

PACS numbers: 62.20.-x, 62.20.F-, 62.20.M-, 62.20.Qp, 81.40.Np, 81.70.Bt

Багатофакторна емпірична модель енергії зубцевих коливань шарошкового долота

В. М. Мойсишин, М. В. Лисканич, Л. В. Борисевич*, Р. А. Жовнірук

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15,
76019 Івано-Франківськ, Україна*
**Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57,
76018 Івано-Франківськ, Україна*

З метою встановлення багатофакторної емпіричної моделі енергії зубцевих коливань $\sigma_{\text{Езуб}}$ сталевго шарошкового долота використано метод раціонального планування експериментів. Згідно цього методу комбінація змінних чинників, до яких відносять осьове статичне навантаження F_{cm} , частоту обертання долота n , жорсткість C та коефіцієнт демпфування β бурильного інструмента, зустрічається тільки один раз. Загальну багатовимірну функцію подано добутком окремих залежностей від змінних чинників — $\sigma_{\text{Езуб}} = B_{cp} f(n) f(F_{cm}) f(\beta) f(C)$, де B_{cp} — середнє значення числового коефіцієнта для множини усіх дослідів. Постійними факторами під час проведення планованого експерименту були тип і діаметр сталевго тришарошкового долота та витрата промивальної рідини (води). Планований факторний експеримент проведено у блоках пісковику городищенської світи, складених з двох пропластків твердістю за штампом 1440 МПа і 2050 МПа. За результатами експерименту побудовано рівняння багатофакторної емпіричної моделі енергії зубцевих коливань сталевго тришарошкового долота для пропластків твердістю 1440 МПа та 2050 МПа відповідно.

Corresponding author: Vasyl Mykhaylovych Moysyshyn
E-mail: math@nung.edu.ua

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska Str., UA-76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine*
**Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
57 Shevchenko Str., UA-76018 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Citation: V. M. Moysyshyn, M. V. Lyskanych, L. V. Borysevych, and R. A. Zhovniruk, Multifactorial Empirical Model of Three-Cone Bit Gear Oscillation Energy, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No. 12: 1729–1752 (2020) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.42.12.1729.

Ключові слова: сталеве шарошкове долото, емпірична модель, енергія зубцевих коливань, метод планування експериментів, змінний чинник.

The method of rational planning of experiments is used to develop a multifactorial empirical model of three-cone bit gear oscillation energy $\sigma_{E_{зуб}}$. This method provides combination of variables, i.e. axial static load F_{cm} , the stiffness C and the damping factor β of the drilling tool to be used only once. The general multidimensional function is given by the product of individual relations of variable factors $\sigma_{E_{зуб}} = B_{cp} f(n) f(F_{cm}) f(\beta) f(C)$, where B_{cp} is the average value of the numerical coefficient for the set of all experiments. The type and diameter of a steel three-cone bit and the flow rate of the drilling fluid (water) are considered as constant factors. The planned factorial experiment was carried out in sandstone blocks of the Horodyshe strata composed of two layers with a stamp hardness of 1440 MPa and 2050 MPa. According to the experimental result, the equations of the multifactorial empirical model of three-cone bit gear oscillation energy are developed for layers of 1440 MPa and 2050 MPa hardness.

Key words: steel cone bit, empirical model, energy of gear oscillations, method of experiment planning, variable factor.

(Отримано 22 жовтня 2020 р.)

1. ВСТУП І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вібрації бурильної колони, яку виготовляють зі сталі, алюмінієвих стопів, титанових стопів та полімерних матеріалів, можуть стати ключовою проблемою для оптимальної побудови траєкторії стовбура свердловини, збільшення терміну служби бурильного інструмента та застосування інтелектуального буріння [1]. Деякі автори [2–4] вважають зниження вібрацій бурильного інструмента запорукою збереження динамічної стійкості бурильної колони загалом. Актуальні проблеми конструювання та застосування віброзахисних пристроїв для довгомірних структур розглянуто у працях [5–7].

Феномен контактної взаємодії елементів бурильної колони зі стінкою свердловини є важливим чинником, який визначає енергоємність процесу буріння під час обертання колони. У цьому напрямку актуальними залишаються питання математичного моделювання статички та динаміки стрижневих систем щодо задач ліквідації прихоплення бурильної колони [8–10]. Уточнення моделей взаємодії поверхні стрижня з пружним або непружним середовищем потрібне задля підвищення довговічності бурильних колон [11] та забезпечення якісного центрування обсадних труб [12, 13]. Особливості моделювання контактної взаємодії породоруйнівного інструмента з шаруватими чи гетерогенними структурами гірської породи представлено у працях [14–16].

Популярність та стрімкий розвиток обсягів скерованого буріння

глибоких нафтових та газових свердловин потребує вдосконалення конструкцій і технологій виготовлення як бурового та нафтогазового обладнання, так і бурильного інструмента. Корпуси шарошок бурильних доліт виготовляють штампуванням зі сталей, наприклад, 14X2H4MA, 17H3MA, 20X2H4A, які піддають цементації із фрезерованими зубцями, нагрітими твердим стопом, а також одержують відцентровим литвом з одночасним армуванням зубців твердим стопом. Для буріння у твердих гірських породах шарошки бурильних доліт споряджають вставними зубцями із твердого stopу, виготовленими методом порошкової металургії, які запресовують у корпус. Для підвищення працездатності бурильного інструмента зазвичай використовують конструкторські [17, 18], технологічні [19–21] та експлуатаційні методи [22].

Зокрема, до конструкторських методів відносять оптимальний вибір способу з'єднання деталей [23–25] та удосконалення конфігурації конічних різьб [26–28], якості поверхонь складної конфігурації [29, 30] та раціональний вибір ущільнень для опор сталевих шарошкових доліт [31, 32], що забезпечує довговічність підшипників та запобігає виникненню вібрацій у процесі буріння. Під час вибору конструкційних матеріалів для виготовлення бурильних доліт необхідно вивчати корозійну поведінку металу в електролітах [33–35] і теплові процеси у зоні взаємодії бурильного долота із гірською породою [36, 37].

Серед технологічних методів на особливу увагу заслуговують способи формування зносостійких та функціональних покриттів на робочих поверхнях деталей інструмента та дослідження методів їх обробки [38–40]. Перспективним є застосування покриттів для зміцнення деталей підшипникових вузлів шарошкових доліт для забезпечення їхньої стабільної роботи [41, 42]. Дослідники [43–45] звертають увагу на вивчення дифузійних процесів у нікель-залізних стопах, що є актуальним для розроблення технологічних процесів цементації долотних сталей, які використовують для виготовлення шарошкових доліт. Важливим є застосування конструкторсько-технологічного моделювання для підвищення точності складання виробів із використанням системного аналізу [46].

До експлуатаційних методів також відносять використання раціональних режимів буріння [47], застосування ефективних способів ліквідації ускладнень під час буріння [48, 49], вчасне виконання діагностичних процедур задля забезпечення втомної міцності бурильного інструмента [50].

У працях [51, 52] проведено ґрунтовний аналіз причин та способів попередження втрати працездатності сталевих тришарошкових доліт, що може спричиняти виникнення аварійних ситуацій. Крім того приділяють велику увагу екологічній безпеці обладнання під час буріння свердловин [53] та транспортування вуглеводнів [54].

Сталеve шарошкове долото, що рухається нерівною поверхнею вибою свердловини і руйнує гірську породу, здійснює вертикальні переміщення, внаслідок чого виникає динамічний складник осьового навантаження, який називають осьовою динамічною силою $F_{дин}$. Загальне осьове навантаження на долото можна подати сумою двох складників: статичного $F_{ст}$ і динамічного $F_{дин}$, який у процесі буріння може приймати як додатні так і від'ємні значення, тобто

$$F = F_{ст} \pm F_{дин}.$$

За П. В. Балицьким [55] частотний спектр осьової динамічної сили двокомпонентний, що містить низькочастотний і зубцевий складники. Двокомпонентний характер осьової динамічної сили на долоті також підтвердили дослідження, проведені Р. А. Ганджумяном [56]. Однак, за результатами цих досліджень у м'яких породах (сьома категорія за Протодьяконовим) низькочастотних коливань не зафіксовано. Їх поява стає можливою під час буріння у твердих гірських породах. Зі збільшенням осьового статичного навантаження на долото, частоти обертання і твердості гірської породи амплітуда поздовжніх коливань зростає.

Під час буріння сталевими шарошковими долотами, які виготовлені із фрезерованими зубцями, на вибої свердловини утворюється зубчаста периферійна рейка [55], що впливає на процес взаємодії долота з гірською породою вибою і призводить до збільшення або зменшення проковзування шарошок по вибою. Величину проковзування оцінюють емпіричним коефіцієнтом k_f , який визначають за формулою:

$$k_f = \frac{f_{теор}}{f_{експ}},$$

де $f_{теор}$, $f_{експ}$ — теоретична та експериментально встановлена частоти зубцевих коливань долота відповідно. Залежно від твердості гірської породи цей коефіцієнт змінюється від 0,879 до 0,929 [55]. Результатом проковзування є відмінність між теоретичним і експериментальним значеннями частоти зубцевих коливань.

Для оцінки впливу жорсткості бурильного інструмента на енергію зубцевих коливань осьової динамічної сили авторами проведено експериментальні дослідження [57], за результатами яких встановлено, що зміна жорсткості від максимального значення 6000 кН/м до мінімального 225 кН/м викликає збільшення енергії високочастотних коливань. Порівнюючи значення механічної швидкості буріння і значення енергії зубцевих коливань, можна зробити висновок, що зі збільшенням енергії зубцевих коливань осьової динамічної сили механічна швидкість буріння зростає. Інакше кажучи,

зменшення жорсткості бурильного інструмента інтенсифікує процес руйнування породи.

Сказане пояснює необхідність проведення експериментальних досліджень для побудови емпіричної моделі енергії зубцевих коливань $\sigma_{Езуб}$, яка враховує спільний вплив режимних чинників і параметрів бурильного інструмента.

Одним із методів побудови такої моделі є проведення досліджень коливань бурильної колони у промислових умовах.

На результати цих досліджень та їх аналіз впливають такі чинники: відсутність достовірної інформації про фізико-механічні характеристики гірських порід, що розбурюють, у відповідний момент часу; неможливість багаторазової зміни у заданому діапазоні факторів, які впливають на процес руйнування гірської породи; відсутність вимірної апаратури для реєстрації параметрів процесу взаємодії долота з гірською породою безпосередньо на вибої.

Більш надійним способом одержання достовірних результатів є стендові експериментальні дослідження. Під час їх проведення режим буріння і схема компонування бурильного інструмента мають фіксовані значення з можливістю їх зміни у певних межах.

Метою роботи є встановлення за результатами експериментальних досліджень багатофакторної емпіричної моделі енергії зубцевих коливань сталевих шарошкового долота $\sigma_{Езуб}$ під час буріння у гірських породах різної твердості.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Під час проведення досліджень сталевих шарошкових долот на буровому стенді Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу [58] для зміни параметрів бурильного інструмента використовували пристрої, конструкція яких дозволяла змінювати значення жорсткості та коефіцієнта демпфування пружного елемента незалежно одне від одного. Зміну жорсткості в інтервалі від 400 кН/м до 2500 кН/м здійснювали шляхом використання витих сталевих пружин стискання різних розмірів у пружному елементі пристрою. Коефіцієнт демпфування під час використання цих пружин є практично незмінним.

Для зміни коефіцієнта демпфування компонування бурильного інструмента використано гідравлічні поглиначі коливань Калінінського вагонобудівного заводу–Ленінградського інституту інженерів залізничного транспорту. Конструкція таких поглиначів з різною кількістю клапанних дросельних отворів забезпечує зміну коефіцієнта демпфування в інтервалі від 40 кН·с/м до 90 кН·с/м.

Дослідження зубцевих коливань шарошкового долота зі сталі проводили під час буріння у гірських породах — у блоках пісковіку воротищенської світи, складених із двох пропластків, твердість

яких за штампом $P_{ш}$ відповідно складала 1440 МПа та 2050 МПа. Постійними факторами під час проведення планованого експерименту були тип і діаметр сталевго тришарошкового долота та витрата промивальної рідини (води). Обробку результатів досліджень проводили із використанням математичної теорії планування експерименту.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Матрицю планування чотирифакторного експерименту із результатами досліджень енергії зубцевих коливань сталевго тришарошкового долота наведено у табл. 1.

3.1. Багатофакторна емпірична модель енергії зубцевих коливань для пісковику городищенської світи твердістю 1440 МПа

У таблиці 2 наведено результати експерименту, усереднені за режимними чинниками, а в табл. 3 — усереднені за параметрами бурильного інструмента. Підбір частинних емпіричних залежностей між змінними чинниками та енергією зубцевих коливань сталевго

ТАБЛИЦЯ 1. План чотирифакторного експерименту із результатами досліджень за твердості штампа $P_{ш}$, що дорівнює 1440 МПа та 2050 МПа.

TABLE 1. Plan of the four-factor experiment with research results at a stamp hardness of $P_{ш}$ equal to 1440 MPa and 2050 MPa.

Номер досліджу	n , хв ⁻¹	$F_{см}$, кН	C , кН/м	β , кН·с/м	$\sigma_{Езуб}$, Н	
					1440 МПа	2050 МПа
1 (17)	82	10	400	0,1	205,2	314,1
2 (18)	82	15	2500	40	333,2	459,4
3 (19)	82	20	800	70	262,2	442,7
4 (20)	82	25	1700	90	94,3	118,1
5 (21)	133	10	800	90	212,1	192,5
6 (22)	133	15	1700	70	131,1	202
7 (23)	133	20	400	40	164,4	181,8
8 (24)	133	25	2500	0,1	226,2	337,1
9 (25)	188	10	1700	40	381,1	351,2
10 (26)	188	15	800	0,1	306,8	382,4
11 (27)	188	20	2500	90	220,4	219,7
12 (28)	188	25	400	70	206,9	362,6
13 (29)	285	10	2500	70	360,3	220,4
14 (30)	285	15	400	90	587,2	491,6
15 (31)	285	20	1700	0,1	678,9	788,6
16 (32)	285	25	800	40	490,1	406,1

ТАБЛИЦЯ 2. Усереднення результатів експерименту $\sigma_{Езуб}$ за режимними чинниками ($P_u = 1440$ МПа).

TABLE 2. Averaging the experimental results $\sigma_{Езуб}$ by regime factors ($P_u = 1440$ МПа).

F_{cm} , кН	$n, \text{хв}^{-1}$				Сума	Середнє
	82	133	188	285		
10	205,2	212,1	381,1	360,3	1158,7	289,67
15	333,2	131,1	306,8	587,2	1358,3	339,57
20	262,2	164,4	220,4	678,9	1325,9	331,47
25	94,3	226,2	206,9	490,1	1017,5	254,37
Сума	894,9	733,8	1115,2	2116,5	4860,32	1215,08
Середнє	223,7	183,45	278,8	529,12	1215,08	303,77

ТАБЛИЦЯ 3. Усереднення результатів планованого експерименту $\sigma_{Езуб}$ за параметрами бурильного інструмента ($P_u = 1440$ МПа).

TABLE 3. Averaging planned result of the experimental results $\sigma_{Езуб}$ on the parameters of the drilling tool ($P_u = 1440$ МПа).

β , кН·с/м	$C, \text{кН/м}$				Сума	Середнє
	400	800	1700	2500		
0,1	205,2	306,8	678,9	226,2	1417,1	354,275
40	164,4	490,1	381,1	333,2	1368,8	342,2
70	206,9	262,2	131,1	360,3	960,5	240,105
90	587,2	212,1	94,3	220,4	1114	278,5
Сума	1163,7	1271,2	1285,4	1140,1	4860,32	1215,08
Середнє	290,93	317,8	321,35	285,0	1215,08	303,77

шарошкового долота та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних табл. 1 наведено у табл. 4.

У таблиці 4 позначено: $P = 1 - \alpha$ — імовірність існування кореляційної залежності між змінними чинниками та величиною $\sigma_{Езуб}$, σ_0 — величина основної похибки у разі апроксимації експериментальних даних відповідними емпіричними залежностями; $\langle \sigma_{Езуб} \rangle = 303,77$ Н — середньоквадратична величина (СКВ) енергії зубцевих коливань згідно табл. 2 і 3.

Оцінку впливу незалежного змінного фактора на величину $\sigma_{Езуб}$ характеризують відношенням її максимального значення до мінімального:

$$\frac{\sigma_{Езуб \max}}{\sigma_{Езуб \min}}$$

ТАБЛИЦЯ 4. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних ($P_u = 1440$ МПа).**TABLE 4.** Specification of partial empirical dependences and verification of the conditions of satisfactory approximation of experimental data ($P_u = 1440$ МПа).

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибірковий коефіцієнт кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{E_{зуб}} \rangle$
$n, \text{хв}^{-1}$	$\sigma_{E_{зуб}}(n) = 356,45 - 2,6684n + 0,0115n^2$	0,9885 $0,98 < P < 0,99$	$16,76 < 30,4$
$F_{cm}, \text{кН}$	$\sigma_{E_{зуб}}(F) = -5,58 + 42,17F - 1,27F^2$	0,9994 $0,998 < P < 0,999$	$1,42 < 30,4$
$C, \text{кН/м}$	$\sigma_{E_{зуб}}(C) = 259,79 - 0,0961C + 3,45 \cdot 10^{-5}C^2$	0,99 $P = 0,99$	$2,49 < 30,4$
$\beta, \text{кН} \cdot \text{с/м}$	$\sigma_{E_{зуб}}(\beta) = 353,653 + 6,1924\beta - 0,229\beta^2 + 0,00168\beta^3$	0,9873 $0,98 < P < 0,99$	$1,49 < 30,4$

Для частоти обертання сталевого шарошкового долота величина цього відношення становить 2,36; для коефіцієнта демпфування — 1,48; для осевого навантаження — 1,33; для жорсткості — 1,13. За імовірності існування частинних емпіричних залежностей між зовнішніми незалежними змінними чинниками та $\sigma_{E_{зуб}}$, меншої за 0,95, застосовують методику нейтралізації більш впливових чинників [59]. Згідно таблиці 4 імовірність існування частинних емпіричних залежностей між зовнішніми незалежними змінними чинниками та $\sigma_{E_{зуб}}$ більша за 0,98 і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими.

Умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{E_{зуб}} \rangle$ також виконується. За таких значень емпіричного коефіцієнта кореляції та гладких «розумних» кривих нейтралізація більш впливових чинників не потрібна. Якщо кожна комбінація значень змінних чинників зустрічається одноразово, то загальну багатовимірну функцію можна подати у вигляді добутку окремих залежностей від змінних факторів — $\sigma_{E_{зуб}} = B_{cp} f(n) f(F_{cm}) f(\beta) f(C)$. Частинні залежності між кожним чинником (за експериментальними даними у табл. 1–3) та $\sigma_{E_{зуб}}$ наведено у табл. 5.

Отже, рівняння багатофакторної емпіричної моделі енергії зубцевих коливань $\sigma_{E_{зуб}}$ шарошкового долота зі сталі:

$$\begin{aligned} \sigma_{E_{зуб}} = B_{cp} f(n) f(F_{cm}) f(\beta) f(C) = B_{cp} (356,45 - 2,6684n + 0,0115n^2) \times \\ \times (-5,58 + 42,17F - 1,27F^2) (259,79 - 0,0961C + 3,45 \cdot 10^{-5}C^2) \times \\ \times (353,653 + 6,1924\beta - 0,229\beta^2 + 0,00168\beta^3). \end{aligned} \quad (1)$$

ТАБЛИЦЯ 5. Частинні емпіричні залежності ($P_u = 1440$ МПа).

TABLE 5. Partial empirical dependences ($P_u = 1440$ МПа).

Показники	Значення			
Частота обертання долота n , хв ⁻¹	82	133	188	285
Усереднені експериментальні значення $\sigma_{Езуб}(n)$	223,7	183,45	278,8	529,12
$\sigma_{Езуб}(n) = 356,45 - 2,6684n + 0,0115n^2$	214,97	204,98	261,25	530,04
Осьове статичне навантаження на долото $F_{ст}$, кН	10	15	20	25
Усереднені експериментальні значення $\sigma_{Езуб}(F)$	289,67	339,57	331,47	254,37
$\sigma_{Езуб}(F) = -5,58 + 42,17F - 1,27F^2$	289,12	341,22	329,82	254,92
Жорсткість бурильного інструменту C , кН/м	400	800	1700	2500
Усереднені експериментальні значення $\sigma_{Езуб}(C)$	290,9	317,8	321,3	285
$\sigma_{Езуб}(C) = 259,79 - 0,0961C + 3,45 \cdot 10^{-5}C^2$	292,71	314,59	323,45	284,41
Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Усереднені експериментальні значення $\sigma_{Езуб}(\beta)$	354,27	342,2	240,1	278,5
$\sigma_{Езуб}(\beta) = 353,653 + 6,1924\beta - 0,229\beta^2 + 0,00168\beta^3$	354,43	342,47	241,26	280,79

У таблиці 6 наведено значення коефіцієнтів B_i , визначених за формулою:

$$B_i = \frac{\sigma_{Езубi}}{f(F_{cmi})f(n_i)f(\beta_i)f(C_i)}, \quad (2)$$

де $\sigma_{Езубi}$ — значення СКВ енергії зубцевих коливань осьової динаміч-

ТАБЛИЦЯ 6. Значення коефіцієнта B ($P_u = 1440$ МПа).

TABLE 6. The value of the coefficient B ($P_u = 1440$ МПа).

№ дослідю	1	2	3	4	5	6	7	8
$10^8 \cdot B$	3,184	4,664	4,872	1,895	4,052	2,402	2,426	4,294
№ дослідю	9	10	11	12	13	14	15	16
$10^8 \cdot B$	4,555	3,087	3,203	4,399	3,426	3,95	3,387	3,368

ТАБЛИЦЯ 7. Статистичні характеристики вибірки та результати відбраковування артефактів ($P_u = 1440$ МПа).**TABLE 7.** Statistical characteristics of the sample and the results of rejecting artefacts ($P_u = 1440$ MPa).

$10^8 \cdot B_{cp}$	$10^{16} \cdot D_B$	$10^8 \cdot \sigma_B$	K_{cm}	Відбраковані значення	$10^8 \cdot B'_{cp}$	$10^{16} \cdot D'_B$	$10^8 \cdot \sigma'_B$
3,5728	0,7694	0,8771	1,75 ($\beta = 0,9$)	1,895	3,6846	0,6099	0,781

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

ної сили за даними табл. 1, яка відповідає i -тому досліді; $f(n_i)f(F_{cmi}) \times f(\beta_i)f(C_i)$ — добуток частинних емпіричних залежностей змінних чинників, величини яких відповідають умовам i -того досліді табл. 1.

У таблиці 7 наведено статистичні характеристики вибірки значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B)

$$\Delta = K_{cm} \sigma_B \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,8771 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{17}{16}} = 1,5822 \cdot 10^{-8} \rightarrow (1,9906 - 5,155) \cdot 10^{-8}. \quad (3)$$

Величина коефіцієнта варіації

$$K_{var} = \frac{\sigma'_B}{B'_{cp}} \cdot 100\% = \frac{0,781 \cdot 10^{-8}}{3,6846 \cdot 10^{-8}} \cdot 100\% = 21,2\%. \quad (4)$$

Це значення знаходиться в інтервалі 10–33%, тобто сукупність однорідна і середнє значення $3,6846 \cdot 10^{-8}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності. У таблиці 8 наведено значення СКВ енергії зубцевих коливань осьової динамічної сили, визначені за експериментальними даними і за формулою (1), та величини відносної похибки (ВП) між ними. Статистичні характеристики сукупності значень відносної похибки без результатів 4-го досліді, відбракованих за табл. 7: середнє значення — 19,4; дисперсія D — 209,4812.

Частинні емпіричні залежності $\sigma_{Eзуб}(n) = f(n)$, $\sigma_{Eзуб}(F) = f(F_{cm})$, $\sigma_{Eзуб}(C) = f(C)$, $\sigma_{Eзуб}(\beta) = f(\beta)$ за даними табл. 5 зображено на рис. 1.

3.2. Багатофакторна емпірична модель енергії зубцевих коливань для пісковуку городищенської світи твердістю 2050 МПа

У таблиці 9 наведено результати експерименту, усереднені за режимними чинниками, а в табл. 10 — усереднені за параметрами бу-

ТАБЛИЦЯ 8. Середньоквадратичне відхилення енергії зубцевих коливань осьової динамічної сили на долоті, визначені за експериментальними даними і за формулою (1), та величина відносної похибки між ними ($P_u = 1440$ МПа).

TABLE 8. Standard deviation energy of tooth oscillations of axial dynamic force on the bit, determined by experimental data and by formula (1), and the magnitude of the relative error between them ($P_u = 1440$ МПа).

Номер досліджу	n , хв ⁻¹	F_{cm} , кН	C , кН/м	β , кН·с/м	СКВ $\sigma_{Eзуб}$	СКВ $\sigma_{Eзуб}(1)$	ВП, %
1	82	10	400	0,1	205,2	237,4	-15,7
2	82	15	2500	40	333,2	263,3	21
3	82	20	800	70	262,2	198,3	24,4
4	82	25	1700	90	94,3	183,4	-94,5
5	133	10	800	90	212,1	192,9	9,05
6	133	15	1700	70	131,1	201,1	-53,4
7	133	20	400	40	164,4	249,8	-51,95
8	133	25	2500	0,1	226,2	194,1	14,2
9	188	10	1700	40	381,1	308,3	19,1
10	188	15	800	0,1	306,8	366,2	-19,4
11	188	20	2500	90	220,4	253,6	-15,1
12	188	25	400	70	206,9	173,3	16,2
13	285	10	2500	70	360,3	387,4	-7,5
14	285	15	400	90	587,2	547,7	6,7
15	285	20	1700	0,1	678,9	738,6	-8,8
16	285	25	800	40	490,1	536,2	-9,4

рильного інструмента.

Підбір частинних емпіричних залежностей між змінними чинниками та енергією зубцевих коливань сталевого шарошкового долота та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних (табл. 1) наведено у табл. 11.

У таблиці 11 позначено: $P = 1 - \alpha$ — імовірність існування кореляційної залежності між змінними чинниками та величиною $\sigma_{Eзуб}$; σ_0 — величина основної похибки апроксимації експериментальних даних відповідними емпіричними залежностями; $\langle \sigma_{Eзуб} \rangle = 341,89$ Н — СКВ енергії зубцевих коливань за табл. 9 і 10.

За табл. 11 імовірність існування частинних емпіричних залежностей між зовнішніми незалежними змінними чинниками та $\sigma_{Eзуб}$ більша за 0,98 і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умова існування частинних емпіричних залежностей

$$\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{Eзуб} \rangle = 34,2$$

також виконується. За таких значень емпіричного коефіцієнта ко-

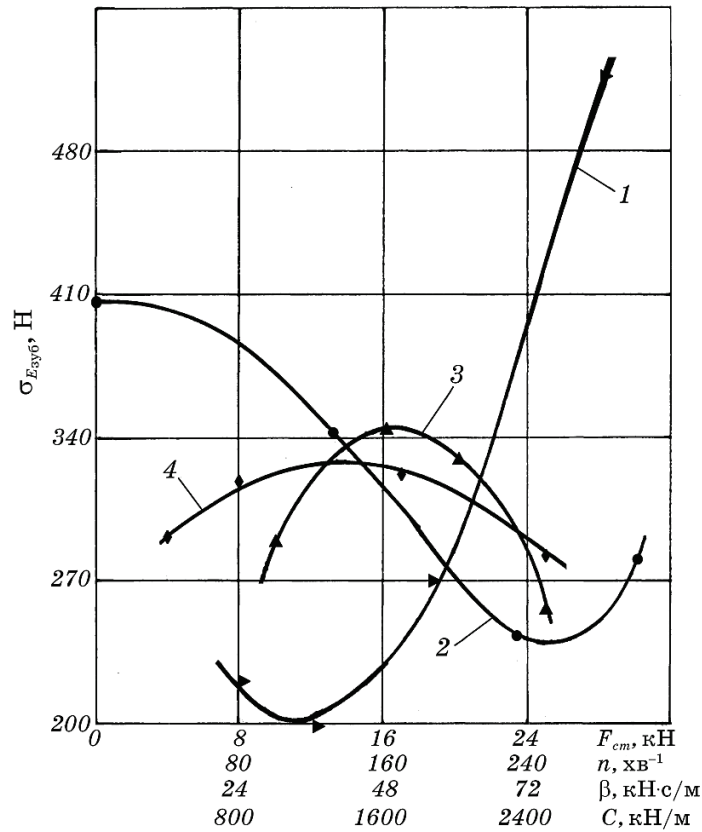


Рис. 1. Частинні емпіричні залежності за $P_w = 1440$ МПа, одержані методом планованого експерименту: 1(▶) — $\sigma_{Eзуб}(n) = f(n)$, 2(●) — $\sigma_{Eзуб}(\beta) = f(\beta)$, 3(▲) — $\sigma_{Eзуб}(F) = f(F_{cm})$, 4(◆) — $\sigma_{Eзуб}(C) = f(C)$.

Fig. 1. Partial empirical dependences at $P_w = 1440$ МПа, obtained by the method of the planned experiment: 1(▶) — $\sigma_{Eзуб}(n) = f(n)$, 2(●) — $\sigma_{Eзуб}(\beta) = f(\beta)$, 3(▲) — $\sigma_{Eзуб}(F) = f(F_{cm})$, 4(◆) — $\sigma_{Eзуб}(C) = f(C)$.

реляції та гладких «розумних» кривих нейтралізація більш впливових чинників не потрібна. Частинні залежності між кожним чинником, одержані за експериментальними даними табл. 1, та $\sigma_{Eзуб}$ наведено у табл. 12.

Отже, рівняння багатофакторної емпіричної моделі енергії зубцевих коливань сталевого шарошкового долота $\sigma_{Eзуб}$ матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{Eзуб} = B_{cp} f(n) f(F_{cm}) f(\beta) f(C) = B_{cp} (1294,59 - 19,755n + 0,01136n^2 - \\ - 0,0001909n^3) (-300,319 + 75,456F - 2,165F^2) \times \\ \times (299,151 + 0,1081C + 4,15 \cdot 10^{-5} C^2) (453,989 - 2,6332\beta - 0,00538\beta^2). \end{aligned} \quad (5)$$

ТАБЛИЦЯ 9. Усереднення результатів планового експерименту $\sigma_{E_{зуб}}$ за режимними чинниками ($P_u = 2050$ МПа).

TABLE 9. Averaging the results of the planned experiment $\sigma_{E_{зуб}}$ by regime factors ($P_u = 2050$ МПа).

F_{cm} , кН	$n, \text{хв}^{-1}$					Сума	Середнє
	82	133	188	285			
10	314,1	192,5	351,2	220,4	1078,2	269,55	
15	459,4	202	382,4	491,6	1535,4	383,85	
20	442,7	181,8	219,7	788,6	1632,8	408,2	
25	118,1	337,1	362,6	406,1	1223,9	305,975	
Сума	1334,3	913,4	1315,9	1906,7	5470,3	1367,575	
Середнє	333,575	228,35	328,975	476,675	1367,575	341,89375	

ТАБЛИЦЯ 10. Усереднення результатів планового експерименту $\sigma_{E_{зуб}}$ за параметрами бурильного інструмента ($P_u = 2050$ МПа).

TABLE 10. Averaging planned result of the experimental results $\sigma_{E_{зуб}}$ on the parameters of the drilling tool ($P_u = 2050$ МПа).

$\beta,$ кН·с/м	$C, \text{кН/м}$				Сума	Середнє
	400	800	1700	2500		
0,1	314,1	382,4	788,6	337,1	1822,2	455,55
40	181,8	406,1	351,2	459,4	1398,5	349,625
70	362,6	442,7	202	220,4	1227,7	306,925
90	491,6	192,5	118,1	219,7	1021,9	255,475
Сума	1350,1	1423,7	1459,9	1236,6	5470,3	1367,575
Середнє	337,525	355,925	364,975	309,15	1367,575	341,89375

У таблиці 13 наведено значення коефіцієнта B_i ($i = 17-32$), визначені за формулою (2).

У таблиці 14 наведено статистичні характеристики вибірки значень B_i та результати визначення артефактів

$$\Delta = K_{cm} \sigma_B \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,7077 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{17}{16}} = 1,2766 \cdot 10^{-8} \rightarrow (1,3 - 3,8532) \cdot 10^{-8}. \quad (6)$$

Величина коефіцієнта варіації

$$K_{var} = \frac{\sigma'_B}{B'_{cp}} \cdot 100\% = \frac{0,6287 \cdot 10^{-8}}{2,6673 \cdot 10^{-8}} \cdot 100\% = 23,6\%. \quad (7)$$

Це значення знаходиться в інтервалі від 11 % до 33 %, тобто сукуп-

ТАБЛИЦЯ 11. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірки умов задовільної апроксимації експериментальних даних ($P_u = 2050$ МПа).

TABLE 11. Specification of partial empirical dependences and verification the conditions of satisfactory approximation of experimental data ($P_u = 2050$ МПа).

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибірковий коефіцієнт кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{E_{зуб}} \rangle$
$n, \text{хв}^{-1}$	$\sigma_{E_{зуб}}(n) = 1294,59 - 19,755n + 0,1136n^2 - 0,0001909n^3$	0,9856 $0,98 < P < 0,99$	$2,76 < 34,2$
$F_{cm}, \text{кН}$	$\sigma_{E_{зуб}}(F) = -300,319 + 75,456F - 2,165F^2$	0,9975 $0,99 < P < 0,998$	$4,73 < 34,2$
$C, \text{кН/м}$	$\sigma_{E_{зуб}}(C) = 299,151 + 0,1081C - 4,15 \cdot 10^{-5}C^2$	0,9994 $0,999 < P < 1$	$2,29 < 34,2$
$\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$\sigma_{E_{зуб}}(\beta) = 453,989 - 2,6332\beta + 0,00538\beta^2$	0,9952 $0,99 < P < 0,998$	$8,3 < 34,2$

ність однорідна і середнє значення $3,6846 \cdot 10^{-8}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

У таблиці 15 наведено значення СКВ енергії зубцевих коливань осьової динамічної сили, визначені за експериментальними даними і за формулою (5), та величина відносної похибки (ВП) між ними.

Статистичні характеристики сукупності значень відносної похибки без результатів 20-го дослідження, відбракованих за табл. 14, дорівнюють: середнє значення — 22,5; дисперсія D — 193,4392.

Частинні емпіричні залежності $\sigma_{E_{зуб}}(n) = f(n)$, $\sigma_{E_{зуб}}(F) = f(F_{cm})$, $\sigma_{E_{зуб}}(C) = f(C)$, $\sigma_{E_{зуб}}(\beta) = f(\beta)$ за даними табл. 12 зображено на рис. 2.

Частинну емпіричну залежність $\sigma_{E_{зуб}}(n) = f(n)$ для пропластка твердістю 1440 МПа представлено параболою, яка характеризується наявністю мінімуму $\sigma_{E_{зуб\min}}$.

Мінімальне значення $\sigma_{E_{зуб\min}} = 201$ Н знаходиться у межах діапазону зміни частоти обертання і відповідає значенню $n = 116 \text{хв}^{-1}$. Частинна емпірична залежність $\sigma_{E_{зуб}}(n) = f(n)$ для пропластка твердістю 2050 МПа — поліном третього степеня, який характеризується наявністю мінімаксів. Мінімальне значення $\sigma_{E_{зуб\min}} = 226,8$ Н знаходиться у межах діапазону зміни частоти обертання і відповідає значенню $n = 129 \text{хв}^{-1}$, тобто зі збільшенням твердості породи мінімум енергії зубцевих коливань переміщується в область більш високих значень частоти обертання сталевого шарошккового долота.

Частинні емпіричні залежності $\sigma_{E_{зуб}}(F)$ для обох пропластків представлено параболою, які характеризуються наявністю максимуму $\sigma_{E_{зуб\max}}$. Для пропластка твердістю 1440 МПа це значення складає 344,5 Н і відповідає навантаженню 16,6 кН, для твердості 2050 МПа

ТАБЛИЦЯ 12. Частинні емпіричні залежності ($P_u = 2050$ МПа).

TABLE 12. Partial empirical dependences ($P_u = 2050$ МПа).

Показники	Значення			
Частота обертання долота n , хв^{-1}	82	133	188	285
Усереднені експериментальні значення $\sigma_{Eзуб}(n)$	333,575	228,35	328,975	476,675
$\sigma_{Eзуб}(n) = 1294,59 - 19,755n + 0,1136n^2 - 0,0001909n^2$	333,27	227,53*	327,26	472,41
Осьове статичне навантаження на долото $F_{ст}$, кН	10	15	20	25
Усереднені експериментальні значення $\sigma_{Eзуб}(F)$	269,55	383,85	408,2	305,975
$\sigma_{Eзуб}(F) = -300,319 + 75,456F - 2,165F^2$	267,74	389,396	402,8*	307,956
Жорсткість бурильного інструменту C , кН/м	400	800	1700	2500
Усереднені експериментальні значення $\sigma_{Eзуб}(C)$	337,525	355,925	364,975	309,15
$\sigma_{Eзуб}(C) = 299,151 + 0,1081C + 4,15 \cdot 10^{-5}C^2$	335,751	359,071	363,586*	310,026
Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Усереднені експериментальні значення $\sigma_{Eзуб}(\beta)$	455,55	349,625	306,925	255,475
$\sigma_{Eзуб}(\beta) = 453,989 - 2,6332\beta + 0,00538\beta^2$	453,73	357,269	296,027	260,579

відповідно одержано $\sigma_{Eзуб\max} = 410,5$ Н, коли $F_{ст} = 18,1$ кН, тобто зі збільшенням твердості породи максимум енергії зубцевих коливань сталевого шарошкового долота переміщується в область більш високих значень осьового статичного навантаження на долото.

Частинні емпіричні залежності $\sigma_{Eзуб}(C) = f(C)$ для обох пропластків представлено параболami, які характеризуються наявністю максимумів $\sigma_{Eзуб\max}$. Для пропластка твердістю 1440 МПа це значення

ТАБЛИЦЯ 13. Значення коефіцієнта B ($P_u = 2050$ МПа).

TABLE 13. The value of the coefficient B ($P_u = 2050$ МПа).

№ досліду	17	18	19	20	21	22	23	24
$10^8 \cdot B$	2,3107	3,1960	3,099	1,2146	3,3772	2,1183	1,6537	3,4201
№ досліду	25	26	27	28	29	30	31	32
$10^8 \cdot B$	3,0856	2,3391	2,063	3,6198	1,8987	3,0545	2,5986	2,1759

ТАБЛИЦЯ 14. Статистичні характеристики вибірки та результати відбракування артефактів ($P_u = 2050$ МПа).**TABLE 14.** Statistical characteristics of the sample and the results of rejecting artefacts ($P_u = 2050$ МПа).

$10^8 \cdot B_{cp}$	$10^{16} \cdot D_B$	$10^8 \cdot \sigma_B$	K_{cm}	Відбраковані значення	$10^8 \cdot B'_{cp}$	$10^{16} \cdot D'_B$	$10^8 \cdot \sigma'_B$
2,5766	0,5009	0,7077	1,75 ($\beta = 0,9$)	1,2146	2,6673	0,3953	0,6287

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

складає 326,7 Н і відповідає жорсткості 1394 кН/м, для твердості 2050 МПа — $\sigma_{Eзуб\max} = 369,6$ Н, коли $C = 1303$ кН/м. Зі збільшенням твердості породи спостерігається незначне зменшення (на 6,5%) значення жорсткості для максимуму енергії.

Частинна емпірична залежність $\sigma_{Eзуб}(\beta) = f(\beta)$ для пропластка твердістю 1440 МПа — поліном третього степеня, який характеризується

ТАБЛИЦЯ 15. Середньоквадратичне відхилення енергії зубцевих коливань осьової динамічної сили на долоті, визначені за експериментальними даними і за формулою (5), та величина відносної похибки між ними ($P_u = 2050$ МПа).**TABLE 15.** Standard deviation energy of tooth oscillations of axial dynamic force on the bit, determined by experimental data and by formula (5), and the magnitude of the relative error between them ($P_u = 2050$ МПа).

Номер досліджу	n , хв ⁻¹	F_{cm} , кН	C , кН/м	β , кН·с/м	СКВ $\sigma_{Eзуб}$	СКВ $\sigma_{Eзуб}(5)$	ВП, %
17	82	10	400	0,1	314,1	362,6	-15,4
18	82	15	2500	40	459,4	383,4	16,5
19	82	20	800	70	442,7	380,6	14
20	82	25	1700	90	118,1	259,4	-119,6
21	133	10	800	90	192,5	152	21
22	133	15	1700	70	202	254,3	-25,9
23	133	20	400	40	181,8	293,2	-61,3
24	133	25	2500	0,1	337,1	262,9	22
25	188	10	1700	40	351,2	303,6	13,5
26	188	15	800	0,1	382,4	436	-14
27	188	20	2500	90	219,7	284	-29,3
28	188	25	400	70	362,6	267,2	26,3
29	285	10	2500	70	220,4	309,6	-40,5
30	285	15	400	90	491,6	429,3	12,7
31	285	20	1700	0,1	788,6	809,4	-2,6
32	285	25	800	40	406,1	497,7	-22,6

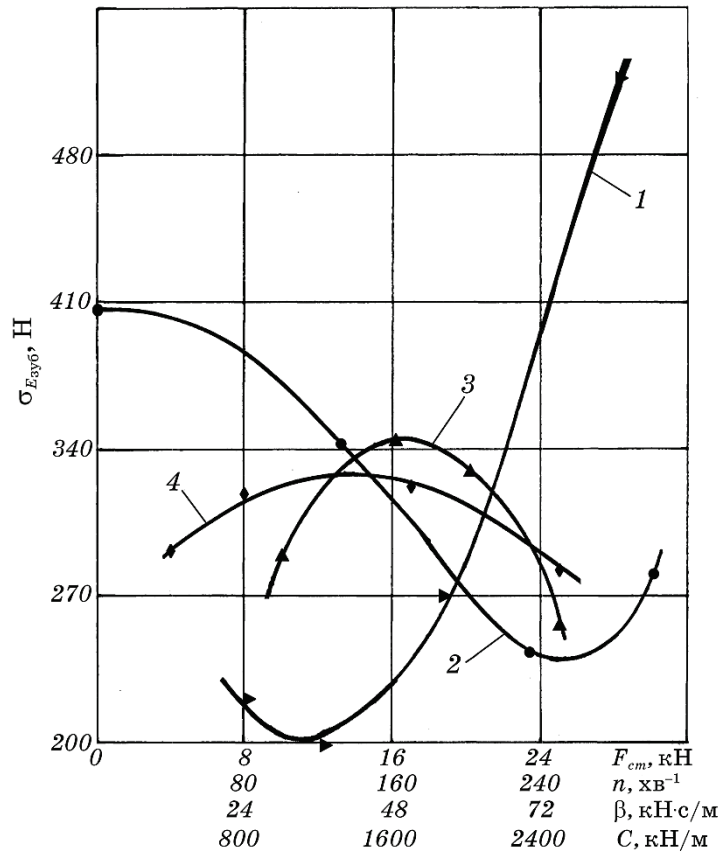


Рис. 2. Частинні емпіричні залежності за $P_u = 2050$ МПа, одержані методом планованого експерименту: 1(▶) — $\sigma_{Ezub}(n) = f(n)$, 2(●) — $\sigma_{Ezub}(\beta) = f(\beta)$, 3(▲) — $\sigma_{Ezub}(F) = f(F_{cm})$, 4(◆) — $\sigma_{Ezub}(C) = f(C)$.

Fig. 2. Partial empirical dependences at $P_u = 2050$ МПа, obtained by the method of the planned experiment: 1(▶) — $\sigma_{Ezub}(n) = f(n)$, 2(●) — $\sigma_{Ezub}(\beta) = f(\beta)$, 3(▲) — $\sigma_{Ezub}(F) = f(F_{cm})$, 4(◆) — $\sigma_{Ezub}(C) = f(C)$.

наявністю мінімаксів. Мінімальне значення $\sigma_{Ezubmin} = 238$ Н знаходиться у межах діапазону зміни коефіцієнта демпфування і відповідає значенню $\beta = 74$ кН·с/м. Частинну емпіричну залежність $\sigma_{Ezub}(\beta) = f(\beta)$ для пропластка твердістю 2050 МПа представлено параболою, яка характеризується наявністю мінімуму $\sigma_{Szubmin}$. Мінімальне значення $\sigma_{Ezubmin} = 132$ Н знаходиться за межами зміни діапазону коефіцієнта демпфування і відповідає значенню $\beta = 245$ кН·с/м, тобто зі збільшенням твердості породи мінімум енергії зубцевих коливань сталевого шарошкового долота зміщується в область більш високих значень коефіцієнта β .

За результатами досліджень, наведених у [60], одним із головних завдань буріння свердловин є визначення витрати енергії на руйнування гірської породи сталевим шарошковим долотом. Цю витрату називають енергоємністю процесу буріння W_{Π} .

Порівняльну оцінку впливу різних факторів на енергоємність процесу руйнування гірських порід сталевим шарошковим долотом здійснюють за величиною питомої об'ємної роботи W_{Π} , яку витрачають на руйнування 1 см^3 гірської породи.

У роботі [60] встановлено, що за однакових умов проведення експерименту для пропластка твердістю 1440 МПа мінімум енергоємності досягають, коли $C = 1375 \text{ кН/м}$, а максимум, коли $\beta = 40 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$. Для пропластка твердістю 2050 МПа мінімум енергоємності досягають, коли $C = 1602 \text{ кН/м}$, а максимум, коли $\beta = 64 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$.

Порівнюючи залежності $\sigma_{Eзуб}(C) = f(C)$ і $W_{\Pi} = f(C)$ для пропластка твердістю 1440 МПа можна зазначити, що мінімум енергоємності і максимум енергії зубцевих коливань сталевих шарошкового долота одержані за практично однакового значення жорсткості ($1375 \approx 1394 \text{ кН/м}$). Для пропластка твердістю 2050 МПа відхилення між значеннями $C = 1602 \text{ кН/м}$ мінімуму енергоємності і $C = 1303 \text{ кН/м}$ максимуму енергії зубцевих коливань становить 18,7 %. Це відхилення знаходиться у межах відносної похибки між експериментальними даними і значеннями багатфакторної емпіричної моделі енергії зубцевих коливань сталевих шарошкового долота, середнє значення якої 22,5 %.

Відмінність між значеннями коефіцієнта демпфування мінімумів залежностей $\sigma_{Eзуб}(\beta) = f(\beta)$ і $W_{\Pi} = f(\beta)$ також пояснюється випадковою похибкою між експериментальними даними і значеннями багатфакторної емпіричної моделі. У роботі [60] встановлено, що вплив коефіцієнта демпфування на енергоємність процесу буріння є несуттєвим і знаходиться в межах відносної похибки між експериментальними даними і значеннями багатфакторної емпіричної моделі енергоємності процесу руйнування гірських порід сталевим шарошковим долотом. Тому дослідження цього процесу доцільно проводити за трьома параметрами: осьовим статичним навантаженням на долото, частотою обертання долота і жорсткістю бурильного інструмента.

4. ВИСНОВКИ

1. Методом раціонального планування експерименту встановлено багатфакторні емпіричні моделі, які описують залежності між енергією зубцевих коливань осьової динамічної сили на долоті та осьовим статичним навантаженням на вибої, частотою обертання долота, жорсткістю і коефіцієнтом демпфування сталевих бурильного інструмента. Середнє значення відносної похибки під час ви-

користання моделі для пропластка твердістю 1440 МПа складає 19,4 %, для пропластка твердістю 2050 МПа — 22,5 %.

2. Імовірність існування частинних емпіричних залежностей $\sigma_{Езуб}(n) = f(n)$, $\sigma_{Езуб}(\beta) = f(\beta)$, $\sigma_{Езуб}(F) = f(F_{cm})$, $\sigma_{Езуб}(C) = f(C)$ перевищує 0,98.

3. Зміною марки матеріялу та його фізико-механічних властивостей, конструкції демпфера та/або режиму буріння можна регулювати процес руйнування гірської породи сталевими шарошковими долотами. Використання у компонованні бурильного інструмента пристроїв, які змінюють його жорсткість, дозволяє, не змінюючи режимних параметрів процесу буріння, зменшувати енергоємність процесу руйнування гірської породи сталевим шарошковим долотом. Наслідком цього є зменшення енергетичних затрат на будівництво нафтових і газових свердловин та зниження їхньої вартості.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Guangjian Dong and Ping Chen, *Shock and Vibration*, **2016**, Article ID 7418635 (2016).
2. Fushen Ren and Baojin Wang, *JVE*, **19**, Iss. 7: 4866 (2017).
3. Я. С. Гриджук, І. І. Чудик, А. С. Величкович, А. В. Андрусак, *Східно-Європейський журнал передових технологій*, **1**, № 7(97): 6 (2019).
4. A. S. Velichkovich, *Chem. Petrol. Eng.*, **43**: 458 (2007).
5. M. Dutkiewicz, I. Gołębiewska, I. Shatskyi, V. Shopa and A. Velychkovych, *22nd Int. Conf. on Innovative Manufacturing Engineering and Energy (July 24, 2018)*, *MATEC Web of Conferences*, vol. 178, Article Number 06010.
6. A. Velychkovych, I. Petryk, and L. Ropyak, *Shock and Vibration*, **2020**, Article ID 3292713 (2020).
7. В. М. Мойсшин, О. О. Слабий, *Металофіз. новітні технол.*, **40**, № 4: 541 (2018).
8. К. Г. Левчук, *SOCAR Proceedings*, № 2: 23 (2017).
9. V. Moisyshyn and K. Levchuk, *Oil and Gas Science and Technology*, **72**, No. 5, Article Number 27 (2017).
10. К. Г. Левчук, *Металофіз. новейшие технол.*, **40**, № 5: 701 (2018).
11. I. Shatskyi and V. Perepichka, *Problem of Dynamics of an Elastic Rod with Decreasing Function of Elastic-Plastic External Resistance. Dynamical Systems in Applications* (Ed. J. Awrejcewicz) (Springer Proceedings in Mathematics and Statistics: DSTA: 2017), vol. 249, p. 335.
12. I. I. Vytvytskyi, M. V. Seniushkovych and I. P. Shatskyi, *Науковий вісник НГУ*, № 5: 29 (2017).
13. I. Shatskyi, A. Velychkovych, I. Vytvytskyi, and M. Seniushkovych, *Eng. Solid Mech.*, No. 7: 355 (2019).
14. Т. О. Прыхорівська, S. S. Chaplinskiy, and I. O. Kudriavtsev, *Petrol. Expl. Develop.*, **42**, No. 6: 812 (2015).
15. Т. А. Пригоровская, С. С. Чаплинский, *Нефтяное хозяйство*, № 1: 38 (2018).
16. Т. Прыхорівська, *Eng. Solid Mech.*, No. 6: 315 (2018).
17. О. О. Власій, В. В. Мазуренко, Л. Я. Роп'як, О. В. Рогаль, *Східно-*

- Європейський журнал передових технологій*, **1**, № 7(85): 25 (2017).
18. I. P. Shats'kyi, O. M. Lyskanych, and V. A. Kornuta, *Strength Mater.*, **48**, No. 3: 469 (2016).
 19. Л. Я. Роп'як, І. О. Шуляк, О. М. Богаченко, *Східно-Європейський журнал передових технологій*, **1**, № 5(59): 53 (2016).
 20. L. Ya. Ropyak, T. O. Pryhorovska, and K. H. Levchuk, *Progress in Physics of Metals*, **21**, No. 2: 274 (2020).
 21. Л. Я. Роп'як, В. В. Остапович, *Східно-Європейський журнал передових технологій*, **2**, № 5(80): 50 (2016).
 22. I. Chudyk, P. Raiter, Ya. Grydzhuk, and L. Yurych, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 1: 52 (2020).
 23. H. Xu, T. Shi, Z. Zhang, and B. Shi, *Mathematical Problems in Engineering*, **2014**, Article ID 287076 (2014).
 24. O. Onysko, L. Borushchak, V. Kopei, T. Lukan, I. Medvid and V. Vryukalo, *Int. Conf. 'New Technologies, Development and Applications III. NT 2020'*, *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 128, p. 720.
 25. I. Shatskyi, L. Ropyak, and A. Velychkovych, *Eng. Solid Mech.*, **8**, No. 4: 301 (2020).
 26. V. Kopei, O. Onysko, and V. Panchuk, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019 (June 11-14, 2019)* (Lutsk, Ukraine: 2019), *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, p. 149.
 27. O. R. Onysko, V. B. Kopey, and V. G. Panchuk, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., The Int. Conf. of the Carpathian Euro-Region Specialists in Industrial Systems (April 11-12, 2019)* (Baia Mare, Romania: 2019), vol. 749, Accession Number 012007 (2020).
 28. T. Pryhorovska and L. Ropyak, *Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers, (Sept. 6-8, 2019)* (Sozopol, Bulgaria: 2020), Accession Number 9019544: 493 (2019).
 29. O. Onysko, V. Kopei, I. Medvid, L. Pituley, and T. Lukan, *Int. Conf. 'New Technologies, Development and Applications III. NT 2020'*, *Lecture Notes in Mech. Eng.*, p. 432.
 30. O. Onysko, V. Kopei, V. Panchuk, I. Medvid, and T. Lukan, *Int. Conf. 'New Technologies, Development and Applications III. NT 2020'*, *Lecture Notes in Mech. Eng.*, p. 236.
 31. V. Martsynkovskyu, C. Kundera, and S. Gudkov, *Proc. Eng.*, **136**: 150 (2016).
 32. J. Gaft, V. Martsinkovsky, A. Zagorulko, and V. Gromyko, *Papers Presented at 17th Int. Conf. on Fluid Sealing (Apr. 8-10, 2003)* (York, UK: 2003), p. 505.
 33. L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. Ya. Ropyak, and A. V. Gorbatskii, *Soviet Mater. Sci.*, **23**, No. 3: 267 (1987).
 34. Л. С. Саакьян, А. П. Ефремов, Л. Я. Ропяк, *Защита металлов*, **25**, № 2: 185 (1989).
 35. Ю. Й. Стрілецький, В. А. Ровінський, О. В. Євчук, *Східно-Європейський журнал передових технологій*, **3**, № 9(81): 24 (2016).
 36. R. M. Tatsiy, O. Yu. Pazen, S. Ya. Vovk, L. Ya. Ropyak, and T. O. Pryhorovska, *J. Serb. Soc. Computational Mech.*, **13**, No. 2: 36 (2019).
 37. Н. А. Вольченко, А. И. Вольченко, Д. А. Вольченко, П. А. Поляков, В. Я. Малык, Д. Ю. Журавлев, В. С. Витвицкий, П. С. Красин, *Східно-Європейський журнал передових технологій*, **1**, № 5(97): 47 (2019).

38. І. П. Шацький, В. В. Перепічка, Л. Я. Роп'як, *Металоф. новітні технол.*, **42**, № 1: 69 (2020).
39. Z. Lipa, J. Peterka, P. Pokorný, Š. Václav, and I. Buranský, *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology in Trnava Slovak University of Technology in Bratislava*, **18**, Iss. 28: 27 (2010).
40. Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук, *Металоф. Новітні технол.*, **41**, № 5: 647 (2019).
41. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **53**, No. 3: 285 (2017).
42. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, N. Tarelnyk, and A. Kozachenko, *Mater. Sci. Forum*, **968**: 131 (2019).
43. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Defect and Diffusion Forum*, **273-276**: 525 (2008).
44. A. B. Melnick, V. K. Soolshenko, and K. H. Levchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 10: 1387 (2020).
45. I. Yu. Sahalianov, T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and Yu. I. Prylutskyu, *Ann. Phys.*, **398**: 80 (2018).
46. В. А. Пасічник, О. О. Хмуренко, *Східно-Європейський журнал передових технологій*, **4**, № 7(76): 15 (2015).
47. O. Vytyaz, I. Chudyk, and V. Mykhailiuk, *Study of the Effects of Drilling String Eccentricity in the Borehole on the Quality of Its Cleaning, in New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining* (Eds. G. Pivnyak, V. Bondarenko, and I. Kovalevska) (Taylor & Francis Group: CRC Press: 2015), p. 591.
48. V. Moisyshyn and K. Levchuk, *Min. Miner. Depos.*, **10**, Iss. 3: 65 (2016).
49. К. Г. Левчук, В. М. Мойсишин, І. В. Цідило, *Металоф. новітні технол.*, **38**, No. 12: 1655 (2016).
50. L. Belkacem, N. Abdelbaki, M. Gaceb, E. Bouali, and M. Bettayeb, *Chemical Engineering Transactions*, **61**: 1099 (2017).
51. E. I. Kryzhanivs'kyi, R. S. Yakym, L. E. Shmandrovs'kyi, and Yu. D. Petryna, *Mater. Sci.*, **46**, No. 5: 607 (2011).
52. R. S. Yakym and D. Yu. Petryna, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 5: 731 (2020).
53. L. Skitsa, T. Yatsyshyn, M. Liakh, and O. Sydorenko, *Min. Miner. Depos.*, **12**, Iss. 3: 71 (2018).
54. O. Mandryk, V. Artym, M. Shtohry, and V. Zaytsev, *Management Systems in Production Engineering*, **28**, Iss. 3: 168 (2020).
55. П. В. Балицкий, *Взаимодействие буровой колонны с забоем скважины* (Москва: Недра: 1975).
56. Р. А. Ганджумян, *Исследование параметров продольных колебаний нижней части буровой колонны при бурении шарошечными долотами с жесткой характеристикой привода* (Дис. канд. техн. наук) (Ереван: 1970).
57. В. М. Мойсишин, М. В. Лисканич, Р. А. Жовнірук, *Прикарпатський вісник НТШ. Число*, № 1(53): 81 (2019).
58. Б. Д. Борисевич, В. М. Мойсишин, Р. Б. Щербій, *Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ*, № 3(32): 23 (2009).
59. М. М. Протодьяконов, *Методика рационального планирования эксперимента* (Москва: Наука: 1970).

60. В. М. Мойсишин, Б. Д. Борисевич, Ю. Л. Гаврилів, С. А. Зінченко, *Стійкість і коливання бурильної колони* (Івано-Франківськ: Лілея-НВ: 2013).

REFERENCES

1. Guangjian Dong and Ping Chen, *Shock and Vibration*, **2016**, Article ID 7418635 (2016).
2. Fushen Ren and Baojin Wang, *JVE*, **19**, Iss. 7: 4866 (2017).
3. J. Grydzhuk, I. Chudyk, A. Velychkovych, and A. Andrusyak, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **1**, No. 7(97): 6 (2019) (in Ukrainian).
4. A. S. Velichkovich, *Chem. Petrol. Eng.*, **43**: 458 (2007).
5. M. Dutkiewicz, I. Gołębiowska, I. Shatskyi, V. Shopa and A. Velychkovych, *22nd Int. Conf. on Innovative Manufacturing Engineering and Energy (July 24, 2018), MATEC Web of Conferences*, vol. 178, Article Number 06010.
6. A. Velychkovych, I. Petryk, and L. Ropyak, *Shock and Vibration*, **2020**, Article ID 3292713 (2020).
7. V. M. Moisyshyn and O. O. Slabyi, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 4: 541 (2018) (in Ukrainian).
8. K. G. Levchuk, *SOCAR Proceedings*, No. 2: 23 (2017) (in Russian).
9. V. Moisyshyn and K. Levchuk, *Oil and Gas Science and Technology*, **72**, No. 5, Article Number 27 (2017).
10. K. G. Levchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 5: 701 (2018) (in Ukrainian).
11. I. Shatskyi and V. Perepichka, *Problem of Dynamics of an Elastic Rod with Decreasing Function of Elastic-Plastic External Resistance. Dynamical Systems in Applications* (Ed. J. Awrejcewicz) (Springer Proceedings in Mathematics and Statistics: DSTA: 2017), vol. 249, p. 335.
12. I. I. Vytvytskyi, M. V. Seniushkovych, and I. P. Shatskyi, *Naukovyy Visnyk NHU*, No. 5: 29 (2017).
13. I. Shatskyi, A. Velychkovych, I. Vytvytskyi, and M. Seniushkovych, *Eng. Solid Mechan.*, No. 7: 355 (2019).
14. T. O. Pryhorovska, S. S. Chaplinskiy, and I. O. Kudriavtsev, *Petrol. Expl. Develop.*, **42**, No. 6: 812 (2015).
15. T. A. Pryhorovska and S. S. Chaplinskiy, *Neftyanoe Khozyaystvo*, No. 1: 38 (2018) (in Russian).
16. T. Pryhorovska, *Eng. Solid Mechan.*, No. 6: 315 (2018).
17. O. Vlasiy, V. Mazurenko, L. Ropyak, and A. Rogal, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **1**, No. 7(85): 25 (2017) (in Ukrainian).
18. I. P. Shats'kyi, O. M. Lyskanych, and V. A. Kornuta, *Strength Mater.*, **48**, No. 3: 469 (2016).
19. L. Ropyak, I. Schuliar, and O. Bohachenko, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **1**, No. 5(59): 53 (2016) (in Ukrainian).
20. L. Ya. Ropyak, T. O. Pryhorovska, and K. H. Levchuk, *Progress in Physics of Metals*, **21**, No. 2: 274 (2020).
21. L. Ropyak and V. Ostapovych, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **2**, No. 5(80): 50 (2016) (in Ukrainian).

22. I. Chudyk, P. Raiter, Ya. Grydzhuk, and L. Yurych, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 1: 52 (2020).
23. H. Xu, T. Shi, Z. Zhang, and B. Shi, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Article ID 287076 (2014).
24. O. Onysko, L. Borushchak, V. Kopei, T. Lukan, I. Medvid and V. Vryukalo, *Int. Conf. 'New Technologies, Development and Applications III. NT 2020', Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 128, p. 720.
25. I. Shatskyi, L. Ropyak, and A. Velychkovych, *Eng. Solid Mech.*, 8, No. 4: 301 (2020).
26. V. Kopei, O. Onysko, and V. Panchuk, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019 (June 11-14, 2019) (Lutsk, Ukraine: 2019), Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, Cham*, p. 149.
27. O. R. Onysko, V. B. Kopey, and V. G. Panchuk, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., The Int. Conf. of the Carpathian Euro-Region Specialists in Industrial Systems (April 11-12, 2019) (Baia Mare, Romania: 2019)*, vol. 749, Accession Number 012007 (2020).
28. T. Pryhorovska and L. Ropyak, *Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers, (Sept. 6-8, 2019) (Sozopol, Bulgaria: 2020)*, Accession Number 9019544: 493 (2019).
29. O. Onysko, V. Kopei, I. Medvid, L. Pituley, and T. Lukan, *Int. Conf. 'New Technologies, Development and Applications III. NT 2020', Lecture Notes in Mech. Eng.*, p. 432.
30. O. Onysko, V. Kopei, V. Panchuk, I. Medvid, and T. Lukan, *Int. Conf. 'New Technologies, Development and Applications III. NT 2020', Lecture Notes in Mech. Eng.*, p. 236.
31. V. Martsynkowsky, C. Kundera, and S. Gudkov, *Proc. Eng.*, 136: 150 (2016).
32. J. Gaft, V. Martsinkovsky, A. Zagorulko, and V. Gromyko, *Papers Presented at 17th Int. Conf. on Fluid Sealing (Apr. 8-10, 2003) (York, UK: 2003)*, p. 505.
33. L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. Ya. Ropyak, and A. V. Gorbatskii, *Soviet Mater. Sci.*, 23, No. 3: 267 (1987).
34. L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, and L. Ya. Ropyak, *Zashchita Metallov*, 25, No. 2: 185 (1989) (in Russian).
35. Y. Striletskyi, V. Rovinskyi, and O. Yevchuk, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, No. 9(81): 24 (2016) (in Ukrainian).
36. R. M. Tatsiy, O. Yu. Pazen, S. Ya. Vovk, L. Ya. Ropyak, and T. O. Pryhorovska, *J. Serb. Soc. Computational Mechan.*, 13, No. 2: 36 (2019).
37. N. Volchenko, A. Volchenko, D. Volchenko, P. Poliakov, V. Malyk, D. Zhuravliov, V. Vytvytskyi, and P. Krasin, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, No. 5(97): 47 (2019) (in Russian).
38. I. P. Shatskyi, V. V. Perepichka, and L. Y. Ropyak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No. 1: 69 (2020) (in Ukrainian).
39. Z. Lipa, J. Peterka, P. Pokorný, Š. Václav, and I. Buranský, *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology in Trnava Slovak University of Technology in Bratislava*, 18, Iss. 28: 27 (2010).
40. L. Ya. Ropyak, I. P. Shatskyi, and M. V. Makoviichuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 5: 647 (2019) (in Ukrainian).
41. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*,

- 53, No. 3: 285 (2017).
42. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, N. Tarelnyk, and A. Kozachenko, *Mater. Sci. Forum*, **968**: 131 (2019).
 43. T. M. Radchenko and V. A. Tatarenko, *Defect and Diffusion Forum*, **273-276**: 525 (2008).
 44. A. B. Melnick, V. K. Soolshenko, and K. H. Levchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 10: 1387 (2020).
 45. I. Yu. Sahalianov, T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and Yu. I. Prylutsky, *Ann. Phys.*, **398**: 80 (2018).
 46. V. Pasichnyk and O. Khmurenko, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **4**, No. 7 (76): 15 (2015) (in Ukrainian).
 47. O. Vytyaz, I. Chudyk, and V. Mykhailiuk, *Study of the Effects of Drilling String Eccentricity in the Borehole on the Quality of Its Cleaning, in New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining* (Eds. G. Pivnyak, V. Bondarenko, and I. Kovalevska) (Taylor & Francis Group: CRC Press: 2015), p. 591.
 48. V. Moisyshyn and K. Levchuk, *Mining of Mineral Deposits*, **10**, Iss. 3: 65 (2016).
 49. K. G. Levchuk, V. M. Moisyshyn, and I. V. Tsidylo, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1655 (2016) (in Ukrainian).
 50. L. Belkacem, N. Abdelbaki, M. Gaceb, E. Bouali, and M. Bettayeb, *Chemical Engineering Transactions*, **61**: 1099 (2017).
 51. E. I. Kryzhanivs'kyi, R. S. Yakym, L. E. Shmandrovs'kyi, and Yu. D. Petryna, *Mater. Sci.*, **46**, No. 5: 607 (2011).
 52. R. S. Yakym and D. Yu. Petryna, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 5: 731 (2020).
 53. L. Skitsa, T. Yatsyshyn, M. Liakh, and O. Sydorenko, *Min. Miner. Depos.*, **12**, Iss. 3: 71 (2018).
 54. O. Mandryk, V. Artym, M. Shtohry, and V. Zaytsev, *Management Systems in Production Engineering*, **28**, Iss. 3: 168 (2020).
 55. P. V. Balitskiy, *Vzaimodeystvie Burilnoy Kolonny s Zaboem Skvazhiny* (Moscow: Nedra: 1975) (in Russian).
 56. R. A. Gandzhumyan, *Issledovanie Parametrov Prodolnykh Kolebaniy Nizhney Chasti Burilnoy Kolonny pri Bureniy Sharoshechnymi Dolotami s Zhestkoy Kharakteristikoy Privoda* (Dissertation for the Degree of Kand. Tech. Sci.) (Erevan: 1970) (in Russian).
 57. V. M. Moisyshyn, M. V. Lyskanych, and R. A. Zhovnuruk, *Prykarpatskyi Visnyk NTSh. Chyslo*, No. 1(53): 81 (2019) (in Ukrainian).
 58. B. D. Borysevych, V. M. Moisyshyn, and R. B. Shcherbii, *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh ta Hazovykh Rodovyshch*, No. 3(32): 23 (2009) (in Ukrainian).
 59. M. M. Protodyakonov, *Metodika Ratsionalnogo Planirovaniya Eksperimenta* (Moscow: Nauka: 1970) (in Russian).
 60. V. M. Moisyshyn, B. D. Borysevych, Yu. L. Havryliv, and S. A. Zinchenko, *Stiykist i Kolyvannya Burylnoyi Kolony* (Ivano-Frankivsk: Lileya-NV: 2013) (in Ukrainian).