

PHYSICAL AND TECHNICAL BASIS OF EXPERIMENT AND DIAGNOSTICS

PACS numbers: 62.20.Qp, 62.25.Mn, 62.30.+d, 81.40.Pq, 89.20.Bb, 89.20.Kk

Інтегральні показники зміни вібрації бурильної колони — критерій оцінки зношеності шарошкового долота

В. М. Мойсишин, М. В. Лисканич, Л. В. Борисевич*, Н. Б. Колич**,
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

***Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15,*

03041 Київ, Україна

За результатами промислових досліджень на бурових ВАТ «Укрнафта» та ДК «Укргазвидобування» встановлено, що із збільшенням проходки, яка характеризує ступінь зношеності шарошкового долота, спостерігається зростання потужності (дисперсії) процесу зміни віброшвидкості та віброприскорення вертлюга для всіх компонок низу бурильної колони. Між стандартами віброшвидкості σ_V та віброприскорення σ_W і проходкою на долото $H_{\text{дол}}$ встановлені емпіричні кореляційні залежності $\sigma_V = f(H_{\text{дол}})$ і $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$, ймовірність існування яких знаходиться в межах 0,9–0,95. За цими залежностями можна встановити кореляційні зв'язки між об'є-

Corresponding author: Vasyl Mykhajlovych Moisyshyn
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*

***National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
15 Heroiv Oborony Str., UA-03041 Kyiv, Ukraine*

Citation: V. M. Moisyshyn, M. V. Lyskanych, L. V. Borysevych, N. B. Kolych, and R. A. Zhovniruk, Integral Indicators of Change of Drilling Column Vibration—Criterion for Assessing of Roller Cone Bit Wear, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 8: 1087–1102 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.08.1087](https://doi.org/10.15407/mfint.41.08.1087).

мною і ваговою зношеностями долота з одного боку та зміною віброшвидкості або віброприскорення вертлюга бурильної колони з другого боку, що дозволить розробити оптимізаційну модель мінімізації вартості буріння свердловини за повної відробки шарошечкового долота.

Ключові слова: віброшвидкість та віброприскорення вертлюга бурильної колони, закон розподілу ймовірностей випадкового процесу, дисперсія, стандарт, компоновання низу бурильної колони (КНБК), наддолотний амортизатор, статистична непараметрична гіпотеза.

According to results of industrial testing of drilling rigs of Public Joint-Stock Company 'Ukrnafta' and State-Owned Enterprise 'Ukrhazvydobuvannya' it is established that with the increase of the drill, which characterizes the degree of wear of the chip bit, there is an increase in the power (dispersion) of the process of changing the vibration velocity and vibration acceleration of the swivel for all the layouts of the bottom of the drill string. Between the standards of vibration velocity σ_V and vibration acceleration σ_W and propagation on the bit $H_{\text{дол}}$, empirical correlation dependences $\sigma_V = f(H_{\text{дол}})$ and $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$ are determined, their probability of existence is within the range of 0.9–0.95. Based on these dependences, one can establish the correlation between the bulk and weight wear of the bit on the one hand and the change in the vibration velocity or vibration acceleration of the swivel of the drill string on the other hand, which will allow us to develop an optimization model for minimizing the cost of drilling a well with full utilization of the chisel bit.

Key words: vibration velocity and vibration acceleration of the swivel of drilling column, the law of probability distribution of the random process, dispersion, standard, layout of bottom of drilling column (LBDC), perpendicular shock absorber, statistical nonparametric hypothesis.

По результатам промышленных испытаний на буровых ОАО «Укрнефть» и ГК «Укргаздобыча» установлено, что с увеличением проходки, которая характеризует степень износа шарошечного долота, наблюдается рост мощности (дисперсии) процесса изменения виброскорости и виброускорения вертлюга для всех компоновок низа буровой колонны. Между стандартами виброскорости σ_V и виброускорения σ_W и проходкой на долото $H_{\text{дол}}$ установлены эмпирические корреляционные зависимости $\sigma_V = f(H_{\text{дол}})$ и $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$, вероятность существования которых находится в пределах 0,9–0,95. По этим зависимостям можно установить корреляционные связи между объёмным и весовым износами долота, с одной стороны, и виброскоростью или виброускорением вертлюга буровой колонны, с другой стороны, что позволяет разработать оптимизационную модель минимизации стоимости бурения скважины при полной отработке шарошечного долота.

Ключевые слова: виброскорость и виброускорение вертлюга буровой колонны, закон распределения вероятностей случайного процесса, дисперсия, стандарт, компоновка низа бурильной колонны, наддолотный амортизатор, статистическая непараметрическая гипотеза.

(Отримано 2 квітня 2019 р.)

1. ВСТУП

Шарошкові долота — це інструмент, який використовують для руйнування гірських порід під час буріння свердловин роторним способом. У процесі взаємодії фрезерованих зубців долота з вибоєм свердловини озброєння руйнується і спрацьовується в результаті контактної втоми матеріалу, втоми знакозмінного згину, а також внаслідок абразивного зношення. Для доліт із вставними твердосплавними зубцями основний вид зношення — сколювання їх вершин та злам при основі.

Для оцінки зношеності шарошкових бурових доліт використовуються прямі та непрямі показники. До прямих відносять лінійну зношеність зубців за висотою, зменшення діаметра долота, величину люфту в опорах, зношеність зубців по площині притуплення, об'ємну та вагову зношеність [1].

До непрямих показників, які дають змогу оцінити величину зношування долота в будь-який момент часу, відносять характеристики зміни механічної швидкості в часі, гранулометричний склад шламу, ультразвукові коливання, параметри вібрації бурильної колони, які виникають при взаємодії шарошкового долота з поверхнею вибою свердловини [1].

Як зазначено вище, за параметрами вібрацій бурильної колони [2] можна оцінювати ступінь зношеності долота, але ці залежності на сьогодні майже не досліджено. Одним із видів таких залежностей є вплив зношеності долота на інтегральні показники процесу зміни вібрації бурової колони, а саме на її дисперсію, яка пропорційна потужності процесу зміни вібрації [3], та середнє квадратичне відхилення (стандарт).

Метою статті є встановлення (за результатами експериментальних досліджень на бурових підприємствах України) залежностей дисперсій віброшвидкості та віброприскорення коливного процесу бурильної колони від проходки на долото, за якими можна оцінювати ступінь зношеності шарошкового долота.

2. УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження впливу величини зношення шарошкового долота на параметри вібрації бурильної колони проводились на бурових Кудрявська-2 Охтирського управління бурових робіт (ОУБР) ВАТ «Укрнафта» та Труханівська-1 Стрийської експедиції глибокого буріння (СЕГБ) ДК «Укргазвидобування» методом чергування довань. До складу компонентів низу бурильних колон (КНБК) входили наддолотні амортизатори (НА). На буровій Кудрявська-2 використовували амортизатори РДБК-240, АН-240 та НАБ-240, а на Тру-

ханівській-1 — тільки амортизатор РДБК-240.

До складу КНБК на буровій Кудрявська-2 входили: долото STAS 295; перехідник — 0,8 м; калібратор лопатевий спіральний — 1,5 м; перехідник — 0,8 м; відповідний тип наддолотного амортизатора; перехідник — 0,8 м; ОБТ-203 — 8,3 м; калібратор лопатевий спіральний — 1,5 м; ОБТ-203 — 151 м. Запис віброприскорення вертлюга проводився постійно протягом всього часу проведення досліджень. Вимірна лінія складалась з первинного перетворювача віброприскорення — акселерометра АНС-014-03 з чутливістю $12,52 \text{ мВ}/(\text{м}/\text{с}^2)$, встановленого на вертлюзі бурильної колони (БК), вимірного кабелю, що з'єднував перетворювач АНС з підсилювачем сигналу (коефіцієнт підсилення — 3,545), виконаним на базі мікросхеми К140УД6, та швидкодіючим самописцем НЗ38. Дослідження проводились за постійних параметрів режиму буріння: осьове статичне навантаження $F_{\text{ст}} = 200 \text{ кН}$, частота обертання ротора $n = 90 \text{ хв}^{-1}$.

При дослідженнях, які проводились на буровій Труханівська-1, до складу КНБК входили: долото СЗГВ 295,3; перехідник — 0,4 м; маховик 240 — 13,2 м; калібратор лопатевий спіральний — 1,1 м; перехідник — 0,8 м; РДБК-240 або без нього; перехідник — 0,8 м; ОБТ-203 — 141 м. Вимірна лінія віброприскорення була такою ж, як і на буровій Кудрявська-2.

Вимірна лінія віброшвидкості складалась з первинного перетворювача — сейсмоприймача моделі СВ-20П з чутливістю $5393 \text{ мВ}\cdot\text{с}/\text{м}$, який встановлювався на одній платформі з акселерометром АНС-014-03, та вимірного кабелю, який з'єднував перетворювач із швидкодіючим самописцем НЗ38. Записи віброприскорення та віброшвидкості вертлюга проводились постійно протягом всього часу проведення досліджень. Дослідження проводились за постійних параметрів режиму буріння: осьове статичне навантаження $F_{\text{ст}} = 240 \text{ кН}$, частота обертання ротора $n = 60 \text{ хв}^{-1}$.

3. ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ДИСКРЕТНИХ ЗНАЧЕНЬ ВІБРОШВИДКОСТІ ТА ВІБРОПРИСКОРЕННЯ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

За візуальним аналізом записів віброшвидкості та віброприскорення, зображених на рис. 1, можна стверджувати, що процес їх зміни в часі відноситься до класу випадкових функцій, тобто функцій, що в результаті дослідження приймають той чи інший вигляд, який не можна спрогнозувати і описати точними математичними залежностями. Конкретний вигляд випадкової функції називається реалізацією.

У процесі аналізу випадкових функцій з використанням ЕОМ потрібно провести їх дискретизацію, тобто замінити неперервний процес зміни функції вибіркою її дискретних її значень, які відділені один від одного інтервалом часу $\Delta t = h$. Величина цього інтер-

валу визначається поставленими під час аналізу процесу зміни випадкової функції завданнями. Згідно [3] часова довжина реалізації повинна знаходитися в межах 2–4 с.

В результаті дискретизації утворюється вибірка миттєвих значень випадкової функції, найбільш універсальною характеристикою якої є закон розподілу, що в математичній формі виражає функцію розподілу ймовірностей або щільність розподілу ймовірностей [4–6].

При встановленні відповідності емпіричного розподілу експериментальних даних тому чи іншому теоретичному закону перевіряють

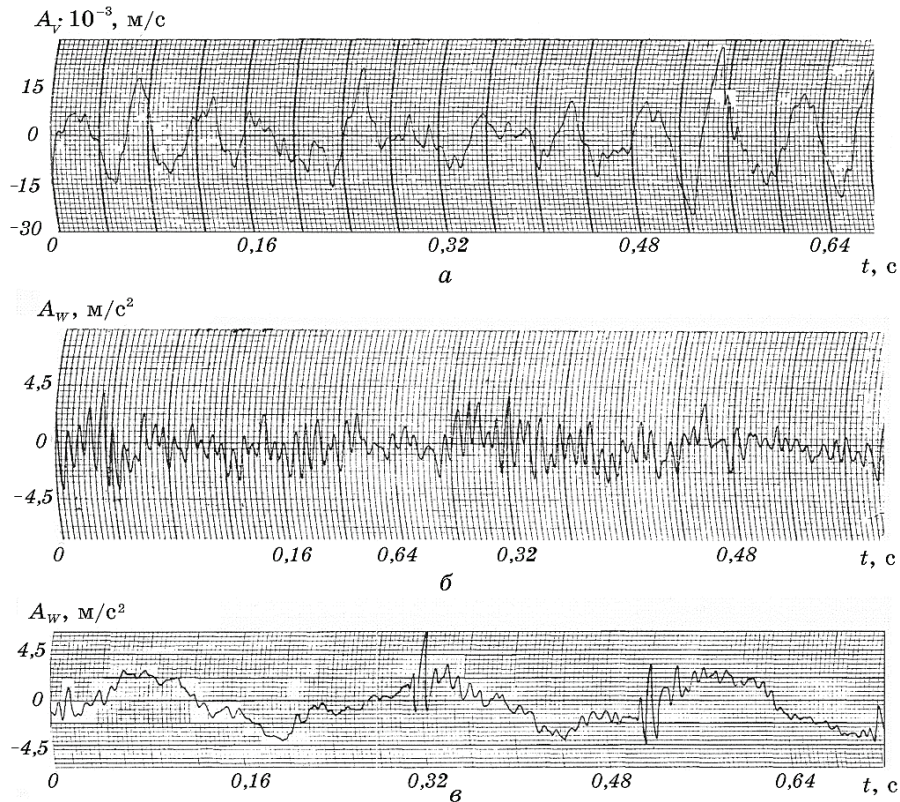


Рис. 1. Записи віброшвидкості та віброприскорення вертлюга бурильної колони: *a* — запис віброшвидкості, бурова Труханівська-1 СЕГБ, *б* — запис віброприскорення, бурова Труханівська-1 СЕГБ, *в* — запис віброприскорення, бурова Кудрявська-2 ОУБР.

Fig. 1. Records of vibration velocity and vibration acceleration of the drilling column swivel: *a*—record vibration velocity, drill Truhanivska-1 of Stryi Deep Drilling Expedition (SDDE), *б*—record vibration acceleration of drilling unit Truhanovska-1 of SDDE, *в*—record vibration acceleration of drilling unit Kudryavsky-2 of Okhtyr Drilling Department (ODD).

ТАБЛИЦЯ 1. Перевірка нульової гіпотези H_0 для вибірок дискретних миттєвих значень віброприскорення бурильної колони при бурінні КНБК з амортизатором РДБК-240, рівень значущості $\alpha = 0,05$.

TABLE 1. Verification of zero hypothesis H_0 for samples of discrete instantaneous values of vibration acceleration of drilling column during drilling with a shock absorber РДБК-240, level of significance $\alpha = 0.05$.

Проходка на долото, м	№ реалізації	Теоретичний закон розподілу	$(\chi_{сп})^2$	$\chi_{\alpha, \nu}$	Перевірка умови $(\chi_{сп})^2 < (\chi_{\alpha, \nu})^2$	Висновок про гіпотезу H_0 : $F(x) \in \Omega$
4	1	Рівномірний	18,9	12	Не виконується	Не підтверджена
		1	4,8	9,4	Виконується	Підтверджена
	2	Експоненціальний	677,7	11	Не виконується	Не підтверджена
		Пуассона	61,3	11	Не виконується	Не підтверджена
		Рівномірний	14,1	12	Не виконується	Не підтверджена
		Нормальний	4,0	9,4	Виконується	Підтверджена
41,5	1	Експоненціальний	215,4	11	Не виконується	Не підтверджена
		Пуассона	21,2	11	Не виконується	Не підтверджена
	2	Рівномірний	5,2	11	Виконується	Підтверджена
		Нормальний	7,3	7,8	Виконується	Підтверджена
		Експоненціальний	118,9	9,4	Не виконується	Не підтверджена
		Пуассона	8,4	9,4	Виконується	Підтверджена
		Рівномірний	57,7	12	Не виконується	Не підтверджена
		Нормальний	5,7	9,4	Виконується	Підтверджена
		Експоненціальний	179,3	11	Не виконується	Не підтверджена
		Пуассона	6,9	11	Виконується	Підтверджена
3	Рівномірний	11,9	11	Не виконується	Не підтверджена	
	Нормальний	6,8	7,8	Виконується	Підтверджена	
	Експоненціальний	186,0	9,4	Не виконується	Не підтверджена	
		Пуассона	8,3	9,4	Виконується	Підтверджена

нульову непараметричну гіпотезу, яка має вигляд — $H_0: F(x) \in \Omega$, де Ω — функції теоретичних законів розподілу випадкової величини.

Ця гіпотеза перевірялася для рівномірного, нормального, експоненціального законів та закону Пуассона за допомогою непараметричного критерію згоди Пірсона.

За критерієм Пірсона емпіричний розподіл відповідає теоретичному, якщо виконується умова $(\chi_{сп})^2 < (\chi_{\alpha, \nu})^2$, де $(\chi_{сп})^2$ — спостережене

(емпіричне) значення критерію χ^2 , визначене за експериментальними даними, $(\chi_{\alpha\nu})^2$ — його критичне (табличне) значення, яке визначається рівнем значущості α та числом степенів вільності ν . Останнє залежить від числа інтервалів всього діапазону миттєвих значень віброшвидкості або віброприскорення k та кількості параметрів r теоретичного закону розподілу (наприклад, нормальний закон — двопараметричний, тобто визначається тільки двома параметрами вибірки значень випадкової величини — середнім та дисперсією). Перевірка умови $(\chi_{\text{сп}})^2 < (\chi_{\alpha\nu})^2$ здійснювалась за допомогою Chi^* -тесту з використанням програми «NUMERI» [6].

Для попереднього аналізу (оцінки) емпіричного розподілу експериментальних значень віброприскорення використано результати паралельних досліджень, одержані на буровій Кудрявська-2 під час

ТАБЛИЦЯ 2. Перевірка нульової гіпотези H_0 для вибірок дискретних миттєвих значень віброприскорення бурильної колони при бурінні КНБК з амортизаторами НАБ-240, АН-240 та без них; рівень значущості $\alpha = 0,05$.

TABLE 2. Checking of zero hypothesis H_0 for samples of discrete instantaneous values of the vibration acceleration of the drill column during drilling using the LBDC with shock absorbers НАБ-240, АН-240 and without them; level of significance $\alpha = 0.05$.

Наявність амортизатора в КНБК	Проходка на долото, м	Значення критерію Пірсона		Теоретичний закон розподілу, для якого виконується умова $(\chi_{\text{сп}})^2 < (\chi_{\alpha,\nu})^2$
		$(\chi_{\text{сп}})^2$	$(\chi_{\alpha,\nu})^2$	
Амортизатор НАБ-240	3	8,1	9,4	Нормальний
	14	3,4 3,7	11 7,8	Рівномірний Нормальний
	23	5,4	7,8	Нормальний
Амортизатор АН-240	4	8,3 3,9	12 9,4	Рівномірний
	12	1,7	9,4	Нормальний
	29	6,1	9,4	
	31	8,4	9,4	
Амортизатори відсутні	4	3,6 8,9	9,4 11	Нормальний Пуассона
	6	3,8 8,9	7,8 9,4	Нормальний Пуассона
	18	3,8	9,4	Нормальний
	36	8	11	Пуассона
		9,1	12,6	Нормальний

буріння КНБК з наддолотним амортизатором РДБК-240 (на початку та наприкінці довбання, табл. 1).

Аналіз даних табл. 1 дозволяє стверджувати, що для перевірки відповідності емпіричного розподілу теоретичному достатньо однієї реалізації. В таблиці 2 наведено результати перевірки нульової гіпотези H_0 для інших КНБК, які використовувались під час експериментальних досліджень на буровій Кудрявська-2.

Експериментальні дослідження для встановлення закону розподілу значень параметрів вібрацій бурильної колони було продовжено на буровій Труханівська-1, під час яких фіксувались віброшвидкість та віброприскорення. Результати цих досліджень наведено в табл. 3, 4.

За даними табл. 1, 2 для всіх 16-ти реалізацій віброприскорення

ТАБЛИЦЯ 3. Перевірка нульової гіпотези H_0 для вибірок дискретних миттєвих значень віброшвидкості бурильної колони; рівень значущості $\alpha = 0,05$.

TABLE 3. Checking of zero hypothesis H_0 for samples of discrete instantaneous values of the vibration velocity of the drilling column; significance level $\alpha = 0.05$.

Наявність амортизатора в КНБК	Проходка на долото, м	Значення критерію Пірсона		Теоретичний закон розподілу, для якого виконується умова $(\chi_{\text{сп}})^2 < (\chi_{\alpha, \nu})^2$
		$(\chi_{\text{сп}})^2$	$(\chi_{\alpha, \nu})^2$	
Амортизатор РДБК-240	4	4,7	9,4	Нормальний
	12	7,4	9,4	
	17	3,7	7,8	Пуассона
		8,5	11	
	26	5,6	9,4	Нормальний
	28	7,7	9,4	
	32	1,7	9,4	Пуассона
3,9	11			
Без амортизатора	1	6,1	7,8	Нормальний
		9,8	12	
	16	5,1	9,4	Рівномірний
		2,7	9,4	
	18	0,55	9,4	Нормальний
	22	2,4	9,4	
	26	3,39	9,4	
44	1,7	9,4		

вертлюга бурової Кудрявська-2 χ^2 -тест про відповідність емпіричного закону розподілу експериментальних даних теоретичному нормальному, з ймовірністю 0,95 підтверджується. Одночасно, за цим же тестом, для п'яти реалізацій підтверджується відповідність емпіричного закону теоретичному закону Пуассона, а ще для трьох — рівномірному закону розподілу.

Отже, можна стверджувати, що основним теоретичним законом якому відповідає емпіричний розподіл експериментальних значень як віброшвидкості, так і віброприскорення є нормальний закон розподілу.

Для сцентрованих випадкових процесів, до яких відносяться процеси зміни віброшвидкості та віброприскорення бурильної колони, середнє значення вибірок їх миттєвих значень дорівнює нулю, тобто якщо закон їх розподілу відповідає нормальному, то його можна оцінювати тільки одним параметром — дисперсією.

4. ВПЛИВ ЗНОШЕНОСТІ ДОЛОТА НА ПОТУЖНІСТЬ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ ВІБРОШВИДКОСТІ ТА ВІБРОПРИСКОРЕННЯ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Оцінку впливу зношеності долота на потужність процесу зміни вібро-

ТАБЛИЦЯ 4. Перевірка нульової гіпотези H_0 для вибірок дискретних миттєвих значень віброприскорення бурильної колони, рівень значущості $\alpha = 0,05$.

TABLE 4. Checking of zero hypothesis H_0 for samples of discrete instantaneous values of vibration acceleration of drill column, significance level $\alpha = 0.05$.

Наявність амортизатора в КНБК	Проходка на долото, м	Значення критерію Пірсона		Теоретичний закон розподілу, для якого виконується умова $(\chi_{сп})^2 < (\chi_{\alpha, \nu})^2$
		$(\chi_{сп})^2$	$(\chi_{\alpha, \nu})^2$	
Амортизатор РДБК-240	0	3,6 6,4	9,4 11	Нормальний Пуассона
	10	5,6 6,6	12 9,4	Рівномірний
	28	5,8	9,4	Нормальний
	33	7,7	7,8	
Без амортизатора	10	3,8 6,5	7,8 9,4	Нормальний Пуассона
	22	2,3	5,9	Нормальний

прискорення проводимо за експериментальними значеннями дисперсії та стандарту, одержаними під час буріння двома КНБК, для двох та трьох значень проходки на долото в Охтирського УБР, табл. 5.

За результатами оцінкових експериментальних досліджень впливу зношеності озброєння і опор долота на потужність процесу зміни віброприскорення вертлюга бурильної колони з ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що із збільшенням проходки на долото (долото зношується) ця потужність зростає, а значить інтенсивність коливного процесу бурильної колони посилюється незалежно від складу компоновання низу бурильної колони. Для КНБК з РДБК-240 дисперсія зростає у 3,3 рази, для КНБК з НАБ-240 — у 4 рази.

За результатами експериментальних досліджень для чотирьох (або більше) рівнів проходки на долото за програмою «Визначення виду емпіричної залежності методом найменших квадратів» [7], яка визначає вибіркового коефіцієнт кореляції r_v експериментальних даних, коефіцієнти чотирнадцяти різних залежностей та основну похибку σ_0 вирівнювання для кожної з них, було підібрано емпіричні кореляційні залежності $\sigma_v = f(H_{\text{дол}})$, $D_w = f(H_{\text{дол}})$ і $\sigma_w = f(H_{\text{дол}})$.

Апроксимація (вирівнювання) експериментальних даних емпіричними залежностями вважається задовільною, якщо виконуються дві умови:

1. $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}_v$ або $\sigma_0 < 0,1\bar{D}_w$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}_w$ де σ_0 — середнє квадратичне відхилення значень емпіричної залежності від експериментальних значень; \bar{D}_v , \bar{D}_w , $\bar{\sigma}_v$, $\bar{\sigma}_w$ — середні, сформовані із значень дисперсій та стандартів вибірок на всіх рівнях проходки на долото $H_{\text{дол}}$;

2. Ймовірності кореляційного зв'язку між наведеними вище ве-

ТАБЛИЦЯ 5. Значення дисперсії віброприскорення вертлюга бурильної колони при оцінкових експериментальних дослідженнях зношеності долота.

TABLE 5. Value of variance of vibration acceleration of swivel of the drilling column in the experimental studies of wear of the roller cone bit.

Склад КНБК	$F_{\text{ст}}$, кН	Проходка на долото, м	Дисперсія віброприскорення, $(\text{м/с}^2)^2$
РДБК-240	200	4	0,989
		41,5	3,2858
НАБ-240	160	3	0,2505
		14	0,4081
		23	0,9944

личинами повинні відповідати залежностям $P(D_W, H_{\text{дол}}) \geq 0,95$, $P(\sigma_V, H_{\text{дол}}) \geq 0,95$ і $P(\sigma_W, H_{\text{дол}}) \geq 0,95$, де D та σ — значення дисперсій та стандартів, за якими здійснювалась апроксимація.

Ця умова виконується, якщо $T_{\text{сп}} > t_{\text{кр}}$, де $T_{\text{сп}}$ — спостережне значення критерію Стьюдента, $t_{\text{кр}}(\alpha, \kappa)$ — критична точка розподілу

ТАБЛИЦЯ 6. Результати підбору залежностей $\sigma_V = f(H_{\text{дол}})$, $D_W = f(H_{\text{дол}})$, $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$ і перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних.

TABLE 6. Results of the selection of dependencies $\sigma_V = f(H_{\text{дол}})$, $D_W = f(H_{\text{дол}})$, $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$ and verification of conditions for satisfactory approximation of experimental data.

Тип амортизатора в КНБК	Кореляційні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умов $\sigma_0 < 0,1\bar{D}$, $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}$
Бурова Труханівська-1			
РДБК-240	$\sigma_V = f(H_{\text{дол}}) = (0,055 + 4,920823 \cdot 10^{-3} \sqrt{H_{\text{дол}}})^2$	0,9977 $P > 0,95^*$	0,00 < 0,00006
	$D_W = f(H_{\text{дол}}) = 1 / (7,896 - 0,1290468 H_{\text{дол}})$	0,963 $P > 0,95$	0,014 < 0,02
	$\sigma_W = f(H_{\text{дол}}) = 1 / (2,82 - 2,713069 \cdot 10^{-2} H_{\text{дол}})$	0,963 $P > 0,95$	0,017 < 0,044
Без амортизатора	$\sigma_V = f(H_{\text{дол}}) = (0,068 + 6,877546 \cdot 10^{-3} \sqrt{H_{\text{дол}}})^2$	0,9844 $P > 0,95$	0,0001 < 0,0002
	$D_W = f(H_{\text{дол}}) = 0,127 + 8,843788 \cdot 10^{-2} \sqrt{H_{\text{дол}}}$	0,9455 $P > 0,95$	1,43 < 4,57
	$\sigma_W = f(H_{\text{дол}}) = 0,379 + 7,289536 \cdot 10^{-2} \sqrt{H_{\text{дол}}}$	0,9844 $P > 0,95$	0,29 < 0,66
Бурова Кудрявська-2			
АН-240	$D_W = f(H_{\text{дол}}) = 1,821 - 3,103743 / H_{\text{дол}}$	0,9034 $P > 0,9$	0,01 < 0,15
	$\sigma_W = f(H_{\text{дол}}) = 1,356 - 1,331724 / H_{\text{дол}}$	0,893 $P > 0,9$	0,001 < 0,122
Без амортизатора	$D_W = f(H_{\text{дол}}) = 13,607 + 1,478689 H_{\text{дол}}$	0,9994 $P > 0,95$	0,72 < 3,73
	$\sigma_W = f(H_{\text{дол}}) = 4,057 + 0,116504 H_{\text{дол}}$	0,9981 $P > 0,95$	0,1 < 0,59

* P — ймовірність кореляційного зв'язку між значеннями D , σ і $H_{\text{дол}}$.

Стюдента, $\alpha = 0,05$ — рівень значущості (зона ухвалення рішення двостороння), $\kappa = n - 2$ — число ступенів вільності, n — об'єм вибірки, за якою здійснювалась апроксимація.

В таблиці 6 наведені результати підбору кореляційних емпіричних залежностей.

Умови задовільної апроксимації експериментальних даних за програмою «Визначення виду емпіричної залежності методом найменших квадратів» виконуються, тобто незалежно від КНБК між стандартом віброшвидкості, дисперсією і стандартом віброприскорення бурильної колони та проходкою на долото існують кореляційні емпіричні залежності, ймовірність існування яких, за винятком КНБК з АН-240, більша за 0,95. Для КНБК з АН-240 ця ймовірність більша за 0,9.

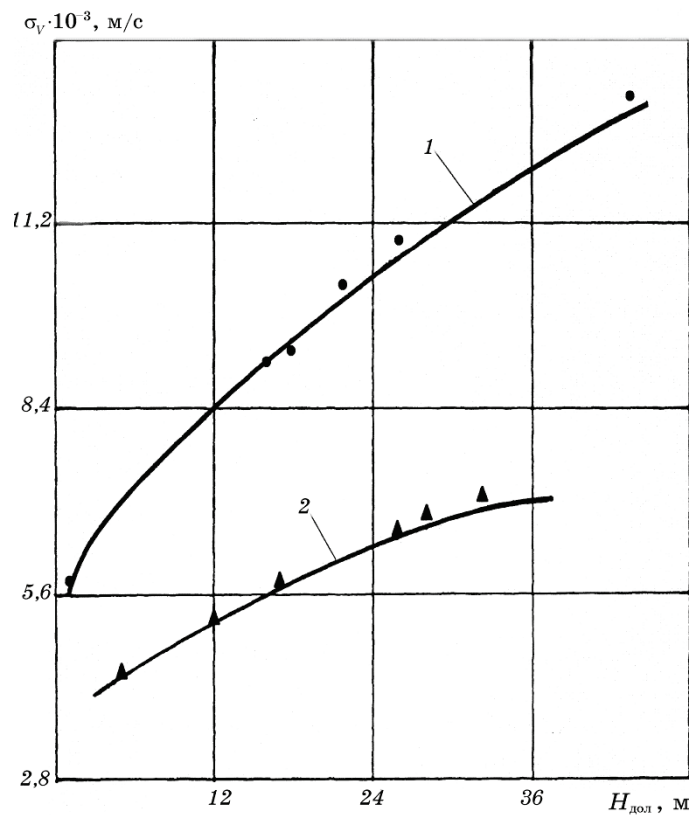


Рис. 2. Графіки залежностей $\sigma_v = f(H_{\text{дол}})$: 1 — КНБК без наддолотного амортизатора; 2 — КНБК з амортизатором РДБК-240.

Fig. 2. Charts of dependencies: 1 — LBDC with no overhead shock absorber; 2 — LBDC with shock absorber РДБК-240.

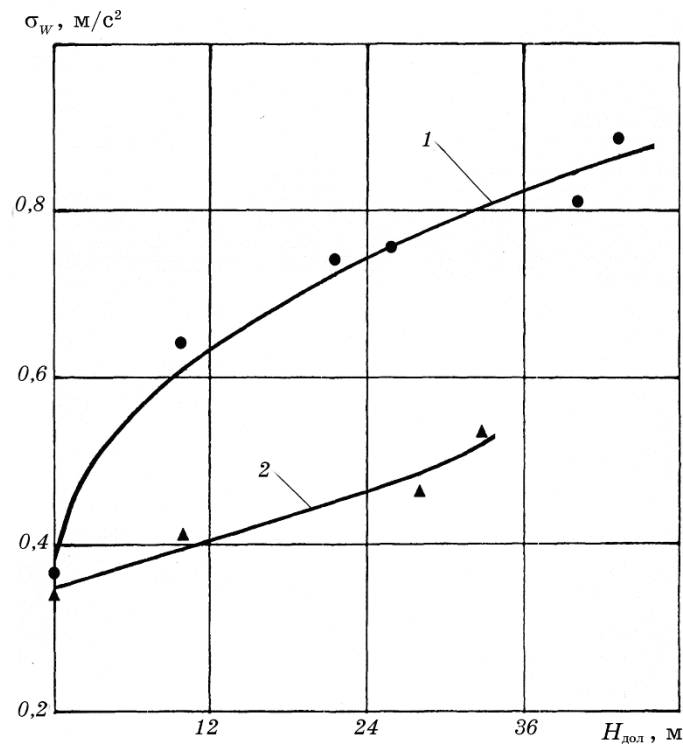


Рис. 3. Графіки залежностей $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$: 1 — КНБК без наддолотного амортизатора; 2 — КНБК з амортизатором РДБК-240.

Fig. 3. Charts of dependencies: 1—LBDC without overdeltage shock absorber; 2—LBDC with shock absorber РДБК-240.

Графічну оцінку впливу зношуваності долота на потужність процесу зміни віброшвидкості та віброприскорення бурильної колони краще проводити за залежностями $\sigma_V = f(H_{\text{дол}})$ та $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$, оскільки стандарт має однакову розмірність з досліджуваними параметрами вібрацій.

На рисунках 2, 3 зображено графіки залежностей $\sigma_V = f(H_{\text{дол}})$, $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$ для КНБК з амортизатором РДБК-240 і для КНБК без амортизатора на буровій Труханівська-1 [8], а на рис. 4 графіки залежностей $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$ для КНБК з амортизатором АН-240 і для КНБК без амортизатора, одержані за результатами досліджень на буровій Кудрявська-2.

5. ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Використовуючи одержані залежності $\sigma_V = f(H_{\text{дол}})$ і $\sigma_W = f(H_{\text{дол}})$ мож-

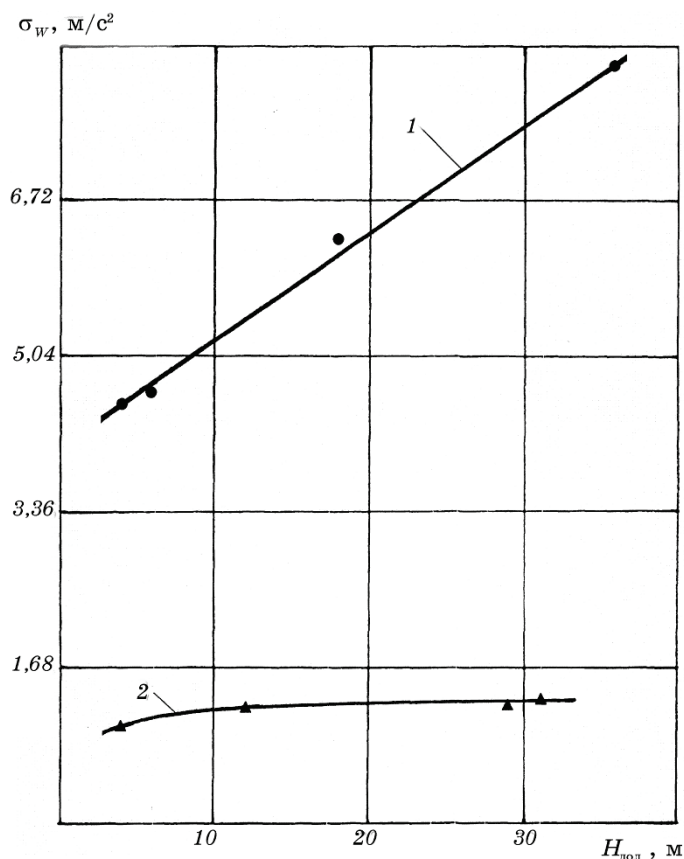


Рис. 4. Графіки залежностей $\sigma_w = f(H_{\text{дол}})$: 1 — КНБК без наддолотного амортизатора; 2 — КНБК з амортизатором АН-240.

Fig. 4. Charts of dependencies: 1—LBDC with no overhead shock absorber; 2—LBDC with shock absorber AN-240.

на встановити кореляційні зв'язки між об'ємною і ваговою зношеностями долота та процесом зміни віброшвидкості або віброприскорення вертлюга бурильної колони, які враховують також величину люфту в опорах.

Знання таких зв'язків, в свою чергу, може слугувати відправною точкою для розробки оптимізаційної моделі мінімізації вартості буріння свердловини за повної відробки шарошкового долота.

6. ВИСНОВКИ

1. Основним теоретичним законом, якому відповідає емпіричний

розподіл експериментальних значень як віброшвидкості, так і віброприскорення, незалежно від величини зношеності шарошкового долота, є нормальний закон розподілу, який для процесів зміни вібрації бурильної колони можна оцінити тільки одним параметром — дисперсією.

2. Із збільшенням проходки на долото, яка характеризує ступінь зношеності шарошкового долота, спостерігається зростання потужності (дисперсії) процесу зміни віброшвидкості та віброприскорення вертлюга бурильної колони для всіх компонентів НБК (див. рис. 2–4).

3. Між дисперсіями віброшвидкості та віброприскорення з одного боку і проходкою на долото з другого боку встановлено емпіричні кореляційні залежності, ймовірність існування яких знаходиться в межах 0,9–0,95.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Г. Н. Семенов, Я. Р. Когуч, Я. В. Куровець, М. М. Дранчук, *Автоматизація технологічних процесів у нафтовій та газовій промисловості* (Івано-Франківськ: ІФНТУНГ: 2009).
2. К. Г. Левчук, *SOCAR Proceedings*, № 2: 23 (2017).
3. В. М. Мойсишин, Б. І. Смага, Р. А. Жовнірук, *Прикарпатський вісник НТШ. Число, 45*, № 1: 170 (2018).
4. Е. С. Вентцель, *Теория вероятностей* (Москва: Наука: 1969).
5. Р. Мэнли, *Анализ и обработка записей колебаний* (Ред. В. К. Житомирский) (Москва: Машиностроение: 1972).
6. Э. Шрюфер, *Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизированных сигналов* (Київ: Либідь: 1995).
7. Програма «Визначення виду емпіричної залежності методом найменших квадратів», <https://uk.wikipedia.org/wiki>
8. К. Г. Левчук, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 1: 45 (2018).

REFERENCES

1. G. N. Semenov, Ya. R. Kohuch, Ya. V. Kurovec, and M. M. Dranchuk, *Avtomatyzatsiya Tekhnologichnykh Protsesiv u Naftoviy ta Gazoviy Promyslovosti* (Ivano-Frankivsk: IFNTUNH: 2009) (in Ukrainian).
2. K. Levchuk, *SOCAR Proceedings*, No. 2: 23 (2017) (in Russian).
3. V. M. Moisyshyn, B. I. Smaha, and R. A. Zhovniruk, *Prykarpatskyi Visnyk NTSh. Chyslo, 45*, No. 1: 170 (2018) (in Ukrainian).
4. E. S. Venttsel, *Teoriya Veroyatnostey* (Moscow: Nauka: 1969) (in Russian).
5. R. Menli, *Analiz i Obrabotka Zapisey Kolebaniy* (Ed. V. K. Zhytomirskiy) (Moscow: Mashynostroenie: 1972) (in Russian).
6. E. Shryufer, *Obrabotka Signalov: Tsyfrovaaya Obrabotka Diskretizirovanykh Signalov* (Kyiv: Lybid: 1995) (in Russian).
7. Program 'Vyznachennya Vydu Empirychnoyi Zalezhnosti Metodom

- Наймєшєкє Квадратив'*, <https://uk.wikipedia.org/wiki>
8. К. Г. Левчук, *Мєталлофиз. Нєвєшєє Тєкхнєл.*, **40**, No. 1: 45 (2018) (in Ukrainian).