

Буріння свердловин

УДК 622.24

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-21(79)-179-206

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ПОДВІЙНОЇ АМПЛІТУДИ КОЛИВНОГО ПРОЦЕСУ ЗМІНИ ОБЕРТОВОГО МОМЕНТУ НА ДОЛОТІ

В. М. Мойсишин , А. П. Івасютин 

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, Україна, вул. Карпатська 15;
e-mail: math@nunge.edu.ua

Метою статті є встановлення за результатами стендових експериментальних досліджень впливу зовнішніх незалежних чинників, до яких віднесено осьове статичне навантаження F_{CT} , частоту обертання n , жорсткість C і коефіцієнт демпфування β бурильного інструменту, на подвійну амплітуду A_T 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 тришарового долота та витрата промивальної рідини (води).

За результатами проведених досліджень побудовано емпіричні моделі множинної нелінійної кореляції між подвійною амплітудою $2A_T$ коливного процесу зміни обертового моменту на долоті та змінними чинниками для пропластків пісковика твердістю 1440 і 2050 МПа. Проведено аналіз впливу змінних чинників на величину $2A_T$, встановлено основні закономірності зміни частинних залежностей $2A_T = f(F_{CT})$, $2A_T = f(n)$, $2A_T = f(C)$ і $2A_T = f(\beta)$ від твердості породи.

Ключові слова: плановий експеримент, подвійна амплітуда динамічного складника обертового моменту на долоті, жорсткість бури-

льного інструменту, твердість гірської породи, емпірична модель, множинна нелінійна кореляція.

Вступ.

З метою аналізу результатів дослідження процесу зміни обертового моменту на долоті пропонується за показник інтенсивності руйнування гірської породи взяти подвійну амплітуду A_T коливного процесу.

Подвійна амплітуда основне застосування одержала у вібродіагностиці [1, 2]. Літературних джерел, в яких подвійну амплітуду використовують для оцінки динамічного складника обертового моменту на долоті, не виявлено.

Такий параметр можна використовувати як експрес-метод оцінки зміни обертового моменту на долоті безпосередньо у процесі буріння, а також у тому випадку, коли з тих чи інших причин середнє значення (моментоемність) не визначене, а запис реалізації моменту вівся на незначній швидкості, при якій фіксуються, практично локальні максимуми і локальні мінімуми зміни обертового моменту на долоті.

Враховуючи сказане, значний інтерес викликають дослідження, за результатами яких можна встановити залежності між подвійною амплітудою $2A_T$ 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 статті є встановлення багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції між подвійною амплітудою $2A_T$ коливного процесу зміни обертового моменту на долоті та зовнішніми незалежними чинниками при бурінні в пропластках твердістю 1440 та 2050 МПа пісковику воротищенської світи. Експериментальні дослідження було проведено на буровому стенді ІФНТУНГ [3] з використанням методики раціонального планування експерименту. За цією методикою кожна комбінація значень незалежних змінних чинників зустрічалася тільки один раз. Кожний з чинників змінювався на чотирьох рівнях. Тип і діаметр тришарашкового долота та витрата промивальної рідини (води) під час проведення експериментів залишались постійними.

Значення подвійної амплітуди коливного процесу зміни обертового моменту на долоті, тобто різницю між найбільшим і найменшим значеннями записаної (зафіксованої) реалізації, що одержані за результатами факторного експерименту, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. План факторного експерименту зі значеннями $2A_T$ процесу зміни обертового моменту

№ досл.	Частота обертання n , хв^{-1}	Осьове статичне навантаження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компонування бурильного інструменту C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструменту β , кН·с/м	$2A_T, \text{Н} \cdot \text{м}$	
					$p_{ш, 1440\text{МПа}}$	$p_{ш, 2050\text{МПа}}$
1(17)	82	10	400	0,1	112,26	121,76
2(18)	82	15	2500	40	112,6	104,3
3(19)	82	20	800	70	117,58	146,15
4(20)	82	25	1700	90	190,65	160,76
5(21)	133	10	800	90	104,5	93,67
6(22)	133	15	1700	70	156,18	137,51
7(23)	133	20	400	40	174,05	145,26
8(24)	133	25	2500	0,1	161,76	174,6
9(25)	188	10	1700	40	114,6	114,92
10(26)	188	15	800	0,1	168,7	130,87
11(27)	188	20	2500	90	151,42	161,42
12(28)	188	25	400	70	173,05	167,63
13(29)	285	10	2500	70	131,01	93
14(30)	285	15	400	90	125,15	127,55
15(31)	285	20	1700	0,1	167,4	141,5
16(32)	285	25	800	40	205,93	202,61

Емпірична модель подвійної амплітуди $2A_T$ процесу зміни обертового моменту на долоті для породи твердістю 1440 МПа

У табл. 2, 3 подано результати факторного експерименту в прошарку твердістю 1440 МПа з визначення значень $2A_T$, які усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та конструктивними параметрами бурильного інструменту C , β .

Таблиця 2. Експериментальні значення $2A_T$, усереднені за режимними параметрами

$n_\partial, \text{хв}^{-1}$ $F_{CT}, \text{кН}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	112,26	104,5	114,6	131,01	462,37	115,59
15	112,6	156,18	168,7	125,15	562,63	140,66
20	117,58	174,05	151,42	167,4	610,45	152,61
25	190,65	161,76	173,05	205,93	731,39	182,85
Сума	533,09	596,49	607,77	629,49	2366,84	591,71
Середнє	133,27	149,12	151,94	157,37	591,71	147,9275

Таблиця 3. Експериментальні значення $2A_T$, усереднені за параметрами бурильного інструменту

C , кН/м β , кН·с/м	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	112,26	168,7	167,4	161,76	610,12	152,53
40	174,05	205,93	114,6	112,6	607,18	151,80
70	173,05	117,58	156,18	131,01	577,82	144,46
90	125,15	104,5	190,65	151,42	571,72	142,43
Сума	584,51	596,71	628,83	556,79	2366,84	591,71
Середнє	146,13	149,18	157,21	139,20	591,71	147,9275

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між значеннями $2A_T$ і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності				Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$
n , хв ⁻¹	82	133	188	285	0,9999 0,999<P<1,0	1,62<14,8
	133,27	149,12	151,94	157,37		
	$2A_T = -2575,3952 / n + 166,39223$					
F_{CT} , кН	10	15	20	25	0,9924 0,99<P<0,998	4,0<14,8
	115,59	140,66	152,61	182,85		
	$2A_T = 87,63235 \cdot e^{0,029148F}$					
C , кН/м	400	800	1700	2500	0,9398 0,9<P<0,95	2,45<14,8
	146,13	149,18	157,21	139,20		
	$2A_T = 132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$					
β , кН·с/м	0,1	40	70	90	0,9277 0,9<P<0,95	1,9<14,8
	152,53	151,8	144,46	142,43		
	$2A_T = -0,11713 \cdot \beta + 153,78956$					

Згідно поданого матеріалу ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $2A_T$ та зовнішніми незалежними змінними факторами (чинниками) n і F_{CT} більша за 0,95, а для β більша за 0,9, і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$ також виконується. Для чинника C ймовірність частинної залежності, яка представлена поліномом дру-

ного степеня, більша за 0,9, умова існування такої залежності $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$ виконується, тобто це задовільний результат.

У табл. 5 подано усереднені значення $2A_T$ планованого експерименту і значення, визначені за емпіричними рівняннями регресії частинних залежностей.

Таблиця 5. Усереднені експериментальні значення $2A_T$ планованого експерименту і значення, знайдені за рівняннями регресії частинних емпіричних залежностей

$n_\delta, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Усереднені експериментальні значення $2A_T$	133,27	149,12	151,94	157,37
$2A_T = -2575,3952 / n + 166,39223$	134,98	147,03	152,69	157,36
$F_{CT}, \text{кН}$	10	15	20	25
Усереднені експериментальні значення $2A_T$	115,59	140,66	152,61	182,85
$2A_T = 87,63235 \cdot e^{0,029148F}$	117,29	135,69	156,98	181,61
$C, \text{кН/м}$	400	800	1700	2500
Усереднені експериментальні значення $2A_T$	146,13	149,18	157,21	139,20
$2A_T = 132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$	144,35	152,37	155,21	140,05
$\beta, \text{кН/с/м}$	0,1	40	70	90
Усереднені експериментальні значення $2A_T$	152,53	151,8	144,46	142,43
$2A_T = -0,11713 \cdot \beta + 153,78956$	153,78	149,10	145,59	143,25

Отже, на основі експериментальних даних одержано наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між величиною $2A_T$ та змінними чинниками експерименту

$$2A_T = B_{CP} \cdot f(n_\delta) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (-2575,3952 / n + 166,39223) \times (87,63235 \cdot e^{0,029148F}) \times (132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2) \times (153,78956 - 0,11713 \cdot \beta). \quad (1)$$

У табл. 6 наведено значення коефіцієнта B_i , знайдені за формулою

$$B_i = \frac{2A_{T,i}}{f(F_{CT,i}) \cdot f(n_{\delta,i}) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (2)$$

де $2A_{T,i}$ – експериментальні значення коефіцієнта динамічності процесу зміни моменту, які відповідають i -тому дослід, $f(F_{CT,i}) \cdot f(n_{\delta,i}) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід.

Таблиця 6. Значення коефіцієнта B_i для дослідів 1-16 планованого експерименту

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	$3,1943 \cdot 10^{-7}$	$2,9441 \cdot 10^{-7}$	$2,5014 \cdot 10^{-7}$	$3,4979 \cdot 10^{-7}$	$2,6567 \cdot 10^{-7}$	$3,4643 \cdot 10^{-7}$
№експ.	7	8	9	10	11	12
B	$3,5037 \cdot 10^{-7}$	$2,8128 \cdot 10^{-7}$	$2,7651 \cdot 10^{-7}$	$3,4750 \cdot 10^{-7}$	$3,1488 \cdot 10^{-7}$	$2,9694 \cdot 10^{-7}$
№експ.	13	14	15	16		
B	$3,4812 \cdot 10^{-7}$	$2,8345 \cdot 10^{-7}$	$2,8392 \cdot 10^{-7}$	$3,1614 \cdot 10^{-7}$		

У табл. 7 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$). Значення Δ обчислюється за формулою (3), згідно якої значенням меж інтервалу виділення артефактів: $2,4752 \cdot 10^{-7} - 3,6812 \cdot 10^{-7}$.

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,3343 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{17/16} = 0,6030 \cdot 10^{-7}. \quad (3)$$

Таблиця 7. Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$3,0782 \cdot 10^{-7}$	$1,2369 \cdot 10^{-15}$	$0,3343 \cdot 10^{-7}$	$1,75$ $\alpha=0,1$	Відс.	-	-	-

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

Величина коефіцієнта варіації $K_{BAP} = 10,9\%$. Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $3,0782 \cdot 10^{-7}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

За значення коефіцієнта B_{CP} рівняння багатofакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$\begin{aligned} 2A_T = B_{CP} \cdot f(n_o) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 3,0782 \cdot 10^{-7} \times \\ \times (-2575,3952 / n + 166,39223) \times (87,63235 \cdot e^{0,029148F}) \times \\ \times (132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2) \times \\ \times (153,78956 - 0,11713 \cdot \beta). \end{aligned} \quad (4)$$

В табл. 8 наведено значення $2A_{T.M}$, визначені за рівнянням багатofакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту $2A_{T.E}$, обчислені за формулою

$$ВП\% = \frac{2A_{T.E} - 2A_{T.M}}{2A_{T.E}} \cdot 100. \quad (5)$$

Таблиця 8. Експериментальні значення коефіцієнту $2A_{T.E}$ і значення, знайдені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції, твердість породи 1440 МПа

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компонування бурильного інструменту – C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонувки β , кН·с/м	$2A_{T.E}$	$2A_{T.M}$	ВП%
1	82	10	400	0,1	112,26	108,2	3,6
2	82	15	2500	40	112,6	117,71	-4,5
3	82	20	800	70	117,58	144,72	-23,1
4	82	25	1700	90	190,65	167,75	12,0
5	133	10	800	90	104,5	115,85	-10,9
6	133	15	1700	70	156,18	138,78	11,1
7	133	20	400	40	174,05	152,92	12,1
8	133	25	2500	0,1	161,76	177,01	-9,4
9	188	10	1700	40	114,6	127,57	-11,3
10	188	15	800	0,1	168,7	149,43	11,4
11	188	20	2500	90	151,42	147,99	2,3
12	188	25	400	70	173,05	179,38	3,7
13	285	10	2500	70	131,01	115,85	11,6
14	285	15	400	90	125,15	135,9	-8,6
15	285	20	1700	0,1	167,4	181,5	-8,4
16	285	25	800	40	205,93	200,53	2,6

Середнє значення відносної похибки $ВП_{CP} = 9,2\%$.

Для перевірки задовільного вибору формул апроксимації експериментальних даних залежностями $2A_{T.f} = f(n)$, $2A_{T.f} = f(F)$, $2A_{T.f} = f(C)$ і $2A_{T.f} = f(\beta)$, наведеними в табл. 5, потрібно провести визначення таких же залежностей (див. табл. 9-11), за значеннями, знайденими за рівнянням багатофакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції, тобто за формулою (4).

Таблиця 9. Усереднення значень емпіричної моделі $2A_{T.M}$ за режимними параметрами (згідно даних табл. 5)

n_d , хв ⁻¹ F_{CT} , кН	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	108,2	115,85	127,57	115,85	467,47	116,87
15	117,71	138,78	149,43	135,9	541,82	135,46
20	144,72	152,92	147,99	181,5	627,13	156,78
25	167,75	177,01	179,38	200,53	724,67	181,17
Сума	538,38	584,56	604,37	633,78	2361,09	
Середнє	134,60	146,14	151,09	158,44		

Таблиця 10. Усереднення значень емпіричної моделі $2A_{T,M}$ за параметрами бурильного інструменту (згідно даних табл. 5)

$\begin{matrix} C, \text{кН/м} \\ \beta, \text{кН-с/м} \end{matrix}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	108,2	149,43	181,5	177,01	616,14	154,04
40	152,92	200,53	127,57	117,71	598,73	149,68
70	179,38	144,72	138,78	115,85	578,73	144,68
90	135,9	115,85	167,75	147,99	567,49	141,87
Сума	576,4	610,53	615,6	558,56	2361,09	
Середнє	144,1	152,63	153,9	139,64		

Таблиця 11. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації значень, визначених за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності				Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$
$n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285	0,9999 0,999<P<1,0	1,44<14,8
	134,60	146,14	151,09	158,44		
	$2A_T = -2896,0835 / n + 168,0501$					
$F_{CT}, \text{кН}$	10	15	20	25	0,9999 0,999<P<1,0	0,13<14,8
	116,87	135,46	156,78	181,17		
	$2A_T = 87,3177 \cdot e^{0,0292F}$					
$C, \text{кН/м}$	400	800	1700	2500	0,9998 0,99<P<0,998	0,5<14,8
	146,13	149,18	157,21	139,20		
	$2A_T = 132,9741781 + 0,0337039 \cdot C - 1,24 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$					
$\beta, \text{кН} \cdot \text{с/м}$	0,1	40	70	90	0,9957 0,99<P<0,998	0,5<14,8
	154,04	149,68	144,68	141,87		
	$2A_T = -0,1372 \cdot \beta + 154,43097$					

Рівняння частинних залежностей $2A_{T,f} = f(n)$, $2A_{T,f} = f(F)$, $2A_{T,f} = f(C)$ і $2A_{T,f} = f(\beta)$, підбрані за значеннями емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції, повністю відповідають рівнянням емпіричних частинних залежностей, підібраними за усередненими експериментальними значеннями $2A_{T,E}$ (табл. 2, 3).

Емпірична модель подвійної амплітуди $2A_T$ процесу зміни обертального моменту на долоті для породи твердістю 2050 МПа

У табл. 12, 13 подано результати факторного експерименту в прошарку 2050 МПа з визначення значень $2A_T$, які усереднені відпові-

дно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C , β .

Таблиця 12. Результати експерименту зі значеннями $2A_T$, усередненими за режимними параметрами

n_o, XB^{-1} $F_{CT}, \text{кН}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	121,76	93,67	114,92	93	423,35	$\approx 105,84$
15	104,3	137,51	130,87	127,55	500,23	$\approx 125,06$
20	146,15	145,26	161,42	141,5	594,33	$\approx 148,58$
25	160,76	174,6	167,63	202,61	705,6	176,4
Сума	532,97	551,04	574,84	564,66	2223,51	$\approx 555,88$
Середнє	$\approx 133,24$	137,76	143,71	$\approx 141,17$	$\approx 555,88$	138,97

Таблиця 13. Результати експерименту зі значеннями $2A_T$, усередненими за параметрами бурового інструменту

$C, \text{кН/м}$ $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	121,76	130,87	141,5	174,6	568,73	142,1825
40	145,26	202,61	114,92	104,3	567,09	141,7725
70	167,63	146,15	137,51	93	544,29	136,07
90	127,55	93,67	160,76	161,42	543,4	135,85
Сума	562,2	573,3	554,69	533,32	2223,51	
Середнє	140,55	143,32	138,67	133,33		

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між величиною $2A_T$ і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 14.

Згідно одержаних даних ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $2A_T$ та зовнішніми незалежними змінними факторами n і F_{CT} більша за 0,95, а для β більша за 0,9, і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$ також виконується. Для чинника C ймовірність частинної залежності, яка представлена поліномом другого степеня, більша за 0,95, умова існування такої залежності $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$ виконується, тобто це задовільний результат.

У табл. 15 подано усереднені значення $2A_T$ планованого експерименту і значення, знайдені за емпіричними рівняннями регресії частинних залежностей.

Таблиця 14. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності				Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$
n , хв ⁻¹	82	133	188	285	0,9995 0,999<P<1,0	2,25<13,9
	133,24	137,76	143,71	141,17		
	$2A_T = n / (0,00689 \cdot n + 0,042)$					
F_{CT} , кН	10	15	20	25	0,99997 0,999<P<1,0	0,2<13,9
	105,84	125,06	148,58	176,4		
	$2A_T = 75,1486 \cdot e^{0,034096F}$					
C , кН/м	400	800	1700	2500	0,9677 0,95<P<0,98	1,06<13,9
	140,55	143,32	138,67	133,33		
	$2A_T = 139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$					
β , кН·с/м	0,1	40	70	90	0,91 0,9<P<0,95	1,45<13,9
	142,18	141,77	136,07	135,85		
	$2A_T = -0,08082 \cdot \beta + 143,0107$					

Таблиця 15. Усереднені експериментальні значення $2A_T$ планового експерименту і значення, знайдені за рівняннями регресії частинних емпіричних залежностей

n_θ , хв ⁻¹	82	133	188	285
Усереднені експериментальні значення $2A_T$	133,24	137,76	143,71	141,17
$2A_T = n / (0,00689 \cdot n + 0,042)$	135,1	138,78	140,58	142,1
F_{CT} , кН	10	15	20	25
Усереднені експериментальні значення $2A_T$	105,84	125,06	148,58	176,4
$2A_T = 75,1486 \cdot e^{0,034096F}$	105,68	125,32	148,62	176,24
C , кН/м	400	800	1700	2500
Усереднені експериментальні значення $2A_T$	140,55	143,32	138,67	133,33
$2A_T = 139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$	141,32	141,95	139,57	133,04
β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Усереднені експериментальні значення $2A_T$	142,18	141,77	136,07	135,85
$2A_T = -0,08082 \cdot \beta + 143,0107$	143,0	139,78	137,35	135,74

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між величиною $2A_T$ та змінними чинниками експерименту

$$2A_T = B_{CP} \cdot f(n_0) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \times \\ \times (n / (0,00689 \cdot n + 0,042) \times (75,1486 \cdot e^{0,034096F}) \times \\ \times (139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2) \times \\ \times (-0,08082 \cdot \beta + 143,0107)). \quad (6)$$

У табл. 16 наведені значення коефіцієнта B_i , визначені за формулою (2) і за значеннями, наведеними у табл. 1 і 15.

Таблиця 16. Значення коефіцієнта B_i для дослідів 17-32 планованого експерименту

№експ.	17	18	19	20	21	22
B_i	$4,2200 \cdot 10^{-7}$	$3,3127 \cdot 10^{-7}$	$3,7334 \cdot 10^{-7}$	$3,5638 \cdot 10^{-7}$	$3,3146 \cdot 10^{-7}$	$4,1244 \cdot 10^{-7}$
№експ.	23	24	25	26	27	28
B	$3,5653 \cdot 10^{-7}$	$3,7444 \cdot 10^{-7}$	$3,9650 \cdot 10^{-7}$	$3,6595 \cdot 10^{-7}$	$4,2782 \cdot 10^{-7}$	$3,4857 \cdot 10^{-7}$
№експ.	13	14	15	16		
B	$3,4293 \cdot 10^{-7}$	$3,7338 \cdot 10^{-7}$	$3,3570 \cdot 10^{-7}$	$4,0774 \cdot 10^{-7}$		

У табл. 17 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$). Значення Δ обчислюється за формулою (3) згідно якої значенням меж інтервалу виділення артефактів: $3,31398 \cdot 10^{-7} - 4,3058 \cdot 10^{-7}$.

Таблиця 17. Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$3,7228 \cdot 10^{-7}$	$1,0446 \cdot 10^{-15}$	$0,3232 \cdot 10^{-7}$	1,75 $\alpha=0,1$	Відс.	-	-	-

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

Величина коефіцієнта варіації $K_{BAP} = 8,7\%$. Це значення менше 10% тобто сукупність однорідна малої мінливості і середнє значення $3,7228 \cdot 10^{-7}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

За значення коефіцієнта B_{CP} рівняння багатofакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$2A_T = B_{CP} \cdot f(n_0) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 3,7228 \cdot 10^{-7} \times \\ \times (n / (0,00689 \cdot n + 0,042) \times (75,1486 \cdot e^{0,034096F}) \times \\ \times (139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2) \times \\ \times (-0,08082 \cdot \beta + 143,0107)). \quad (7)$$

В табл. 18 наведено значення $2A_{T.M}$, визначені за рівнянням багатofакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими

значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту $2A_{T.E}$, знайденої за формулою (5).

Таблиця 18. Експериментальні значення $2A_{T.E}$ і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції, твердість породи 2050 МПа

№ досл.	Частота обертання $n_{ДОЛ}, \text{хв}^{-1}$	Осьове статичне навантаження на долото $F_{СТ}, \text{кН}$	Жорсткість компоновки бурильного інструмента – $C, \text{кН/м}$	Коефіцієнт демпфування компоновки $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$2A_{T.E}$	$2A_{T.M}$	ВП%
1	82	10	400	0,1	121,76	107,41	11,8
2	82	15	2500	40	104,3	117,22	-12,4
3	82	20	800	70	146,15	145,76	0,3
4	82	25	1700	90	160,76	167,92	-4,45
5	133	10	800	90	93,67	105,19	-12,3
6	133	15	1700	70	137,51	124,13	9,7
7	133	20	400	40	145,26	151,70	-4,4
8	133	25	2500	0,1	174,6	173,56	0,6
9	188	10	1700	40	114,92	107,91	6,1
10	188	15	800	0,1	130,87	133,15	-1,7
11	188	20	2500	90	161,42	140,48	13,0
12	188	25	400	70	167,63	179,07	-6,8
13	285	10	2500	70	93	100,97	-8,6
14	285	15	400	90	127,55	127,19	0,3
15	285	20	1700	0,1	141,5	156,95	-10,9
16	285	25	800	40	202,61	185,03	8,7

Середнє значення відносної похибки $ВП_{CP}= 7,0\%$.

Для перевірки задовільного вибору формул апроксимації експериментальних даних залежностями $2A_{T.f} = f(n)$, $2A_{T.f} = f(F)$, $2A_{T.f} = f(C)$ і $2A_{T.f} = f(\beta)$, наведеними в табл. 11, потрібно провести визначення таких же залежностей (див. табл. 19-21), за значеннями, знайденими за рівнянням багатofакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції, тобто за формулою (7).

Таблиця 19. Усереднення значень емпіричної моделі $2A_{T.M}$ за режимними параметрами (згідно даних табл. 15)

$n_a, \text{хв}^{-1}$ $F_{СТ}, \text{кН}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	107,41	105,19	107,91	100,97	421,48	105,37
15	117,22	124,13	133,15	127,19	501,69	125,42
20	145,76	151,70	140,48	156,95	594,89	148,72
25	167,92	173,56	179,07	185,03	705,58	179,40
Сума	538,31	554,58	560,61	570,14	2223,64	
Середнє	134,58	137,74	140,15	142,54		

Таблиця 20. Усереднення значень емпіричної моделі $2A_{T.M}$ за параметрами бурильного інструменту (згідно даних табл. 15)

$\begin{matrix} C, \text{кН/м} \\ \beta, \text{кН}\cdot\text{с/м} \end{matrix}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	107,41	133,15	156,95	173,56	571,07	142,77
40	151,70	185,03	107,91	117,22	561,86	140,46
70	179,07	145,76	124,13	100,97	549,93	137,48
90	127,19	105,19	167,92	140,48	540,78	135,20
Сума	565,37	569,13	556,91	532,23	2223,64	
Середнє	141,34	142,28	139,23	133,06		

Таблиця 21. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації значень, визначених за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності				Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$
$n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285	0,9999 0,999<P<1,0	0,62<13,9
	134,58	137,74	140,15	142,54		
	$2A_T = n / (0,00684 \cdot n + 0,05242)$					
$F_{CT}, \text{кН}$	10	15	20	25	0,9998 0,999<P<1,0	0,73<13,9
	105,37	125,42	148,72	179,40		
	$2A_T = 73,83415 \cdot e^{0,03534F}$					
$C, \text{кН/м}$	400	800	1700	2500	0,9777 0,95<P<0,98	0,24<13,9
	141,34	142,28	139,23	133,06		
	$2A_T = 140,0653285 + 0,0048412 \cdot C - 3,06781 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$					
$\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	0,1	40	70	90	0,9882 0,98<P<0,99	0,51<13,9
	142,77	140,46	137,48	135,20		
	$2A_T = -0,0839 \cdot \beta + 143,17481$					

Рівняння частинних залежностей $2A_{T.f} = f(n)$, $2A_{T.f} = f(F)$, $2A_{T.f} = f(C)$ і $2A_{T.f} = f(\beta)$, підбрані за значеннями емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції, повністю відповідають рівнянням емпіричних частинних залежностей, підібраними за усередненими експериментальними значеннями $2A_{T.E}$ (табл. 12, 13).

Аналіз одержаних результатів

На рис. 1 наведено графіки частинних емпіричних залежностей між подвійною амплітудою $2A_T$ і зовнішніми незалежними чинниками, побудованих за даними табл. 5, для породи твердістю 1440 МПа, а на рис. 2 наведено графіки таких же частинних емпіричних залежностей, побудованих за даними табл. 15 для породи твердістю 2050 МПа.

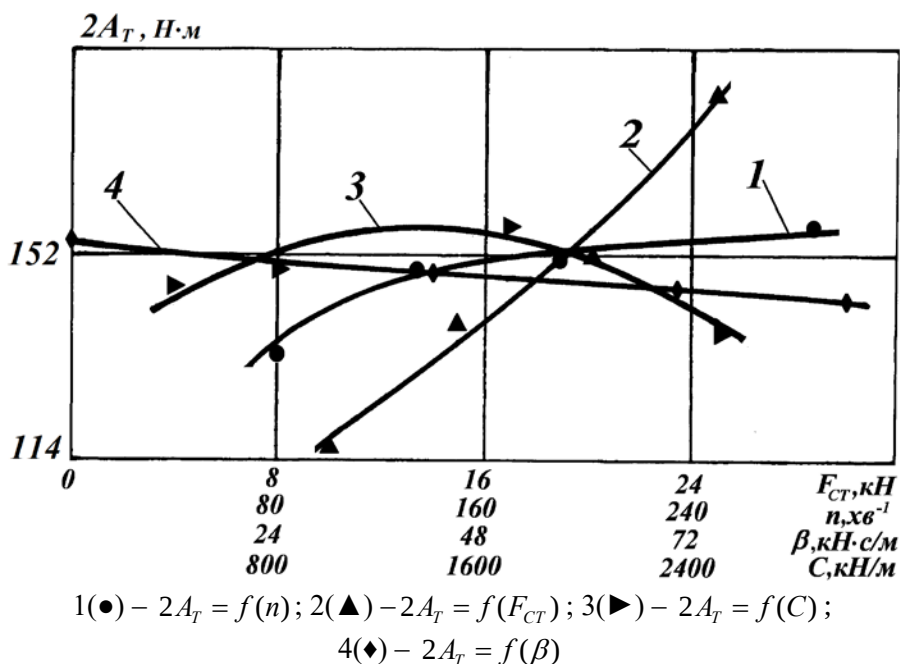


Рис. 1. Графіки частинних залежностей, одержаних методом планового експерименту (твердість породи 1440 МПа)

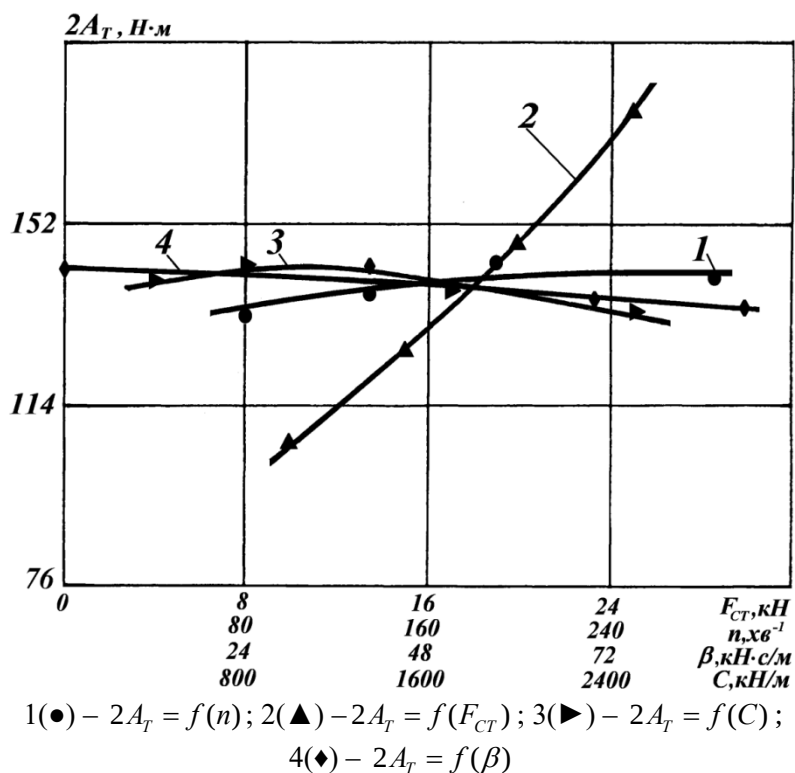


Рис. 2. Графіки частинних залежностей, одержаних методом планового експерименту (твердість породи 2050 МПа)

Під час аналізу частинних залежностей, наведених у табл. 5 і 15, важливо одержати підтвердження того, що різниця між значеннями показника оцінки динамічності процесу зміни моменту, обчисленими за цими залежностями, виникає тільки внаслідок зміни зовнішнього незалежного чинника, а не в результаті похибок, допущених під час обробки даних експерименту.

Цей аналіз проводиться з використанням методики визначення випадкової похибки для результатів планового експерименту.

Об'єм вибірок, за яким визначається коефіцієнта $t_{p,m}$, для всіх результатів аналізу планового експерименту дослідження процесу зміни обертового моменту на долоті є постійним і рівний трьом. Прийняте значення $t_{p,m}$ залежить тільки від прийнятої довірчої ймовірності.

В табл. 22, 23 наведено значення випадкових похибок ($ВП_i$) для частинних залежностей $2A_{T,f} = f(n)$, та довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 1440 МПа і 2050 МПа.

Таблиця 22. Значення $ВП_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$ (твердість породи 1440 МПа)

$n_{\phi}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	133,27	149,12	151,94	157,37
$2A_{T,f,i} = -2575,3952 / n + 166,39223$	134,98	147,03	152,69	157,36
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	134,125	140,075	152,315	157,365
$\Delta 2A_{T,i} = 2\bar{A}_{T,i} - 2A_{T,i}$	$ 0,855 $; 0,855; 0	$ 1,045 $; 1,045; 0	$ 0,375 $; 0,375; 0	$ 0,005 $; 0,005; 0
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	1,46205	2,18405	0,28125	0,00005
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta 2A_{T,i}^2}{3(3-1)}}$	0,4936345	0,60333	0,216506	0,002887
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}$, $p = 0,8; t_{p,m} = 1,89$	0,9329692	1,140296	0,409197	0,005456
$\delta 2A_{T,i} = \frac{ВП_i}{2\bar{A}_{T,i}} \cdot 100\%$	0,70%	0,77%	0,27%	0,003%
$\Delta 2A_{T,f,i} = \frac{2A_{T,f,i} \cdot \delta 2A_{T,i}}{100}$	0,9389	1,1322	0,4102	0,00546
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$ $2A_{T,f,MAX,i} \dots 2A_{T,f,MIN,i}$	134,98± ±0,94 (135,92- 134,04)	147,03 ±1,13 (148,16- 145,90)	152,69 ±0,41 (153,10- 152,28)	157,36 ±0,005 (157,365- 157,354)

Таблиця 23. Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $k_{T.\partial.max.f} = f(n)$, і довірчі інтервали для значень $2A_{T.f}$ (твердість породи 2050 МПа)

$n_{\partial}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $2A_{T.i}$	133,24	137,76	143,71	141,17
$2A_{T.f.i} = n / (0,00689 \cdot n + 0,042)$	135,1	138,78	140,58	142,1
$2\bar{A}_{T.i} \equiv 2A_{T.i}$	134,17	138,27	142,145	141,635
$\Delta 2A_{T.i} = 2\bar{A}_{T.i} - 2A_{T.i}$	$\begin{vmatrix} 0,93 \\ 0,93; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,51 \\ 0,51; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1,565 \\ 1,565; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,465 \\ 0,465; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta 2A_{T.i}^2$	1,7298	0,5202	4,89845	0,43245
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta 2A_{T.i}^2}{3(3-1)}}$	0,53693575	0,294449	0,903553	0,2684679
$B\Pi_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B.i}$ $p = 0,8; t_{p,m} = 1,89$	1,014808	0,55651	1,707715	0,507404
$\delta 2A_{T.i} = \frac{B\Pi_i}{2\bar{A}_{T.i}} \cdot 100\%$	0,76%	0,40%	1,20%	0,36%
$\Delta 2A_{T.f.i} = \frac{2A_{T.f.i} \cdot \delta 2A_{T.i}}{100}$	1,02184	0,55856	1,6889	0,50907
$2A_{T.f.i} \pm \Delta 2A_{T.i}$ $2A_{T.f.MAX.i} \dots 2A_{T.f.MIN.i}$	$135,1 \pm 1,02$ (136,12-134,08)	$138,78 \pm 0,56$ (139,34-138,22)	$140,58 \pm 1,69$ (142,27-138,89)	$142,1 \pm 0,51$ (142,61-141,59)

Згідно даних табл. 23 зі збільшенням частоти обертання долота величина $2A_{T.f}$ також зростає. Таке зростання може бути пояснене випадковою похибкою або впливом частоти обертання. Якщо для значень $2A_{T.f}$, обчислених для суміжних рівнів частоти обертання, виконується нерівність $2A_{T.f.MAX.i} < 2A_{T.f.MIN.i+1}$, де $2A_{T.f.MAX.i}$ і $2A_{T.f.MIN.i+1}$ відповідно максимальне значення 80% довірчого інтервалу для істинного значення $2A_{T.f.i}$ i -го рівня частоти обертання і мінімальне значення для довірчого інтервалу для наступного рівня частоти обертання ($i+1$). За табл. 22 ця нерівність виконується для всього інтервалу зміни частоти обертання – 82-285 хв^{-1} : 135,92<145,90; 148,16<152,28; 153,1<157,354, тобто зростання $2A_{T.f}$ пояснюється впливом частоти обертання.

За даними табл. 23 при переході від рівня 82 хв^{-1} до рівня 133 хв^{-1} наведена вище нерівність підтверджується: 136,12<138,22. При переході від рівня 133 хв^{-1} до рівня 188 хв^{-1} і далі від 188 хв^{-1} до 285 хв^{-1}

нерівність впливу частоти обертання на подвійну амплітуду не підтверджується. Вплив зміни частоти обертання підтверджується тільки при переході від 133 хв^{-1} до 285 хв^{-1} : $139,34 < 141,59$. За цими результатами можна зробити попередній висновок: із збільшенням твердості породи вплив частоти обертання проявляється при більшому інтервалі зміни частоти обертання.

Вплив твердості гірської породи на величину $2A_{T,f,i}$ підтверджується тільки при виконанні нерівності $2A_{T,f,MIN,1440,i} > 2A_{T,f,MAX,2050,i}$.

За табл. 22, 23 ця нерівність підтверджена тільки в інтервалі значень $133\text{--}285 \text{ хв}^{-1}$ ($145,9 > 139,34$; $152,28 > 142,27$; $157,354 > 142,61$). Різниця між значеннями $2A_{T,f,i}$ на частоті 82 хв^{-1} знаходиться в межах випадкової похибки експериментальних досліджень.

В табл. 24, 25 наведено значення BPI_i для частинних залежностей $2A_{T,f} = f(F)$ та довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 1440 МПа і 2050 МПа.

Таблиця 24. Значення BPI_i для частинної залежності $2A_{T,f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$ (твердість породи 1440 МПа)

$F_{CT}, \text{ кН}$	10	15	20	25
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	115,59	140,66	152,61	182,85
$2A_{T,f,i} = 87,63235 \cdot e^{0,029148F}$	117,29	135,69	156,98	181,61
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	116,44	138,175	154,795	182,23
$\Delta 2A_{T,i} = 2\bar{A}_{T,i} - 2A_{T,i}$	$ 0,85 $; 0,85; 0	$ 2,485 $; 2,485; 0	$ 2,185 $; 2,185; 0	$ 0,62 $; 0,62; 0
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	1,445	12,35045	9,54845	0,7688
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta 2A_{T,i}^2}{3(3-1)}}$	0,490748	1,434715	1,261503	0,357957
$BPI_i = t_{p;m} \cdot \sigma_{B,i}$, $p = 0,8; t_{p;m} = 1,89$	0,9275132	2,711612	2,3842545	0,676539
$\delta 2A_{T,i} = \frac{BPI_i}{2\bar{A}_{T,i}} \cdot 100\%$	0,80%	1,96%	1,54%	0,37%
$\Delta 2A_{T,f,i} = \frac{2A_{T,f,i} \cdot \delta 2A_{T,i}}{100}$	0,9343	2,6628	2,417909	0,674237
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$ $2A_{T,f,MAX,i} \dots 2A_{T,f,MIN,i}$	$117,29 \pm 0,93$ (118,22-116,36)	$135,69 \pm 2,66$ (138,35-133,03)	$156,98 \pm 2,42$ (159,40-154,56)	$181,61 \pm 0,67$ (182,28-180,94)

Таблиця 25. Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$ (твердість породи 2040 МПа)

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	105,84	125,06	148,58	176,4
$2A_{T,f,i} = 75,1486 \cdot e^{0,034096F}$	105,68	125,32	148,62	176,24
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	105,76	125,19	148,6	176,32
$\Delta 2A_{T,i} = 2\bar{A}_{T,i} - 2A_{T,i}$	$\begin{vmatrix} 0,08 \\ 0,08; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,13 \\ 0,13; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,02 \\ 0,02; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,08 \\ 0,08; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	0,0128	0,0338	0,0008	0,0128
F_{CT} , кН	10	15	20	25
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta 2A_{T,i}^2}{3(3-1)}}$	0,046188	0,075055	0,011547	0,046188
$B\Pi_i = t_{p;m} \cdot \sigma_{B,i}$, $p = 0,8; t_{p;m} = 1,89$	0,087295	0,141855	0,021824	0,087295
$\delta 2A_{T,i} = \frac{B\Pi_i}{2\bar{A}_{T,i}} \cdot 100\%$	0,08%	0,11%	0,015%	0,05%
$\Delta 2A_{T,f,i} = \frac{2A_{T,f,i} \cdot \delta 2A_{T,i}}{100}$	0,08723	0,14200	0,022	0,08726
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	105,68± ±0,09	125,32± ±0,14	148,62± ±0,022	176,24± ±0,09
$2A_{T,f,MAX,i} \dots 2A_{T,f,MIN,i}$	(105,77- 105,59)	(125,46- 125,18)	(148,642- 148,598)	(176,33- 176,15)

Згідно даних табл. 24 зі збільшенням осьового навантаження величина $2A_{T,f}$ також зростає.

Таке зростання $2A_{T,f}$ може бути пояснене випадковою похибкою або впливом осьового навантаження. Якщо для значень $2A_{T,f}$, обчислених для суміжних рівнів навантаження, виконується нерівність $2A_{T,f,MAX,i} < 2A_{T,f,MIN,i+1}$, де $2A_{T,f,MAX,i}$ і $2A_{T,f,MIN,i+1}$ відповідно максимальне значення 80% довірчого інтервалу для істинного значення $2A_{T,f,i}$ і-го рівня навантаження і мінімальне значення для довірчого інтервалу для наступного рівня навантаження ($i+1$). За табл. 24. ця нерівність виконується для всього інтервалу зміни навантаження – 10-25 кН: $118,22 < 133,03$; $138,35 < 154,56$; $159,4 < 180,94$, тобто зростання $2A_{T,f}$ по-

яснюється впливом навантаження. Аналогічний висновок можна зробити за даними табл. 25 з результатами буріння в породі твердістю 2050 МПа: $105,77 < 125,18$; $125,46 < 148,598$; $148,642 < 176,15$.

Вплив твердості гірської породи на величину $2A_{T.f}$ підтверджується тільки при виконанні нерівності $2A_{T.f.MIH.1440,i} > 2A_{T.f.MAX.2050,i}$. За табл. 24, 25 ця нерівність підтверджена для всього інтервалу зміни осового навантаження на долоті – 10-25 кН: $116,36 > 105,77$; $133,03 > 125,46$; $154,56 > 148,642$; $180,28 > 176,33$.

За наведеним вище матеріалом зі збільшенням твердості породи величина $2A_{T.f}$ зменшується.

В табл. 26, 27 наведено значення $ВП_i$ для частинних залежностей $2A_{T.f} = f(\beta)$ та довірчі інтервали для значень $2A_{T.f}$, твердість породи 1440 МПа і 2050 МПа.

Таблиця 26. Значення $ВП_i$ для частинної залежності $2A_{T.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T.f}$ (твердість породи 1440 МПа)

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	152,53	151,8	144,46	142,43
$2A_{T,f,i} = -0,11713 \cdot \beta + 153,78956$	153,78	149,10	145,59	143,25
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	153,155	150,45	145,025	142,84
$\Delta 2A_{T,i} = 2\bar{A}_{T,i} - 2A_{T,i}$	$ 0,625 $; 0,625; 0	$ 1,35 $; 1,35; 0	$ 0,565 $; 0,565; 0	$ 0,41 $; 0,41; 0
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	0,78125	3,645	0,63845	0,3362
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta 2A_{T,i}^2}{3(3-1)}}$	0,3608439	0,779423	0,326203	0,236714
$ВП_i = t_{p;m} \cdot \sigma_{B,i}$, $p = 0,8; t_{p;m} = 1,89$	0,681995	1,473109	0,616523	0,447389
$\delta 2A_{T,i} = \frac{ВП_i}{2\bar{A}_{T,i}} \cdot 100\%$	0,44%	0,98%	0,42%	0,31%
$\Delta 2A_{T,f,i} = \frac{2A_{T,f,i} \cdot \delta 2A_{T,i}}{100}$	0,68478	1,45989	0,61892	0,448673
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$ $2A_{T,f.MAX,i} \dots 2A_{T,f.MIH,i}$	153,78± ±0,68 (154,46- 153,10)	149,10± ±1,46 (150,56- 147,64)	145,59± ±0,62 (146,21- 144,97)	143,25± ±0,45 (143,70- 142,80)

Таблиця 27. Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$ (твердість породи 2050 МПа)

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	142,18	141,77	136,07	135,85
$2A_{T,f,i} = -0,08082 \cdot \beta + 143,01068$	143,0	139,78	137,35	135,74
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	142,59	140,775	136,71	135,795
$\Delta 2A_{T,i} = 2\bar{A}_{T,i} - 2A_{T,i}$	$\begin{vmatrix} 0,41 \\ 0,41; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,995 \\ 0,995; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,64 \\ 0,64; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,055 \\ 0,055; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	0,3362	1,98005	0,8192	0,00605
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta 2A_{T,i}^2}{3(3-1)}}$	0,2367136	0,574464	0,369504	0,0317543
$B\Pi_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}$, $p = 0,8; t_{p,m} = 1,89$	0,4473887	1,08576	0,6983629	0,060016
$\delta 2A_{T,i} = \frac{B\Pi_i}{2\bar{A}_{T,i}} \cdot 100\%$	0,31%	0,77%	0,51%	0,04%
β , кН·с/м	0,1	40	70	90
$\Delta 2A_{T,f,i} = \frac{2A_{T,f,i} \cdot \delta 2A_{T,i}}{100}$	0,448676	1,078062	0,70163	0,05999
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$ $2A_{T,f,MAX,i} \dots 2A_{T,f,MIN,i}$	$143,0 \pm 0,45$ (143,45-142,55)	$139,78 \pm 1,08$ (140,86-138,70)	$137,35 \pm 0,70$ (138,05-136,65)	$135,74 \pm 0,06$ (135,80-135,68)

Згідно даних табл. 26 зі збільшенням коефіцієнта демпфування величина $2A_{T,f}$ зменшується. Таке зменшення $2A_{T,f}$ може бути пояснене випадковою похибкою або впливом коефіцієнта β . Якщо для значень $2A_{T,f}$, обчислених для суміжних рівнів коефіцієнта демпфування, виконується нерівність $2A_{T,f,MIN,i} > 2A_{T,f,MAX,i+1}$, де $2A_{T,f,MIN,i}$ і $2A_{T,f,MAX,i+1}$ відповідно мінімальне значення 80% довірчого інтервалу для істинного значення $k_{T,\partial,max,f,i}$ i -го рівня частоти обертання і максимальне значення для довірчого інтервалу для наступного рівня частоти обертання ($i+1$). За даними табл. 26 ця нерівність виконується для β в усьому інтервалі значень – 0-90 кН·с/м: $153,1 > 150,56$; $147,64 > 146,21$; $144,97 > 143,7$, тобто зменшення $2A_{T,f}$ пояснюється впливом зміни β .

При бурінні в породі твердістю 2050 МПа (табл. 27) нерівність підтверджується також в усьому інтервалі значень β : $142,55 > 140,86$; $138,7 > 138,05$; $136,65 > 135,8$.

Вплив твердості гірської породи на величину $2A_{T.f}$ підтверджується тільки при виконанні нерівності $2A_{T.f.MIH.1440.i} > 2A_{T.f.MAX.2050.i}$. За даними табл. 26, 27 ця нерівність підтверджена для всього інтервалу зміни коефіцієнта демпфування – 0-90 кН·с/м: $153,1 > 143,45$; $147,64 > 140,86$; $144,97 > 138,05$; $142,8 > 135,68$.

Як бачимо зі збільшенням твердості породи величина $2A_{T.f}$ зменшується.

Таблиця 28. Значення $ВП_i$ для частинної залежності $2A_{T.f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T.f}$ (твердість породи 1440 МПа)

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $2A_{T.i}$	146,13	149,18	157,21	139,20
$2A_{T.f.i} = 132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$	144,35	152,37	155,21	140,05
$2\bar{A}_{T.i} \equiv 2A_{T.i}$	145,24	150,775	156,21	139,625
$\Delta 2A_{T.i} = 2\bar{A}_{T.i} - 2A_{T.i}$	$ 0,89 $; 0,89; 0	$ 1,595 $; 1,595; 0	$ 1,0 $; 1,0; 0	$ 0,425 $; 0,425; 0
$\sum \Delta 2A_{T.i}^2$	1,5842	5,08805	2,0	0,36125
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta 2A_{T.i}^2}{3(3-1)}}$	0,5138417	0,920974	0,5773503	0,245374
C , кН/м	400	800	1700	2500
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B.i}$, $p = 0,8; t_{p,m} = 1,89$	0,9711609	1,740451	1,091192	0,463757
$\delta 2A_{T.i} = \frac{ВП_i}{2\bar{A}_{T.i}} \cdot 100\%$	0,67%	1,15%	0,70%	0,33%
$\Delta 2A_{T.f.i} = \frac{2A_{T.f.i} \cdot \delta 2A_{T.i}}{100}$	0,9652098	1,75886	1,084066	0,465168
$2A_{T.f.i} \pm \Delta 2A_{T.i}$ $2A_{T.f.MAX.i} \dots 2A_{T.f.MIH.i}$	$144,35 \pm 0,96$ (145,32-143,38)	$152,37 \pm 1,76$ (154,13-150,61)	$155,21 \pm 1,08$ (156,29-154,12)	$140,05 \pm 0,46$ (140,52-139,58)

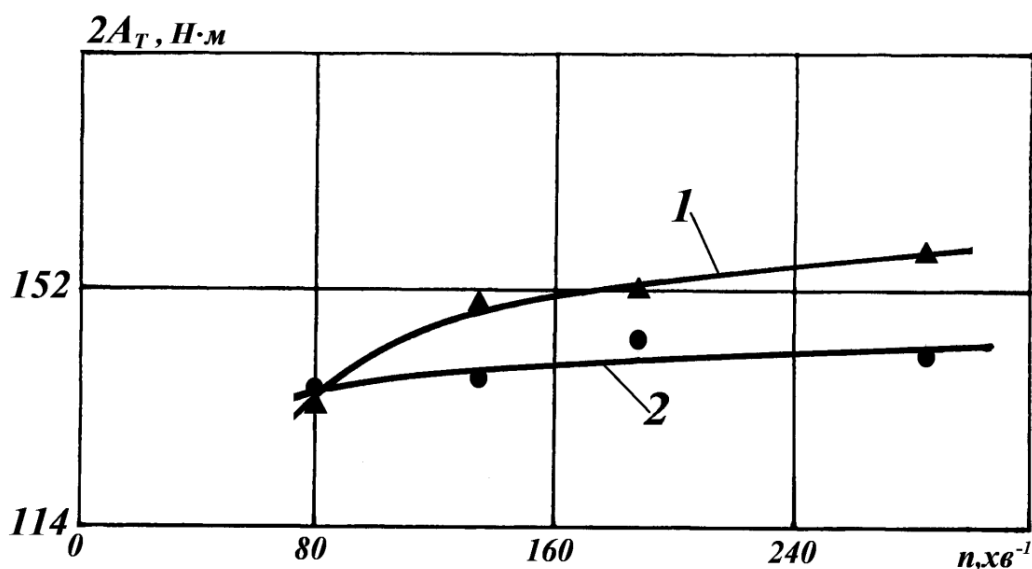
Таблиця 29. Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$ (твердість породи 2050 МПа)

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	140,55	143,32	138,67	133,33
$2A_T = 139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$	141,32	141,95	139,57	133,04
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	140,935	142,635	139,12	133,185
$\Delta 2A_{T,i} = 2\bar{A}_{T,i} - 2A_{T,i}$	$\begin{vmatrix} 0,385 \\ 0,385; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,685 \\ 0,685; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,45 \\ 0,45; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,145 \\ 0,145; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	0,29645	0,93845	0,405	0,04205
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta 2A_{T,i}^2}{3(3-1)}}$	0,2222798	0,395485	0,259808	0,083716
$B\Pi_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}$ $p = 0,8; t_{p,m} = 1,89$	0,4201089	0,7474665	0,4910364	0,158228
$\delta 2A_{T,i} = \frac{B\Pi_i}{2A_{T,i}} \cdot 100\%$	0,3%	0,52%	0,35%	0,12%
$\Delta 2A_{T,f,i} = \frac{2A_{T,f,i} \cdot \delta 2A_{T,i}}{100}$	0,4212566	0,743877	0,4926247	0,15805
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$ $2A_{T,f,MAX,i} \dots 2A_{T,f,MIN,i}$	$141,32 \pm 0,96$ (141,74-140,90)	$141,95 \pm 0,74$ (142,69-141,21)	$139,57 \pm 0,49$ (140,06-139,08)	$133,04 \pm 0,49$ (133,12-132,88)

Для породи твердістю 1440 МПа за залежністю $2A_{T,f,i} = 132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$ при значенні $C = 1371$ кН/м фіксується локальний максимум залежності величиною 156,62 Н·м. Локальний максимум знаходиться в інтервалі значень від 800 до 1700 кН/м. За табл. 28 величина $\Delta 2A_{T,f,i}$ для значення 800 кН/м становить 1,76; для значення 1700 кН/м – 1,08. Величину $\Delta 2A_{T,f,i}$ для значення 1371 кН/м визначаємо за формулою – $\Delta 2A_{T,f,1371} = 1,76 - \left[\frac{1,76 - 1,08}{1700 - 800} \times (1371 - 800) \right] = 1,33$ 80% довірчий інтервал для значення 156,62: 155,29-157,95.

За цією залежністю $2A_{T.f} = f(C)$ інтервал 400-2500 кН/м можна розділити на дві ділянки, одна в інтервалі 400-1371 кН/м, друга в інтервалі 1371-2500 кН/м. В першому інтервалі спостерігається зростання значення $2A_{T.f}$ з величини 144,35 до величини 157 Н·м. В другому інтервалі спостерігається зменшення подвійної амплітуди зміни обертового моменту на долоті від 157 до 140,05 Н·м.

Вплив жорсткості бурильного інструменту на процес зміни подвійної амплітуди підтверджується для першої ділянки при виконанні нерівності $2A_{T.f.MAX.i} < 2A_{T.f.MIN.i+1}$, для другої ділянки – при виконанні нерівності $2A_{T.f.MIN.i} > 2A_{T.f.MAX.i+1}$. Нерівність для першої ділянки в діапазонах жорсткості 400-800 та 800-1371 кН/м підтверджується: $145,32 < 150,61$; $154,13 < 156,12$. Для другої ділянки в діапазоні жорсткості 1371-1700 кН/м нерівність $2A_{T.f.MIN.i} > 2A_{T.f.MAX.i+1}$ з 70% довірчими інтервалами підтверджується: $156,12 > 155,98$, тобто наявність локального максимуму фіксується про значення жорсткості 1371 кН/м. В інтервалі жорсткостей 1700-2500 кН/м вплив параметру C на зміну $2A$ також підтверджується: $154,12 > 140,52$.



1(►) – $p_{ш} = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_{ш} = 2050 \text{ МПа}$

Рис. 3. Графіки частинних залежностей $2A_T = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержаними для різної за твердістю гірської породи

Для породи твердістю 2050 МПа за залежністю $2A_T = 139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$ при значенні $C=842$ кН/м фіксується максимум залежності величиною 141,98 Н·м. Локальний максимум знаходиться в інтервалі значень від 800 до 1700 кН/м. За табл. 29 величина $\Delta 2A_{T.f.i}$ для значення 800 кН/м становить 0,74, для значення 1700 кН/м – 0,49. Нехтуючи незначним відхиленням між значенням 800 і 842 кН/м приймаємо границі 80% довірчого інтервалу для значення $2A_{MAX}$ рівними $\pm 0,74$: 141,24-142,72 кН·м. За границями довірчих інтервалів для жорсткостей 400 і 842 кН/м зміна величини $2A$ в цьому діапазоні пояснюється випадковою похибкою і поява локального максимуму залежності $2A_{T.f} = f(C)$ не підтверджується: $141,74 > 141,24$. В діапазонах жорсткостей 842-1700 і 1700-2500 кН/м величина $2A_{T.f}$ внаслідок збільшення жорсткості компонування бурильного інструменту зменшується: $141,24 > 140,06$ і $139,08 > 133,12$, локальний екстремум в цьому діапазоні відсутній. За 80% довірчими інтервалами, при бурінні в породі твердістю 2050 МПа, локальний екстремум не виявлений, в інтервалі значень жорсткості 400-842 кН/м різниця між значеннями подвійної амплітуди пояснюється випадковою похибкою, в інтервалі значень 842-2500 кН/м зменшення величини $2A_{T.f}$ є наслідком зміни жорсткості компонування бурильного інструменту.

Із збільшенням твердості породи подвійна амплітуда зменшується для всіх рівнів жорсткості (400→143,38>141,74; 800→150,61>141,21; 1700→154,12>140,06; 2500→139,58>133,12).

За вище наведеним матеріалом вплив твердості породи спостерігається при дослідженнях впливу всіх зовнішніх незалежних чинників на процес зміни $2A_T$, а саме із збільшенням твердості породи значення $2A_T$ зменшується. Враховуючи сказане доцільно графічно представити частинні залежності $2A_T = f(n)$, $2A_T = f(F)$, $2A_T = f(C)$ і $2A_T = f(\beta)$ для більш чіткого розуміння процесу їх зміни для порід різної твердості.

На рис. 3-6 наведено графіки частинних емпіричних залежностей $2A_T = f(n)$, $2A_T = f(F)$, $2A_T = f(C)$ і $2A_T = f(\beta)$ для піскови́ка твердістю 1440 і 2050 МПа, побудовані за рівняннями регресій, які наведено в таблицях 15 і 21.

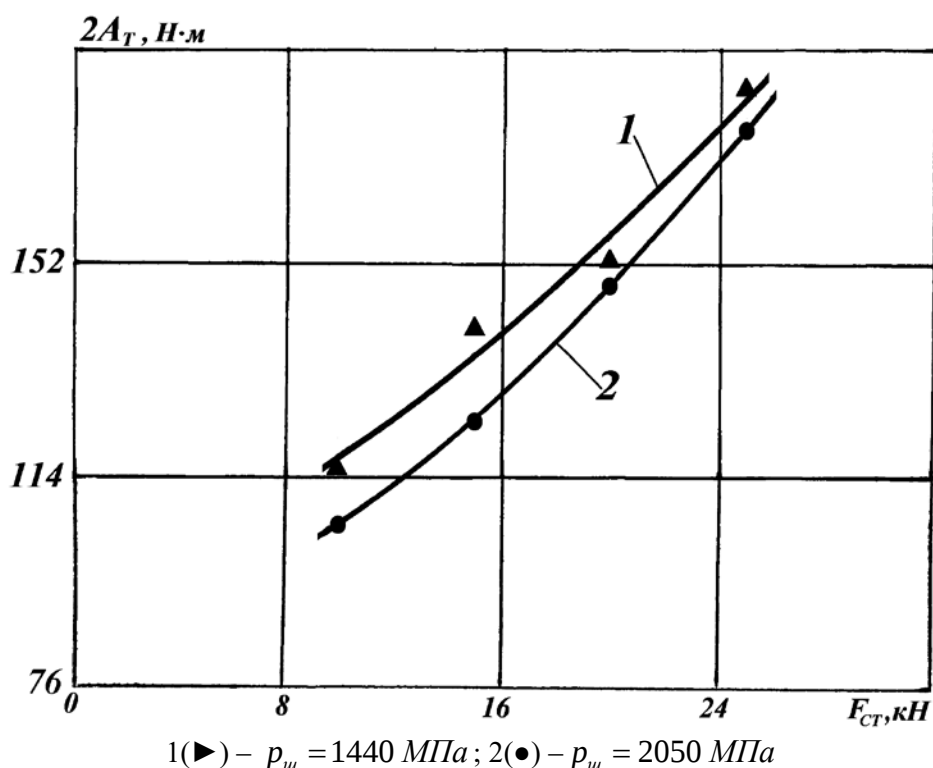


Рис. 4. Графіки частинних залежностей $2A_T = f(F_{CT})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержаними для різної за твердістю гірської породи

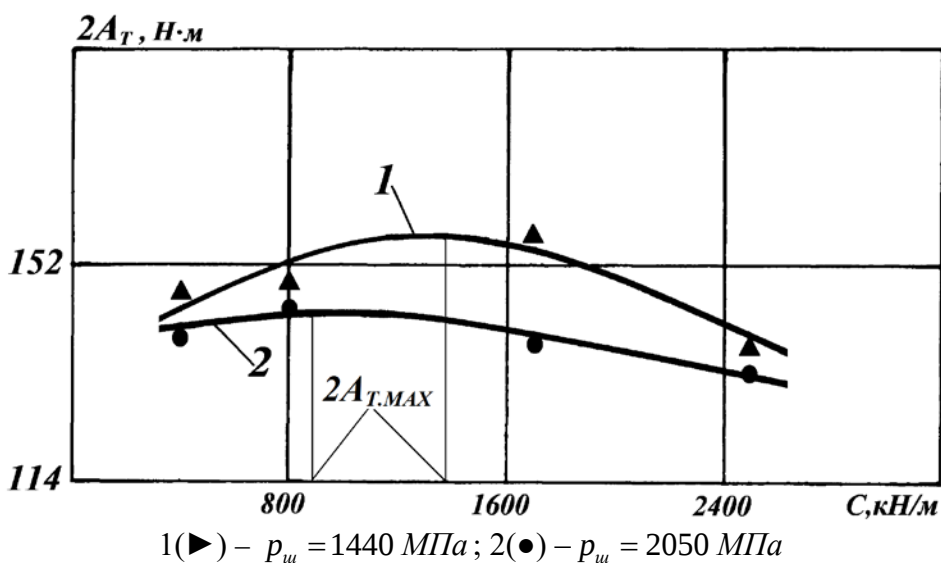


Рис. 5. Графіки частинних залежностей $2A_T = f(F_{CT})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержаними для різної за твердістю гірської породи

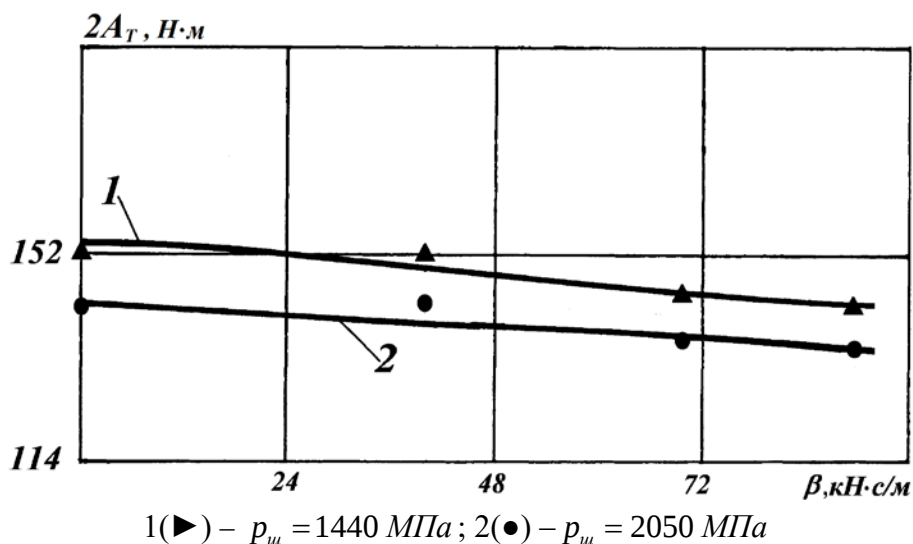


Рис. 6. Графіки частинних залежностей $2A_T = f(\beta)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержаними для різної за твердістю гірської породи

Висновки

1. Вперше для оцінки динамічного складника обертового моменту на долоті запропоновано взяти подвійну амплітуду $2A_T$ коливного процесу.

2. Встановлено, що в діапазоні осьових навантажень 10-25 кН величина $2A_T$ зростає на 54,8% для породи твердістю 1440 МПа і на 66,8% для породи твердістю 2050 МПа.

3. Величина $2A_T$ в діапазоні частоти обертання 82-285 хв^{-1} зростає для породи твердістю 1440 МПа на 16,6%, а для породи твердістю 2050 МПа – на 5,2%. Для породи твердістю 1440 МПа вплив частоти при переході з одного рівня на інший підтверджується 80% довірчими інтервалами для значень $2A_T$ обчисленими на кожному рівні n . Для породи твердістю 2050 МПа вплив частоти обертання зафіксований в інтервалах зміни 82-133 хв^{-1} і 133-285 хв^{-1} , в інтервалах 133-188 хв^{-1} і 188-285 хв^{-1} зміна частоти не впливає на величину $2A_T$.

4. Встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта демпфування бурильного інструменту величина $2A_T$ зменшується на 7,4% для породи твердістю 1440 МПа і на 5,4% для породи твердістю 2050 МПа. Незалежно від твердості породи вплив коефіцієнта демпфування при переході з одного рівня на інший підтверджується 80% довірчими інтервалами для значень $2A_{T.f.i}$, обчислених на кожному рівні β .

5. Емпіричні залежності $2A_T = f(C)$, незалежно від твердості породи, представлені поліномами другого ступеня. Вони, як правило, характеризуються наявністю локального максимуму. Для них експериментальні дані поділяються на дві ділянки: перша – це зростання значень $2A_T$ до локального максимуму, а друга – це зменшення значень $2A_T$. Для породи твердістю 1440 МПа збільшення подвійної амплітуди від 144,35 до 157 Н/м спостерігається в діапазоні 400-1371 кН/м, а зменшення від 157 до 140,05 Н/м – в діапазоні 1371-2500 кН/м. При бурінні в породі твердістю 2050 МПа локального екстремуму не виявлено. В інтервалі значень жорсткості C 400-842 кН/м різниця між значеннями подвійної амплітуди пояснюється випадковою похибкою, а в інтервалі значень 842-2500 кН/м зменшення величини $2A_T$ є наслідком зміни жорсткості компонування бурильного інструменту.

Література

1. Гуров А.П. Вібродіагностика: навчальний посібник / А.П. Гуров, Д.Ю. Шарейко. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 116 с.
2. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання: навч. посіб. / В.О. Повідайло. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 248 с.
3. Стійкість і коливання бурильної колони / В.М.Мойсишин, Б.Д.Борисевич, Ю.Л.Гаврилів, С.А.Зінченко. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2013. – 590 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 11.11.2025 р.

Прийнято до друку 14.11.2025 р.

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF DOUBLE AMPLITUDE OF THE OSCILAL PROCESS OF TORQUE CHANGE ON A BIT

V. M. Moisyshyn , A. P. Ivasiutyn 

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

15, Karpatska Street, Ivano-Frankivsk, 76019;

e-mail: math@nunge.edu.ua

The article aims to establish, based on the results of bench-top experimental studies, the influence of external independent factors, which include axial static load F_{CT} , rotational speed n , stiffness C , and damping coefficient β of the drilling tool, on the double amplitude A_T of the dynamic component of the torque on the bit. Bench studies were made using method of rational design experiments, so that a combination of studies of independent officials occurs only once. A planned factorial experiment was carried out

on sandstone blocks of the Vorotyshchenska Svita, folded between two layers with a hardness of 1440 and 2050 MPa. Constant factors during the drilling period in the bench washes were the type and diameter of three roller bits and the amount of washing liquid (water).

The results of the investigations were based on empirical models of multiple nonlinear correlations between the variable amplitude $2A_T$ of the colliding process, changing the overturning moment on the bit, and changing agents for inlays. Sand hardness is 1440 and 2050 MPa. An analysis of the influx of changeable officials was carried out to determine the main patterns of change in partial deposits $2A_T = f(F_{CT})$, $2A_T = f(n)$, $2A_T = f(C)$ and $2A_T = f(\beta)$ of rock hardness.

Keywords: *planned experiment, sub-amplitude of the dynamic collapsible torque on the bit, hardness of the drilling tool, hardness of the rock, empirical model, multiple nonlinear correlation.*