включення до її складу пристроїв зміни жорсткості, встановити таке її значення, за якого енергоємність процесу руйнування гірської породи буде найменшою для даного інтервалу буріння.

Висновки:

1. Частинні залежності стандарту процесу зміни відносного (динамічного) складника крутного моменту на долоті $\sigma_T = f(n)$, $\sigma_T = f(F_{CT})$, $\sigma_T = f(C)$, $\sigma_T = f(\beta)$, підібрані за експериментальними даними процесу буріння в пропластках твердістю 1440 МПа та 2050 МПа, представляють собою плавні «розумні» криві, які з ймовірністю, більшою за 0,95, апроксимують результати планованого факторного експерименту.

2. Згідно залежностей $\sigma_T = f(n)$ і $\sigma_T = f(F_{CT})$ енергія динамічного складника крутного моменту на долоті зростає зі збільшенням режимних параметрів процесу буріння. За певних її значень, це може призвести до руйнування озброєння долота. Величину динамічного складника крутного моменту важливо контролювати при використанні в процесі буріння доліт стираюче-ріжущого класу, наприклад доліт типу PDC.

3. Зі збільшенням коефіцієнта демпфування зростає величина енергії динамічного складника крутного моменту безповоротно втраченої в демпфуючому вузлі пристрою. Внаслідок цього загальна енергія динамічного складника на долоті зменшується, що сприяє зростанню довговічності озброєння долота.

4. Графік частинної залежності $\sigma_T = f(C)$ для обох пропластків має локальний максимум, який по відношенню до мінімуму енергоємності процесу руйнування гірської породи, одержаний для більшого значення жорсткості бурильного інструменту. Знаючи цю властивість одержаних залежностей можна методом підбору жорсткості контролюючи величину енергії динамічного складника крутного моменту на столі ротора бурової, досягнути мінімуму енергоємності процесу руйнування гірської породи і як, наслідок, зменшення енерговитрат на буріння свердловини.

Література

1. Мойсишин В.М. Крутильні коливання бурильної колони з амортизатором // Нафтова і газова промисловість. –1993. – №2. – С. 24-25.
2. Стійкість і коливання бурильної колони / В.М. Мойсишин, Б.Д. Борисевич, Ю.Л. Гаврилів, С.А. Зінченко. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2013. – 590 с.
3. Беликов В.Г., Посташ С.А. Рациональная отработка и изностойкость шарошечных долот. – М.: Недра, 1972. – 149 с.
4. Потапов Ю.Ф., Симонов В.В. Разрушение горных пород трехшарошечными долотами малого диаметра. – М.: Гостоптехиздат, 1961.
5. Сароян А.Е. Бурильные колонны в глубоком бурении. – М.: Недра, 1979. – 231 с.

6. Симонянц Л.Е. Разрушение горных пород и рациональная характеристика двигателей для бурения. – М.: Недра, 1966. – 288 с.
7. Султанов Б.З. Управление устойчивостью и динамикой бурильной колонны. – М.: Недра, 1991. – 208 с.
8. Показники варіації та формули для їх розрахунку Файлової архів студента [Електронний ресурс]. – Режим доступу studfile.net
Стаття надійшла до редакційної колегії 19.10.2021 р.

MULTIFACTORIAL EMPIRICAL MODELS OF STANDARDS RELATIVE TORQUE COMPONENT ON THE BIT

V. M. Moisyshyn, R. A. Zhovniruk, I. I. Vozniy

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

In order to establish a multifactorial empirical model standard of the relative component of the torque on the bit by the method of rational planning experimental studies were conducted at the stand of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. According to this method combination of variable factors which include the axial static load F_{CT} , the bit speed n , the stiffness C and the damping factor β of the drilling tool occurs only once. The standard is given by the product of individual dependences on variable factors

$$\sigma_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C),$$

where B_{CP} is the average value of the numerical coefficient for the set of all experiments. The constant factors during the planned experiment were the type and diameter of the three-cone bit and the flow rate of the washing liquid (water). The planned factorial experiment was conducted in Vorotyshche sandstone. According to its results equation of multifactor empirical models of the standard of the relative component of the torque on the bit for layers with a hardness of 1440 MPa and 2050 MPa is obtained.

Keywords: *relative torque component on the bit, method of rational planning of experiments, variable factor, empirical model, energy of random process, standard.*