

MATERIALS IN EXTREMAL CONDITIONS

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

Експериментальна оцінка впливу конструктивних і режимних чинників на динаміку сталевого бурильного інструмента

В. М. Мойсишин, М. В. Лисканич, Л. В. Борисевич*,
О. Ю. Витязь, І. І. Возний

*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*

За результатами експериментальних досліджень, проведених на буровому стенді, встановлено емпіричну залежність між коливаннями сталевого бурильного інструмента та його конструктивними і режимними чинниками. За досліджуваний параметр коливань вибрано середнє квадратичне відхилення (стандарт) вібропришвидження, що реєстрували на траверсі стенда, тобто після пристрою зміни жорсткості та демпфування, який входить до складу компоновання бурильного інструмента. До конструктивних чинників віднесено жорсткість та коефіцієнт демпфування згаданого пристрою, а до режимних чинників віднесено осьове статичне навантаження та частоту обертання сталевого тришарошкового долота. Постійними факторами під час проведення експерименту були тип і діаметр сталевого тришарошкового долота та витрата промивальної рідини. Для одержання емпіричних залежностей обрано метод раціонального планування експериментів, відповідно до якого кожна комбінація змінних чинників під час досліджень зустрічається тільки один раз. Планований факто-

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, O. Yu. Vytyaz, and I. I. Voznyi, Experimental Estimation of Design and Drilling Regime Option Influence on Drilling Tool Dynamics, Title, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 5: 689–712 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.05.0689](https://doi.org/10.15407/mfint.43.05.0689).

рний експеримент проведено з використанням блоків пісковика воротищенської свити в якості гірської породи, складених з двох пропластків з твердістю за штампом 1440 і 2050 МПа. Загальну багатofакторну функцію подано добутком частинних залежностей від чотирьох змінних чинників: осьового навантаження, частоти обертання сталевого тришарошкового долота, жорсткості та коефіцієнта демпфування бурильного інструмента. Встановлено, що ймовірність існування усіх чотирьох частинних залежностей-множників більша за 0,95, що є задовільним результатом апроксимації. Також виявлено, що збільшення осьового статичного навантаження і частоти обертання сталевого тришарошкового долота призводить до зростання енергії вібропришвидження, а зростання коефіцієнта демпфування — до її зменшення. З'ясовано, що залежність величини вібропришвидження від жорсткості має локальний максимум, який зі збільшенням твердості гірської породи зміщується в область більших значень жорсткості. Аналіз отриманих результатів дослідження дозволив надати практичні рекомендації щодо зменшення шкідливого впливу вібрацій бурильного інструмента та зниження енерговитрат у процесі буріння свердловин.

Ключові слова: сталеве тришарошкове долото, бурильний інструмент, метод планування експерименту, змінний чинник, емпірична модель, дисперсія і середнє квадратичне відхилення, вібропришвидження.

Drilling workbench experimental studies are specified an empirical relationship between steel drilling tool oscillations and its design and drilling regime options. The standard deviation of vibration acceleration is specified as the studied oscillation option, i.e. the option workbench's traverse after the rigidity and damping change device that is a part of drilling assembly. The rigidity and damping coefficient of this device is specified as the design options, and regime options included axial static load and speed of rotation of the steel bit. The constant factors during the experiment are the type and diameter of the steel three-cone bit and the flow rate of the flushing fluid. To obtain empirical dependences, the method of rational planning of experiments is chosen, according to which each combination of variables occurs only once during the research. The planned factor experiment is carried out using as rock sandstone blocks of the Vorotishche series composed of two layers with the stamp hardness of 1440 and 2050 МПа. The general multifactor function is presented as the product of partial dependences on four variables. As established, the probability of existence of all four partial dependences-factors is more than 0.95, which is a satisfactory result of approximation. As also found, an increase in the axial static load and speed of rotation of the steel bit leads to an increase in the vibration acceleration energy, and an increase in the damping coefficient—to the energy reduction. As found, the dependence of the vibration acceleration on the stiffness has a local maximum, which with increasing rock hardness shifts to the range of higher stiffness values. The analysis of the obtained results allowed to provide practical recommendations for reducing the harmful effects of vibrations of the drilling tool and reducing the energy consumption of the drilling process.

Key words: steel cone bit, drilling tool, experimental planning method, vari-

able factor, empirical model, variance and standard deviation, vibration acceleration.

(Отримано 7 березня 2021 р.)

1. ВСТУП І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основний процес буріння нафтових та газових свердловин — це руйнування гірської породи під час взаємодії сталевого шарошкового долота з вибоєм свердловини. Цей процес супроводжується коливаннями (вібраціями) металевої бурильної колони, величина яких визначає динамічні навантаження на елементи цієї колони та наземного бурового обладнання [1, 2]. На податливість бурильної колони, а отже, і на її динамічну поведінку, певний вплив чинить вибір матеріялу бурильних труб (найбільш уживаними є такі матеріали: сталь різних груп міцності, наприклад, сталь 40ХН, алюмінієві стопи АД31 та дюралюміній Д16Т, титановий стоп ВТ1-0, а також магнієві стопи).

Нині у світі є популярним та продовжує розвиватись скероване та інтелектуальне буріння глибоких свердловин. Подальший прогрес сучасного спорудження свердловин вимагає максимального вдосконалення матеріялів, конструкцій і технологій виготовлення бурильного обладнання та інструмента. Зазвичай бурильний інструмент (БІ) працює в агресивних та абразивних середовищах під дією інтенсивних динамічних або тривалих циклічних навантажень. Для покращення експлуатаційних властивостей бурильного інструмента застосовують низку методів. До конструкторських методів відносять удосконалення конфігурації бурильних труб [3, 4], нарізних з'єднань [5–7], забезпечення точності нарізей [8–10] та запобігання самовідгвинчуванню [11], раціональний вибір матеріялів шляхом проведення корозійних досліджень і вивчення структурних змін металів [12–14], параметричну оптимізацію озброєння, опор і вузлів промивання доліт [15–17] тощо. Серед технологічних методів заслуговують на увагу раціональне армування сталевих деталей [18], оптимізація формоутворення гвинтових поверхонь та поверхонь складної топології [19, 20], нанесення гнучких [21, 22], металевих [23–25] та функціонально градієнтних [26–28] покриттів, зокрема оксидних [29], а також шліфування і лазерна обробка робочих поверхонь нарізей [30, 31]. Для підвищення контактної довговічності елементів бурильного інструмента перспективним є застосування евтектичних покриттів, які демонструють високу стійкість до абразивного зношування [32, 33], а також застосування матеріялів з мікроструктурою композитного типу [34, 35]. Дослідження будови металів [36, 37] та вивчення дифузійних процесів у нікель-залізних стопах [38–40] необхідні для розробки нових конструкційних матеріялів і тех-

нологічних процесів зміцнення.

Експлуатаційні методи покращення характеристик бурильного інструмента передбачають обґрунтування режимів буріння з урахуванням силової [41–43] і температурної взаємодії [44–46], забезпечення ретельного промивання вибою свердловини [47, 48], використання віброзахисних компоновок бурильної колони [49–51], а також застосування ефективних способів ліквідації ускладнень під час буріння [52–54]. Буровий інструмент також необхідний для спорудження свердловин, які використовують у нових технологічних схемах розробки запасів вугілля з газифікацією, для додаткового використання некомерційних і закритих родовищ та розширення експлуатації гірничих підприємств [55, 56]. Для оцінки технічного стану гірничого обладнання, виготовленого із різних металів, ефективним є застосування регулярного моніторингу [57].

Конструктивні особливості бурильної колони, а також специфіка умов її експлуатації та контактна взаємодія зі стінкою свердловини призводять до виникнення динамічних навантажень бурильного інструмента. Загальні проблеми взаємодії бурильних колон із різних металів зі свердловиною розглядалися, зокрема, у роботах [58–60], асимптотичні підходи щодо аналізу контакту труб з пружним середовищем представлені в працях [61–63]. У публікаціях [64–66] пропонуються різні підходи до інженерного моделювання контактних явищ у стрижневих конструкціях, а у працях [67–69] розглянута нестационарна динаміка пружних стрижнів із непружним зовнішнім опором. У процесі буріння на невелику глибину, зазвичай, можна візуально спостерігати вібрацію тягової труби. Під час збільшення глибини свердловини бурильна колона може руйнуватися без видимих проявів вібрації на поверхні, що може призводити до втомного руйнування металу. Теоретичні дослідження процесів поширення тріщин у тонкостінних конструкціях, зокрема за наявності покриття, представлені у працях [70, 71], а експериментальні — для процесів втомного руйнування титанових стопів здійснено в [72].

Один із перспективних та найбільш кардинальних шляхів вирішення проблеми віброзахисту базується на застосуванні спеціальних віброзахисних пристроїв: пружних муфт, бурових амортизаторів та пружних шпинделів вибійних двигунів [73–75], динамічних гасників та спеціалізованих демпферів [76–78] тощо. Найпоширенішими віброзахисними пристроями бурильної колони є наддолотні амортизатори (НА), основними експлуатаційними характеристиками яких є жорсткість [79–81] та коефіцієнт демпфування [82, 83]. Автори [84] розробили математичну модель і конструкцію пристрою для регулювання динаміки бурильної колони за допомогою як накопичення, так і перерозподілу енергії поздовжньо-крутильних коливань.

За результатами промислових експериментальних досліджень

впливу (НА) на динаміку роботи бурильної колони [79, 85] встановлено, що використання (НА) в компонованні низу бурильної колони (КНБК) зменшує амплітуду повздовжніх коливань бурильної колони у 5–7 разів. Одночасно, за результатами цих досліджень, не було встановлено роздільний вплив основних характеристик (НА) на інтегральні статистичні характеристики коливного процесу, до яких відносять дисперсію та стандарт $\sigma_{\text{вбі}}$ вібропришвидження, що розкривають внутрішню структуру цього процесу.

Дослідники надають значну увагу вибору матеріалів, технології зміцнення, але не достатньо уваги приділяють обґрунтуванню вібраційних характеристик віброзахисних пристроїв для бурового інструменту. Наведених у літературному огляді даних не достатньо для оцінки впливу жорсткості та демпфування сталевого бурильного інструменту на вібропришвидження бурильної колони, тому потрібно провести додаткові експериментальні дослідження для уточнення цільового критерію вибору раціональної компоновки вказаної колони та оптимальних режимів буріння – мінімуму енергоємності процесу руйнування гірської породи сталевим тришарошковим долотом. Результати аналізу впливу жорсткості і демпфувальних властивостей (НА) на динамічну поведінку сталевого бурильного інструменту потрібні для раціонального проектування віброзахисних пристроїв, оптимального вибору бурових доліт, правильного компоновання бурильної колони, обґрунтування технологічних режимів буріння. Вивчення впливу жорсткості та демпфувальних властивостей (НА) на вібрації бурильної колони ускладнюється тим, що багаторазова зміна їх значень незалежно одна від одної у промислових умовах неможлива. Стендові експериментальні дослідження з використанням спеціальних пристроїв, конструкція яких дозволяє змінювати окремо жорсткість та окремо коефіцієнт демпфування, дозволяють одержати достовірні результати і встановити основні закономірності впливу сукупності зовнішніх незалежних факторів на процес взаємодії сталевого тришарошкового долота з вибоєм свердловини.

Метою роботи є встановлення за результатами експериментальних досліджень впливу параметрів бурильного інструмента (жорсткості C та коефіцієнта демпфування β) та режимних параметрів (осьового статичного навантаження $F_{\text{ст}}$ і частота обертання сталевого тришарошкового долота n) на інтегральний показник — середнє квадратичне відхилення або стандарт $\sigma_{\text{вбі}}$ вібропришвидження.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для проведення досліджень сталевого бурильного інструмента використовували буровий стенд конструкції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу [85]. Для побудо-

ви багатофакторної емпіричної моделі стандарту вібропришвидження сталевого бурильного інструмента $\sigma_{\text{WBI}} = B_{\text{cp}} f(n) f(F_{\text{ct}}) f(\beta) f(C)$ використали метод раціонального планування експериментів, тут B_{cp} — середнє значення числового коефіцієнта для множини усіх дослідів. Зауважимо, що результати експериментальних досліджень дозволяють також одержати багатофакторну емпіричну модель енергії вібропришвидження сталеві бурильної колони під час поглиблення свердловини, оскільки встановлено [83], що дисперсія вібропришвидження $D_{\text{WBI}} = \sigma_{\text{WBI}}^2$ та потужність (енергія) його зміни є прямопропорційними величинами, тобто мають однаковий фізичний зміст.

Під час проведення досліджень для зміни параметрів сталевого бурильного інструмента використовували пристрої, конструкція яких дозволяла змінювати значення жорсткості та коефіцієнта демпфування сталевого бурильного інструмента незалежно одне від одного [83, 86]. Експериментальні дослідження проводили з використанням блоків гірської породи — пісковика воротищенської світи, складених із двох пропластків, твердість яких за штампом $p_{\text{ш}}$ складала відповідно 1440 та 2050 МПа. Кожен з факторів змінювали на чотирьох рівнях. Загальна кількість дослідів становила 32, з них: 1–16 для першого, 17–32 для другого пропластків гірської породи відповідно. Буріння проводили сталевим тришарошковим долотом III 93Т ЦА за постійної витрати промивальної рідини (води), що становила 7 л/с і забезпечувала повне очищення вибою свердловини від шлам, утвореного у процесі руйнування гірської породи зубцями шарошок долота. Вібропришвидження реєстрували на траверсі стєнда, тобто після пристрою зміни жорсткості та демпфування, який входив до складу компонування сталевого бурильного інструмента.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Матрицю планованого експерименту та результати експериментальних досліджень — значення середнього квадратичного відхилення (СКВ) вібропришвидження σ_{WBI} сталевого бурильного інструмента, спричиненого сталевим тришарошковим долотом під час руйнування гірської породи, наведено в табл. 1.

3.1. Емпірична модель стандарту σ_{WBI} для пропластку пісковика твердістю 1440 МПа

У таблицях 2 і 3 подано результати з визначення стандарту σ_{WBI} експерименту, усереднені відповідно за режимними параметрами F_{ct} , n та параметрами бурильного інструмента C , β .

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між се-

ТАБЛИЦЯ 1. План чотирифакторного експерименту з результатами досліджень.

TABLE 1. Plan of the four-factor experiment with research results.

| № дослідду | Частота обертання долоота, $n, \text{хв}^{-1}$ | Осьове статичне навантаження, $F_{\text{ст}}, \text{кН}$ | Жорсткість БІ, $C, \text{кН/м}$ | Коефіцієнт демпфування БІ, $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$ | СКВ $\sigma_{\text{ВБІ}}$ | |
|------------|--|--|---------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|
| | | | | | $P_{\text{ш}}, 1440 \text{ МПа}$ | $P_{\text{ш}}, 2050 \text{ МПа}$ |
| 1, 17 | 82 | 10 | 400 | 0,1 | 0,4959 | 0,4953 |
| 2, 18 | 82 | 15 | 2500 | 40 | 0,5361 | 0,5661 |
| 3, 19 | 82 | 20 | 800 | 70 | 0,6232 | 0,6266 |
| 4, 20 | 82 | 25 | 1700 | 90 | 0,4298 | 0,4165 |
| 5, 21 | 133 | 10 | 800 | 90 | 0,8291 | 0,7692 |
| 6, 22 | 133 | 15 | 1700 | 70 | 1,0397 | 1,0420 |
| 7, 23 | 133 | 20 | 400 | 40 | 0,8578 | 0,7059 |
| 8, 24 | 133 | 25 | 2500 | 0,1 | 1,6905 | 1,4022 |
| 9, 25 | 188 | 10 | 1700 | 40 | 1,1936 | 1,3237 |
| 10, 26 | 188 | 15 | 800 | 0,1 | 1,7183 | 1,3823 |
| 11, 27 | 188 | 20 | 2500 | 90 | 1,0858 | 1,1888 |
| 12, 28 | 188 | 25 | 400 | 70 | 1,5755 | 1,4817 |
| 13, 29 | 285 | 10 | 2500 | 70 | 1,4295 | 1,6309 |
| 14, 30 | 285 | 15 | 400 | 90 | 1,9712 | 2,3810 |
| 15, 31 | 285 | 20 | 1700 | 0,1 | 2,8909 | 2,8019 |
| 16, 32 | 285 | 25 | 800 | 40 | 2,1969 | 2,3000 |

реднім квадратичним відхиленням вібропришвидження бурильного інструмента і змінними чинниками та перевірку умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 4.

У таблиці 4 позначено: $P = 1 - \alpha$ — ймовірність існування кореляційної залежності між змінними факторами та величиною $\sigma_{\text{ВБІ}}$,

ТАБЛИЦЯ 2. Результати експерименту з визначення $\sigma_{\text{ВБІ}}$ усереднені за значеннями режимних параметрів ($p_{\text{ш}} = 1440 \text{ МПа}$).

TABLE 2. The experimental results on $\sigma_{\text{ВБІ}}$ determination averaged by the regime options ($p_{\text{ш}} = 1440 \text{ МПа}$).

| $F_{\text{ст}}, \text{кН}$ | $n, \text{хв}^{-1}$ | | | | Сума | Середнє |
|----------------------------|---------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 82 | 133 | 188 | 285 | | |
| 10 | 0,4959 | 0,8291 | 1,1936 | 1,4295 | 3,9481 | 0,9870 |
| 15 | 0,5361 | 1,0397 | 1,7183 | 1,9712 | 5,2653 | 1,3163 |
| 20 | 0,6232 | 0,8578 | 1,0858 | 2,8909 | 5,4577 | 1,3644 |
| 25 | 0,4298 | 1,6905 | 1,5755 | 2,1969 | 5,8927 | 1,4732 |
| Сума | 2,0850 | 4,4171 | 5,5732 | 8,4885 | 20,5638 | 5,1410 |
| Середнє | 0,5212 | 1,1043 | 1,3933 | 2,1221 | 5,1410 | 1,2852 |

ТАБЛИЦЯ 3. Результати експерименту з визначення σ_{WBI} усереднені за значеннями параметрів бурильного інструменту ($p_{\text{ш}} = 1440$ МПа).**TABLE 3.** The experimental results on σ_{WBI} determination averaged by the drilling tool's options ($p_{\text{ш}} = 1440$ МПа).

| β , кН·с/м | C, кН/м | | | | | Середнє |
|---------------------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 400 | 800 | 1700 | 2500 | Сума | |
| 0,1 | 0,4959 | 1,7183 | 2,8909 | 1,6905 | 6,7956 | 1,6989 |
| 40 | 0,8578 | 2,1969 | 1,1936 | 0,5361 | 4,7844 | 1,1961 |
| 70 | 1,5755 | 0,6232 | 1,0397 | 1,4295 | 4,6679 | 1,1670 |
| 90 | 1,9712 | 0,8291 | 0,4298 | 1,0858 | 4,3159 | 1,0790 |
| Сума | 4,9004 | 5,3675 | 5,5540 | 4,7419 | 20,5638 | 5,1410 |
| Середнє | 1,2251 | 1,3419 | 1,3885 | 1,1855 | 5,1410 | 1,2852 |

σ_0 — величина основної похибки у разі заміни експериментальних даних відповідними емпіричними залежностями.

Ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між σ_{WBI} та зовнішніми незалежними змінними факторами (чинниками) більша за 0,98. Ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими.

Умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{\text{WBI}} \rangle$ також виконується. За таких значень емпіричного коефіцієнта кореляції та гладких «розумних» кривих нейтралізація більш впливових чинників не потрібна.

У таблиці 5 подано значення стандарту вібропришвидження бу-

ТАБЛИЦЯ 4. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних ($p_{\text{ш}} = 1440$ МПа).**TABLE 4.** The results of the partial empirical dependence selection and verification of satisfactory approximation conditions of experimental data ($p_{\text{ш}} = 1440$ МПа).

| Змінний фактор | Частинні емпіричні залежності | Вибіркове значення коефіцієнта кореляції | Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{\text{WBI}} \rangle$ |
|------------------------|---|--|--|
| n , хв ⁻¹ | $\sigma_{\text{WBI}} = -1,266 + 0,1994146n^{0,5}$ | 0,9957 $0,99 < P < 0,998$ | 0,0616 < 0,1285 |
| $F_{\text{СТ}}$, кН | $\sigma_{\text{WBI}} = 1,788 - 7,84244/F_{\text{СТ}}$ | 0,9846 $0,98 < P < 0,99$ | 0,036 < 0,1285 |
| C, кН/м | $\sigma_{\text{WBI}} = 1,0521 + 5,1 \cdot 10^{-4}C - 1,81 \cdot 10^{-7}C^2$ | 0,9952 $0,99 < P < 0,998$ | 0,0076 < 0,1285 |
| β , кН·с/м | $\sigma_{\text{WBI}} = 1,503 - 8,600643 \cdot 10^{-2} \ln \beta$ | 0,9951 $0,99 < P < 0,998$ | 0,028 < 0,1285 |

ТАБЛИЦЯ 5. Значення стандарту вібропришвидження бурильного інструмента, визначені за результатами планованого експерименту та за підібраними залежностями ($p_{ш} = 1440$ МПа).

TABLE 5. Values of the standard vibration acceleration of the drilling tool, determined by the results of the planned experiment and the selected dependences ($p_{ш} = 1440$ МПа).

| Показники | C, кН/м | | | |
|--|---------|--------|--------|--------|
| | 82 | 133 | 188 | 285 |
| Число обертів n , $xв^{-1}$, | 82 | 133 | 188 | 285 |
| Експериментальні значення σ_{wBI} , | 0,5212 | 1,1043 | 1,3933 | 2,1221 |
| $\sigma_{wBI} = -1,266 + 0,1994146n^{0,5}$ | 0,5398 | 1,0338 | 1,4682 | 2,1005 |
| F_{CT} , кН, | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Експериментальні значення σ_{wBI} , | 0,987 | 1,3163 | 1,3644 | 1,4732 |
| $\sigma_{wBI} = 1,788 - 7,84244/F_{CT}$ | 1,0038 | 1,2652 | 1,3959 | 1,4743 |
| C, кН/м | 400 | 800 | 1700 | 2500 |
| Експериментальні значення σ_{wBI} , | 1,2251 | 1,3419 | 1,3885 | 1,1855 |
| $\sigma_{wBI} = 1,0521 + 5,1 \cdot 10^{-4}C - 1,81 \cdot 10^{-7}C^2$ | 1,2271 | 1,3443 | 1,3960 | 1,1958 |
| β , кН·с/м, | 0,1 | 40 | 70 | 90 |
| Експериментальні значення σ_{wBI} , | 1,6989 | 1,1961 | 1,167 | 1,079 |
| $\sigma_{wBI} = 1,503 - 8,600643 \cdot 10^{-2} \ln \beta$ | 1,7010 | 1,1857 | 1,1376 | 1,1160 |

рильного інструмента, визначені за результатами планованого експерименту та за підібраними залежностями (див. табл. 4).

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між середнім квадратичним відхиленням вібропришвидження бурильного інструмента та змінними чинниками експерименту (рівняння багатofакторної емпіричної моделі стандарту σ_{wBI}) для пропластку пісковика ворогищенської світи твердістю 1440 МПа:

$$\sigma_{wBI} = B_{CP} f(n) f(F_{CT}) f(\beta) f(C) = B_{CP} (-1,266 - 0,1994146 \sqrt{n}) \times \\ \times (1,788 - 7,84244/F_{CT}) (1,0521 + 5,1 \cdot 10^{-4}C - 1,81 \cdot 10^{-7}C^2) \times \\ \times (1,503 - 8,600643 \cdot 10^{-2} \ln \beta). \quad (1)$$

У таблиці 6 наведено значення коефіцієнта B , визначені за формулою:

$$B_i = \frac{\sigma_{wBIi}}{f(F_i) f(n_i) f(\beta_i) f(C_i)}, \quad (2)$$

де σ_{wBIi} — значення середнього квадратичного відхилення вібропришвидження траверси стенда за даними табл. 1, яка відповідає i -му дослід; $f(F_{CTi}) f(n_i) f(\beta_i) f(C_i)$ — добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, величини яких відповідають умо-

ТАБЛИЦЯ 6. Значення коефіцієнта B для дослідів 1–16 планованого експерименту ($p_{ш} = 1440$ МПа).

TABLE 6. The value of the B_i coefficient for experiments 1–16 of the planned experiment ($p_{ш} = 1440$ МПа).

| | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| № дослідю | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| B | 0,4385 | 0,5536 | 0,5408 | 0,3467 | 0,5325 | 0,5005 | 0,4086 | 0,5454 |
| № дослідю | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| B | 0,4893 | 0,4045 | 0,3970 | 0,5213 | 0,4983 | 0,5417 | 0,4151 | 0,4451 |

ТАБЛИЦЯ 7. Статистичні характеристики вибірки та результати відбракування артефактів.

TABLE 7. Statistical characteristics of the sample and the results of artifact rejection.

| | | | | | | | |
|----------|--------|------------|-----------------------|----------|-----------|--------|-------------|
| B_{CP} | D_B | σ_B | $t_{кр}$ | Артефакт | B'_{CP} | D'_B | σ'_B |
| 0,4737 | 0,0043 | 0,0656 | 1,75 ($\alpha=0,1$) | 0,3467 | 0,4821 | 0,0034 | 0,0581 |

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

вам i -го дослідю табл. 1.

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

$$\Delta = t_{кр} \sigma \sqrt{(N+1)/N} = 1,75 \cdot 0,0656 \cdot \sqrt{17/16} = 0,1183, \quad (3)$$

де $t_{кр}$ — критична точка розподілу Стьюдента, яка залежить від рівня значущості α та числа степенів вільності $k = N-1$, де N — об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i ($\alpha = 0,05$ (одностороння критична область), $k = 16-1 = 15$). Межі інтервалу наступні:

$$B_{CP} - \Delta = 0,4737 - 0,1183 = 0,3554,$$

$$B_{CP} + \Delta = 0,4737 + 0,1183 = 0,5920.$$

Як свідчать дані табл. 7, за межами інтервалу (0,3554; 0,5920) знаходиться тільки одне значення $B_4 = 0,3467$.

Величина коефіцієнта варіації:

$$K_{ВАР} = (\sigma'_B / B'_{CP}) \cdot 100\% = (0,0581 / 0,4821) \cdot 100\% = 12,0\%. \quad (4)$$

ТАБЛИЦЯ 8. Значення середнього квадратичного відхилення вібропришвидження бурильного інструмента знайдені експериментально та визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції ($p_{ш} = 1440$ МПа).

TABLE 8. Vibration acceleration standard deviation of the the drilling tool found experimentally and determined by an empirical model of multiple nonlinear correlation ($p_{ш} = 1440$ MPa).

| № досліджу | Частота обертання долота, $n, \text{хв}^{-1}$ | Осьове статичне навантаження, $F_{ст}, \text{кН}$ | Жорсткість БІ, $C, \text{кН/м}$ | Коефіцієнт демпфування БІ, $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$ | СКВ | | ВП, % |
|------------|---|---|---------------------------------|--|-----------------|---------------|-------|
| | | | | | $\sigma_{експ}$ | $\sigma_{мм}$ | |
| 1 | 82 | 10 | — | — | 0,4959 | 0,54520 | -9,9 |
| 2 | 82 | 15 | 2500 | 40 | 0,5361 | ,4668 | 12,9 |
| 3 | 82 | 20 | 800 | 70 | 0,6232 | 0,5555 | 10,9 |
| 4 | 82 | 25 | 1700 | 90 | 0,4298 | 0,5977 | -39,1 |
| 5 | 133 | 10 | 800 | 90 | 0,8291 | 0,7505 | 9,5 |
| 6 | 133 | 15 | 1700 | 70 | 1,0397 | 1,0014 | 3,7 |
| 7 | 133 | 20 | 400 | 40 | 0,8578 | 1,0122 | -18 |
| 8 | 133 | 25 | 2500 | 0,1 | 1,6905 | 1,4946 | 11,6 |
| 9 | 188 | 10 | 1700 | 40 | 1,1936 | 1,1761 | 1,5 |
| 10 | 188 | 15 | 800 | 0,1 | 1,7183 | 2,0478 | -19,2 |
| 11 | 188 | 20 | 2500 | 90 | 1,0858 | 1,3185 | -21,4 |
| 12 | 188 | 25 | 400 | 70 | 1,5755 | 1,4567 | 7,5 |
| 13 | 285 | 10 | 2500 | 70 | 1,4295 | 1,3828 | 3,3 |
| 14 | 285 | 15 | 400 | 90 | 1,9712 | 1,7546 | 11,0 |
| 15 | 285 | 20 | 1700 | 0,1 | 2,8909 | 3,3566 | -16,1 |
| 16 | 285 | 25 | 800 | 40 | 2,1969 | 2,3796 | -8,3 |

Це значення знаходиться в інтервалі 10–33% [87], тобто сукупність однорідна і середнє значення 0,4821 є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

У таблиці 8 наведено значення середнього квадратичного відхилення вібропришвидження бурильного інструмента, визначені за рівнянням багатofакторної моделі (1) — $\sigma_{мм}$, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними даними дослідів — $\sigma_{експ}$ (з табл. 1), знайденими за формулою:

$$ВП = \frac{\sigma_{експ} - \sigma_{мм}}{\sigma_{експ}} \cdot 100\% . \tag{5}$$

Статистичні характеристики сукупності значень відносної похибки без відбракованих результатів четвертого дослідів наступні: середнє значення — 11; дисперсія — 34,3012.

Графіки частинних емпіричних залежностей $\sigma_{wBI} = f(n)$, $\sigma_{wBI} = f(\beta)$, $\sigma_{wBI} = f(F_{ст})$, $\sigma_{wBI} = f(C)$ зображено на рис. 1.

3.2. Емпірична модель стандарту σ_{WBI} для пропластку пісковика твердістю 2050 МПа

У таблицях 9 і 10 подано результати з визначення стандарту σ_{WBI} експерименту, усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструмента C , β . Мова йде про досліди 17–32 для пісковика воротищенської світи твердістю 2050 МПа.

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між середнім квадратичним відхиленням вібропришвидження бурильного інструмента і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 11. Сам підбір здійснювали за алгоритмом, поданим у праці [87].

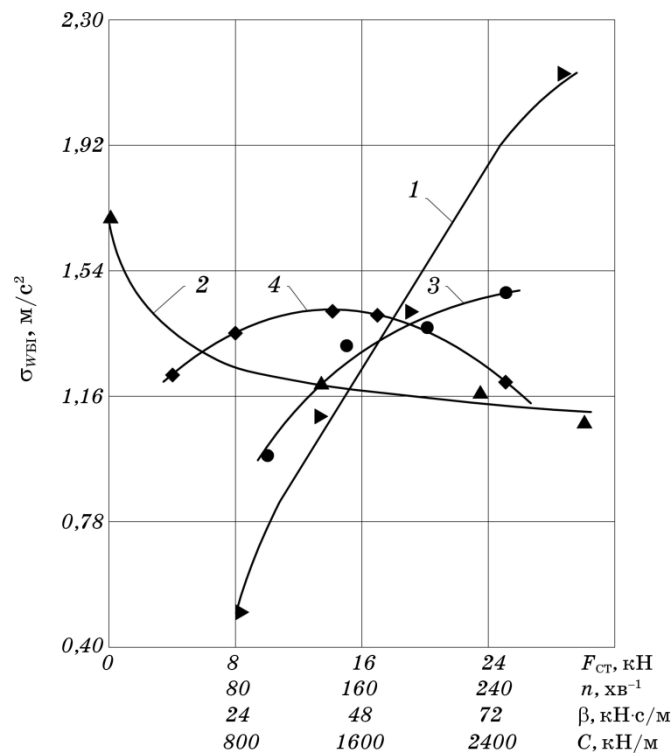


Рис. 1. Графіки частинних залежностей за $p_{\text{ш}} = 1440$ МПа, одержані методом планованого експерименту ($p_{\text{ш}} = 1440$ МПа): 1(▶) — $\sigma_{\text{WBI}} = f(n)$, 2(▲) — $\sigma_{\text{WBI}} = f(\beta)$, 3(●) — $\sigma_{\text{WBI}} = f(F_{\text{CT}})$, 4(◆) — $\sigma_{\text{WBI}} = f(C)$.

Fig. 1. Graphs of partial dependences at $p_{\text{ш}} = 1440$ МПа, obtained by the method of a planned experiment: 1(▶)— $\sigma_{\text{WBI}} = f(n)$, 2(▲)— $\sigma_{\text{WBI}} = f(\beta)$, 3(●)— $\sigma_{\text{WBI}} = f(F_{\text{CT}})$, 4(◆)— $\sigma_{\text{WBI}} = f(C)$.

ТАБЛИЦЯ 9. Результати експерименту з визначення σ_{WBI} усереднені за значеннями режимних параметрів ($p_{\text{ш}} = 2050$ МПа).

TABLE 9. The experimental results on σ_{WBI} determination averaged by the regime options ($p_{\text{ш}} = 2050$ MPa).

| $F_{\text{СТ}}$, кН | $n, \text{хв}^{-1}$ | | | | | Сума | Середнє |
|-------------------------|---------------------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|
| | 82 | 133 | 188 | 285 | | | |
| 10 | 0,4953 | 0,7692 | 1,3237 | 1,6309 | 4,2191 | 1,0548 | |
| 15 | 0,5661 | 1,0420 | 1,3823 | 2,3810 | 5,3714 | 1,3428 | |
| 20 | 0,6266 | 0,7059 | 1,1888 | 2,8019 | 5,3232 | 1,3308 | |
| 25 | 0,4165 | 1,4022 | 1,4817 | 2,3000 | 5,6004 | 1,4001 | |
| Сума | 2,1045 | 3,9193 | 5,3765 | 9,1138 | 20,5141 | 5,1285 | |
| Середнє | 0,5261 | 0,9798 | 1,3441 | 2,2784 | 5,1284 | 1,2821 | |

ТАБЛИЦЯ 10. Результати експерименту з визначення σ_{WBI} усереднені за значеннями параметрів бурильного інструмента ($p_{\text{ш}} = 2050$ МПа).

TABLE 10. The experimental results on σ_{WBI} determination averaged by the drilling tool's options ($p_{\text{ш}} = 2050$ MPa).

| β , кН·с/м | $C, \text{кН/м}$ | | | | | Сума | Середнє |
|---------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | 400 | 800 | 1700 | 2500 | | | |
| 0,1 | 1,5204 | 1,5204 | 1,5204 | 1,5204 | 1,5204 | 1,5204 | |
| 40 | 1,2239 | 1,2239 | 1,2239 | 1,2239 | 1,2239 | 1,2239 | |
| 70 | 1,1953 | 1,1953 | 1,1953 | 1,1953 | 1,1953 | 1,1953 | |
| 90 | 1,1889 | 1,1889 | 1,1889 | 1,1889 | 1,1889 | 1,1889 | |
| Сума | 5,1285 | 5,1285 | 5,1285 | 5,1285 | 5,1285 | 5,1285 | |
| Середнє | 1,2821 | 1,2821 | 1,2821 | 1,2821 | 1,2821 | 1,2821 | |

За таблицею 11 ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між σ_{WBI} та зовнішніми незалежними змінними факторами (чинниками) n, C, β більша за 0,99 і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{\text{WBI}} \rangle$ також виконується.

Ймовірність існування частинної емпіричної залежності $\sigma_{\text{WBI}} = f(F_{\text{СТ}})$ менша за 0,95. Для підсилення впливу другого за потужністю зовнішнього незалежного змінного фактора $F_{\text{СТ}}$, величина σ_{WBI} за зміни $F_{\text{СТ}}$ від 10 до 25 кН збільшилась у 1,33 рази. Нейтралізуємо вплив найпотужнішого чинника — частоти обертання сталевого тришарашкового долота, величина σ_{WBI} за зміни n від 82 до 285 хв^{-1} збільшилась у 4,33 рази.

Нейтралізація здійснюється за методикою [88] та частинною емпіричною залежністю $\sigma_{\text{WBI}} = 0,003246 \cdot n^{1,1580998}$. За середнього значення частоти обертання ($n_{\text{ср}} = 172 \text{ хв}^{-1}$):

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

TABLE 11. The results of the partial empirical dependence selection and verification of satisfactory approximation conditions of experimental data ($p_{ш} = 2050$ МПа).

| Змінний фактор | Частинні емпіричні залежності | Вибіркове значення коефіцієнта кореляції | Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{WBI} \rangle$ |
|-------------------------------------|---|--|---|
| $n, \text{хв}^{-1}$ | $\sigma_{WBI} = 0,003246n^{1,1580998}$ | 0,9974 $0,99 < P < 0,998$ | 0,0411 < 0,1282 |
| $F_{CT}, \text{кН}$ | $\sigma_{WBI} = 1,638 - 5,558902/F_{CT}$ | 0,9185 $0,9 < P < 0,95$ | 0,05 < 0,1282 |
| $C, \text{кН/м}$ | $\sigma_{WBI} = 1,3805317 - 4,842 \cdot 10^{-4}C + 5,57645 \cdot 10^{-7}C^2 - 1,5733 \cdot 10^{-10}C^3$ | 1 $P = 1$ | 0,002 < 0,1282 |
| $\beta, \text{кН} \cdot \text{с/м}$ | $\sigma_{WBI} = 1,398\beta^{-3,636905 \cdot 10^{-2}}$ | 1 $P = 1$ | 0 < 0,1282 |

$$\sigma_{WBI} = 0,003246 n^{1,1580998} = 0,003345 \cdot 172^{1,152168} \approx 1,2598 \text{ м/с}^2.$$

Значення $f(n_i)$, визначені за формулою $\sigma_{WBI} = 0,003246 \cdot n^{1,1580998}$ наступні: коли $n = 82 \text{ хв}^{-1}$, $\sigma_{WBI} = 0,5343 \text{ м/с}^2$; коли $n = 133 \text{ хв}^{-1}$, $\sigma_{WBI} = 0,9354 \text{ м/с}^2$; коли $n = 188 \text{ хв}^{-1}$, $\sigma_{WBI} = 1,3965 \text{ м/с}^2$; коли $n = 285 \text{ хв}^{-1}$, $\sigma_{WBI} = 2,261 \text{ м/с}^2$. Різниця $|f(n_{CP}) - f(n_i)|$ складає: для $n = 82 \text{ хв}^{-1}$, $|1,2598 - 0,5342| = 0,7256 \text{ м/с}^2$; для $n = 133 \text{ хв}^{-1}$, $|1,2598 - 0,9354| = 0,3244 \text{ м/с}^2$; для $n = 188 \text{ хв}^{-1}$, $|1,2598 - 1,3965| = 0,1367 \text{ м/с}^2$; для $n = 285 \text{ хв}^{-1}$, $|1,2598 - 2,2610| = 1,0012 \text{ м/с}^2$.

Скориговані значення визначали за формулою

$$\sigma_{WBI_CKi} = \sigma_{WBI} + [f(n_{CP}) - f(n_i)],$$

їх наведено у табл. 12. Скориговані результати планового експерименту з визначенням стандарту пришвидження бурильного інструмента, усереднені за конструктивними і режимними чинниками, подано у табл. 13 і 14 відповідно.

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між середнім квадратичним відхиленням вібропришвидження бурильного інструмента та змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями скоригованих даних σ_{WBI_CKi} наведено у табл. 15.

У таблиці 16 подано значення стандарту вібропришвидження бурильного інструмента, визначені за результатами планового експерименту і підібраними залежностями для чинників n , C , β (див. табл. 11), та за скоригованими результатами і підбраною залежніс-

ТАБЛИЦЯ 12. Скориговані значення середнього квадратичного відхилення вібропришвидження бурильного інструмента.

TABLE 12. Adjusted values of the vibration acceleration standard deviation of the drilling tool.

| № досліджу | Частота обертання долота, $n, \text{хв}^{-1}$ | Осьове статичне навантаження, $F_{\text{ст}}, \text{кН}$ | Жорсткість БІ, $C, \text{кН/м}$ | Коефіцієнт демпфування БІ, $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$ | $\sigma_{\text{WBІ}}$ | $\sigma_{\text{WBІ_СК1}}$ |
|------------|---|--|---------------------------------|--|-----------------------|----------------------------|
| 17 | 82 | 10 | 400 | 0,1 | 0,4953 | 1,2209 |
| 18 | 82 | 15 | 2500 | 40 | 0,5661 | 1,2917 |
| 19 | 82 | 20 | 800 | 70 | 0,6266 | 1,3522 |
| 20 | 82 | 25 | 1700 | 90 | 0,4165 | 1,1421 |
| 21 | 133 | 10 | 800 | 90 | 0,7692 | 1,0936 |
| 22 | 133 | 15 | 1700 | 70 | 1,0420 | 1,3664 |
| 23 | 133 | 20 | 400 | 40 | 0,7059 | 1,0303 |
| 24 | 133 | 25 | 2500 | 0,1 | 1,4022 | 1,7266 |
| 25 | 188 | 10 | 1700 | 40 | 1,3237 | 1,1870 |
| 26 | 188 | 15 | 800 | 0,1 | 1,3823 | 1,2456 |
| 27 | 188 | 20 | 2500 | 90 | 1,1888 | 1,0513 |
| 28 | 188 | 25 | 400 | 70 | 1,4817 | 1,3450 |
| 29 | 285 | 10 | 2500 | 70 | 1,6309 | 0,6297 |
| 30 | 285 | 15 | 400 | 90 | 2,3810 | 1,3798 |
| 31 | 285 | 20 | 1700 | 0,1 | 2,8019 | 1,8007 |
| 32 | 285 | 25 | 800 | 40 | 2,3000 | 1,2988 |

ТАБЛИЦЯ 13. Усереднення скоригованих результатів планованого експерименту за режимними параметрами ($p_{\text{ш}} = 2050 \text{ МПа}$).

TABLE 13. Averaging the adjusted results of the planned experiment by the regime options ($p_{\text{ш}} = 2050 \text{ МПа}$).

| $F_{\text{ст}}, \text{кН}$ | $n, \text{хв}^{-1}$ | | | | | Сума | Середнє |
|----------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--|---------|---------|
| | 82 | 133 | 188 | 285 | | | |
| 10 | 1,2209 | 1,0936 | 1,1870 | 0,6297 | | 4,1312 | 1,0328 |
| 15 | 1,2917 | 1,3664 | 1,2456 | 1,3798 | | 5,2835 | 1,3209 |
| 20 | 1,3522 | 1,0303 | 1,0513 | 1,8007 | | 5,2345 | 1,3086 |
| 25 | 1,1421 | 1,7266 | 1,3450 | 1,2988 | | 5,5125 | 1,3781 |
| Сума | 5,0069 | 5,2169 | 4,8289 | 5,1090 | | 20,1617 | 5,0404 |
| Середнє | 1,2517 | 1,3042 | 1,2072 | 1,2772 | | 5,0404 | 1,2601 |

тюдля чинника $F_{\text{ст}}$ (див. табл. 15).

Отже, на основі експериментальних та скоригованих даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між середнім квадратичним відхиленням вібропришвидження бурильного інструмента та змінними чинниками експерименту (рів-

ТАБЛИЦЯ 14. Усереднення скоригованих результатів планованого експерименту за параметрами бурового інструмента ($p_m = 2050$ МПа).

TABLE 14. Averaging the adjusted results of the planned experiment by the drilling tool's options ($p_m = 2050$ МПа).

| β , кН·с/м | C, кН/м | | | | | Середнє |
|---------------------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 400 | 800 | 1700 | 2500 | Сума | |
| 0,1 | 1,2209 | 1,2456 | 1,8007 | 1,7266 | 5,9938 | 1,4984 |
| 40 | 1,0303 | 1,2988 | 1,1870 | 1,2917 | 4,8078 | 1,2020 |
| 70 | 1,3450 | 1,3522 | 1,3664 | 0,6297 | 4,6933 | 1,1733 |
| 90 | 1,3798 | 1,0936 | 1,1421 | 1,0513 | 4,6668 | 1,1667 |
| Сума | 4,9760 | 4,9902 | 5,4962 | 4,6993 | 20,1617 | 5,0404 |
| Середнє | 1,2440 | 1,2476 | 1,3741 | 1,1748 | 5,0405 | 1,2601 |

ТАБЛИЦЯ 15. Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації скоригованих даних σ_{WBI_CK1} .

TABLE 15. The results of the selection of partial empirical dependencies and verification of the satisfactory approximation conditions for the adjusted data σ_{WBI_CK1} .

| Змінний фактор | Частинні емпіричні залежності | Вибіркове значення коефіцієнта кореляції | Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \langle \sigma_{WBI} \rangle$ |
|------------------------|---|--|---|
| n , хв ⁻¹ | Кореляція між змінними величинами відсутня, вплив частоти обертання нейтралізований | 0,011 | — |
| F_{CT} , кН | $\sigma_{WBI_CK1} = 1,616 - 5,557424/F_{CT}$ | 0,9492 $P = 0,95$ | 0,05 < 0,1260 |
| C , кН/м | $\sigma_{WBI_CK1} = 1,10824342 + 3,831 \cdot 10^{-4}C - 1,36606 \cdot 10^{-7}C^2$ $\sigma_{WBI_CK1} = 1,3583775 - 4,838 \cdot 10^{-4}C + 5,57491 \cdot 10^{-7}C^2 - 1,57343 \cdot 10^{-10}C^3$ | 0,9374 0,9 < P < 0,95 1 $P = 1$ | 0,0416 < 0,126 0 < 0,1282 |
| β , кН·с/м | Не визначали | — | — |

няння багатфакторної емпіричної моделі стандарту σ_{WBI}) для пропластку пісковику воротищенської світи твердістю 2050 МПа:

$$\sigma_{WBI} = B_{CP} f(n) f(F_{CT}) f(\beta) f(C) = B_{CP} (0,003246 n^{1,1580998}) \times \\ \times (1,616 - 5,557424/F_{CT}) (1,398 \beta^{-3,63905 \cdot 10^{-2}}) \times \\ \times (1,3805317 - 4,842 \cdot 10^{-4}C + 5,57645 \cdot 10^{-7}C^2 - 1,5733 \cdot 10^{-10}C^3). \quad (6)$$

У таблиці 17 наведено значення коефіцієнта B , визначені за фор-

ТАБЛИЦЯ 16. Значення стандарту вібропришвидження бурильного інструмента, визначені за результатами планового експерименту і підібраними залежностями для чинників n, C, β та за скоригованими результатами і підбраною залежністю для чинника F_{CT} .

TABLE 16. Values of the standard vibration acceleration of the drilling tool, determined by the results of the planned experiment and the selected dependences for the factors n, C, β , and the adjusted results and the selected dependence for F_{CT} .

| Показники | Значення | | | |
|---|----------|--------|--------|--------|
| Число обертів $n, \text{хв}^{-1}$ | 82 | 133 | 188 | 285 |
| Експериментальні значення σ_{WBI} | 0,5261 | 0,9798 | 1,3441 | 2,2784 |
| $\sigma_{WBI} = 0,003246n^{1,1580998}$ | 0,5342 | 0,9354 | 1,3965 | 2,2610 |
| $F_{CT}, \text{кН}$ | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Скориговані значення σ_{WBI_CK1} | 1,0328 | 1,3209 | 1,3086 | 1,3781 |
| $\sigma_{WBI_CK1} = 1,616 - 5,557424/F_{CT}$ | 1,0603 | 1,2455 | 1,3381 | 1,3937 |
| $C, \text{кН/м}$ | 400 | 800 | 1700 | 2500 |
| Експериментальні значення σ_{WBI} | 1,266 | 1,2695 | 1,396 | 1,197 |
| $\sigma_{WBI} = 1,3805317 - 0,0004842C + 5,57645 \cdot 10^{-7}C^2 - 1,5733 \cdot 10^{-10}C^3$ | 1,266 | 1,2695 | 1,396 | 1,197 |
| $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$ | 0,1 | 40 | 70 | 90 |
| Експериментальні значення σ_{WBI} | 1,5204 | 1,2239 | 1,1953 | 1,1889 |
| $\sigma_{WBI} = 1,398\beta^{-0,03636905}$ | 1,5201 | 1,2225 | 1,1978 | 1,1870 |

ТАБЛИЦЯ 17. Значення коефіцієнта B для дослідів 17–32 планового експерименту ($p_{ш} = 2050 \text{ МПа}$).

TABLE 17. The value of the coefficient B for experiments 17–32 of the planned experiment ($p_{ш} = 2050 \text{ MPa}$).

| | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| № дослідю | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| B | 0,4544 | 0,5814 | 0,5765 | 0,3376 | 0,5147 | 0,5349 | 0,3644 | 0,5912 |
| № дослідю | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| B | 0,5238 | 0,4118 | 0,4477 | 0,5020 | 0,4744 | 0,5626 | 0,4365 | 0,4704 |

мулою (2) для дослідів 17–32.

У таблиці 18 подано статистичні характеристики сукупності значень B та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B).

Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP} - \Delta; B_{CP} + \Delta$), де

$$\Delta = t_{KP} \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,076 \sqrt{\frac{17}{16}} = 0,1371. \quad (7)$$

Як свідчать дані табл. 18 за межами інтервалу (0,3494; 0,6226)

ТАБЛИЦЯ 18. Статистичні характеристики вибірки та результати відбракування артефактів.**TABLE 18.** Statistical characteristics of the sample and the results of artifact rejection.

| B_{CP} | D_B | σ_B | t_{KP} | Артефакт | B'_{CP} | D'_B | σ'_B |
|----------|--------|------------|-----------------------|----------|-----------|--------|-------------|
| 0,4865 | 0,0058 | 0,076 | 1,75 ($\alpha=0,1$) | 0,3376 | 0,4964 | 0,0045 | 0,0671 |

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

ТАБЛИЦЯ 19. Значення середнього квадратичного відхилення вібропришвидження бурильного інструмента, знайдені експериментально та визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції ($p_{ш} = 2050$ МПа).**TABLE 19.** Standard deviation of the vibration acceleration of the drilling tool found experimentally and determined by an empirical model of multiple nonlinear correlation ($p_{ш} = 2050$ MPa).

| № дослідю | Частота обертання долота, $n, \text{хв}^{-1}$ | Осьове статичне навантаження, $F_{СТ}, \text{кН}$ | Жорсткість БІ, $C, \text{кН/м}$ | Коефіцієнт демпфування БІ, $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$ | СКВ | | ВП, % |
|-----------|---|---|---------------------------------|--|------------------------|----------------------|-------|
| | | | | | $\sigma_{\text{експ}}$ | $\sigma_{\text{ММ}}$ | |
| 17 | 82 | 10 | — | — | 0,4953 | 0,5411 | -9,2 |
| 18 | 82 | 15 | 2500 | 40 | 0,5661 | 0,4833 | 14,6 |
| 19 | 82 | 20 | 800 | 70 | 0,6266 | 0,5395 | 13,9 |
| 20 | 82 | 25 | 1700 | 90 | 0,4165 | 0,6124 | -47,0 |
| 21 | 133 | 10 | 800 | 90 | 0,7692 | 0,7419 | 3,5 |
| 22 | 133 | 15 | 1700 | 70 | 1,0420 | 0,9670 | 7,2 |
| 23 | 133 | 20 | 400 | 40 | 0,7059 | 0,9616 | -36,2 |
| 24 | 133 | 25 | 2500 | 0,1 | 1,4022 | 1,1775 | 16 |
| 25 | 188 | 10 | 1700 | 40 | 1,3237 | 1,2544 | 5,2 |
| 26 | 188 | 15 | 800 | 0,1 | 1,3823 | 1,6662 | -20,1 |
| 27 | 188 | 20 | 2500 | 90 | 1,1888 | 1,3180 | -10,9 |
| 28 | 188 | 25 | 400 | 70 | 1,4817 | 1,4651 | 1,1 |
| 29 | 285 | 10 | 2500 | 70 | 1,6309 | 1,7062 | -4,6 |
| 30 | 285 | 15 | 400 | 90 | 2,3810 | 2,1007 | 11,8 |
| 31 | 285 | 20 | 1700 | 0,1 | 2,8019 | 3,1870 | -13,7 |
| 32 | 285 | 25 | 800 | 40 | 2,3000 | 2,4276 | -5,5 |

знаходиться тільки значення B_{20} .

Величина коефіцієнта варіації:

$$K_{\text{ВАР}} = \frac{\sigma'_B}{B'_{CP}} \cdot 100\% = \frac{0,0671}{0,4964} \cdot 100\% = 13,5\%. \quad (8)$$

Це значення знаходиться в інтервалі 10–33 %, тобто сукупність

однорідна і середнє значення 0,4964 є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

У таблиці 19 наведено значення середнього квадратичного відхилення вібропришвидження бурильного інструмента σ_{MM} , визначені за рівнянням багатofакторної моделі (6), та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними даними дослідів $\sigma_{експ}$, наведеними в табл. 1.

Статистичні характеристики сукупності значень відносної похибки без відбракованих результатів двадцятого досліду наступні: середнє значення — 11,6; дисперсія — 74,581.

Графіки частинних емпіричних залежностей $\sigma_{WBI} = f(n)$, $\sigma_{WBI} = f(\beta)$, $\sigma_{WBI} = f(F_{CT})$, $\sigma_{WBI} = f(C)$ за $p_{ш} = 2050$ МПа зображено на рис. 2.

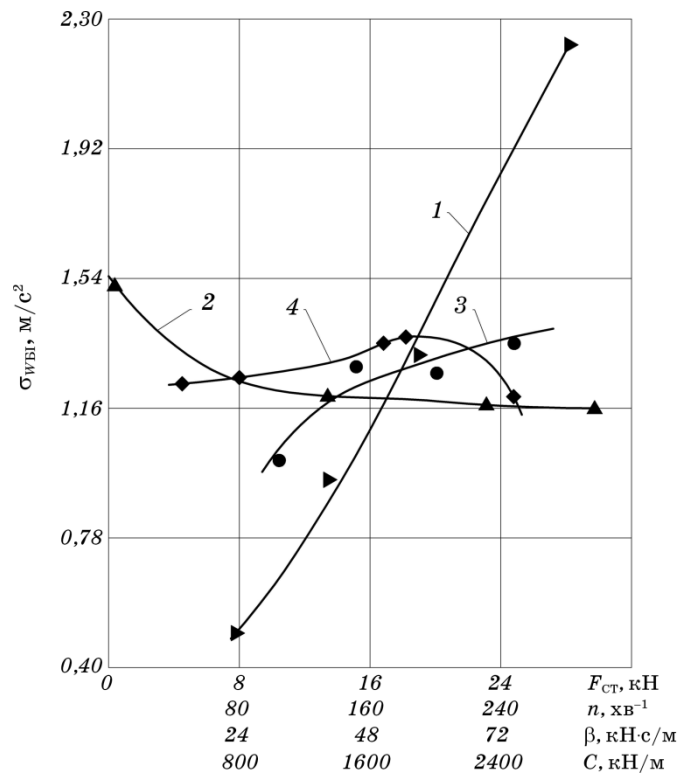


Рис. 2. Графіки частинних залежностей за $p_{ш} = 2050$ МПа, одержані методом планованого експерименту ($p_{ш} = 1440$ МПа): 1(▶) — $\sigma_{WBI} = f(n)$, 2(▲) — $\sigma_{WBI} = f(\beta)$, 3(●) — $\sigma_{WBI} = f(F_{CT})$, 4(◆) — $\sigma_{WBI} = f(C)$.

Fig. 2. Graphs of partial dependences at $p_{ш} = 2050$ МПа, obtained by the method of a planned experiment: 1(▶)— $\sigma_{WBI} = f(n)$, 2(▲)— $\sigma_{WBI} = f(\beta)$, 3(●)— $\sigma_{WBI} = f(F_{CT})$, 4(◆)— $\sigma_{WBI} = f(C)$.

4. ВИСНОВКИ

1. Частинні залежності $\sigma_{\text{WB}} = f(n)$, $\sigma_{\text{WB}} = f(\beta)$, $\sigma_{\text{WB}} = f(F_{\text{CT}})$, $\sigma_{\text{WB}} = f(C)$, одержані під час буріння у пропластках гірської породи твердістю 1440 МПа та 2050 МПа, представляють собою плавні («розумні») криві, які, крім залежності $\sigma_{\text{WB}} = f(F_{\text{CT}})$ для $p_{\text{ш}} = 2050$ МПа, з ймовірністю більшою за 0,98 апроксимують результати планованого факторного експерименту.

Ймовірність існування частинної залежності $\sigma_{\text{WB}} = f(F_{\text{CT}})$ для $p_{\text{ш}} = 2050$ МПа, підбраної за експериментальними даними, знаходиться в межах $0,9 < P < 0,95$. Для збільшення ймовірності існування залежності нейтралізується вплив найпотужнішого фактора (частоти обертання сталевого тришарошкового долота за методикою представленою у праці [88]. Ймовірність одержаної залежності за скоригованими даними становить 0,95, що є задовільним результатом апроксимації.

2. Збільшення частоти обертання і осьового статичного навантаження призводить до зростання вібропришвидження траверси стєнда, тобто вібропришвидчення сталевого бурильного інструмента після пристрою зміни жорсткості та коефіцієнта демпфування.

3. Зі збільшенням коефіцієнта демпфування зростає величина енергії коливань, втраченої в демпфувальному вузлі пристрою, тобто енергія вібропришвидження сталевого бурильного інструмента зменшується. Отже, шляхом збільшенням коефіцієнта β можна забезпечити захист сталевого бурильного інструмента від шкідливого впливу вібрацій, генерованих сталевим тришарошковим долотом.

4. Графік частинної залежності $\sigma_{\text{WB}} = f(C)$ для обох пропластків гірської породи має локальний максимум. Для пропластка твердістю 1440 МПа максимум енергії відповідає жорсткості $C = 1409$ кН/м, для пропластка твердістю 2050 МПа — жорсткості $C = 1790$ кН/м, тобто зі збільшенням твердості гірської породи максимум енергії переміщується в область більших значень жорсткості. Це корелюється з результатами дослідження впливу параметрів сталевого бурильного інструмента на енергоємність процесу руйнування гірської породи, одержаними для цього планованого факторного експерименту [83], згідно яких для пропластка твердістю 1440 МПа мінімум енергоємності відповідає жорсткості $C = 1375$ кН/м, а для пропластка твердістю 2050 МПа — жорсткості $C = 1602$ кН/м.

5. Для захисту сталеві бурильної колони від шкідливого впливу вібрацій потрібно в компонуванні її низу використовувати пристрої з великим коефіцієнтом демпфування.

6. Для зменшення енерговитрат під час буріння нафтових і газових свердловин у компонуванні низу бурильної колони повинні бути пристрої, жорсткість пружного елемента яких дозволяє досягати мінімуму енергоємності процесу руйнування гірської породи сталеві

ВИМ ТРИШАРОШКОВИМ ДОЛОТОМ.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. L. Tang, B. Guo, X. Zhu, C. Shi, and Y. Zhou, *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **39**, No. 4: 885 (2020).
2. Guangjian Dong and Ping Chen, *Shock and Vibration*, **2016**, Article ID 7418635 (2016).
3. Xiaohua Zhu and Zhi Zhang, *Natural Gas Industry B*, **4**, No. 5: 374 (2017).
4. O. Vlasiy, V. Mazurenko, L. Ropyak, and A. Rogal, *East-Eur. J. Enterprise Technologies*, **1**, No. 7(85): 25 (2017).
5. I. P. Shats'kyi, O. M. Lyskanych, and V. A. Kornuta, *Strength Mater.*, **48**, No. 3: 469 (2016).
6. 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*, **128**: 720 (2020).
7. T. Pryhorovska and L. Ropyak, *2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, INSPEC Accession Number: 19431197 (2019).
8. Y. Wang, C. Qian, L. Kong, Q. Zhou, and J. Gong, *Appl. Sci.*, **10**, No. 8: 2669 (2020).
9. O. Onysko, V. Kopei, I. Medvid, L. Pituley, and T. Lukan, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Springer, Cham.: 2020).
10. O. R. Onysko, V. B. Kopey, and V. G. Panchuk, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **749**, Accession Number 012007 (2020).
11. I. Shatskyi, L. Ropyak, and A. Velychkovych, *Eng. Solid Mechan.*, **8**, No. 4: 301 (2020).
12. Y. Y. Striletskyi, S. I. Melnychuk, V. M. Gryga, and O. P. Pashkevych, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* [Scientific Bulletin of the National Mining University], No. 3: 19 (2020).
13. L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. Ya. Ropyak, and A. V. Gorbatskii, *Soviet Mater. Sci.*, **23**, No. 3: 267 (1987).
14. L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, and L. Ya. Ropyak, *Protection of Metals*, **25**, No. 2: 185 (1989).
15. R. S. Yakym and D. Yu. Petryna, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 5: 731 (2020).
16. L. Ya. Ropyak, T. O. Pryhorovska, and K. H. Levchuk, *Progress in Physics of Metals*, **21**, No. 2: 274 (2020).
17. T. A. Pryhorovska and S. S. Chaplinskiy, *Neftyanoye Khozyaystvo—Oil Industry*, No. 1: 38 (2018) (in Russian).
18. L. Ropyak, I. Schuliar, and O. Bohachenko, *East-Eur. J. Enterprise Technologies*, **1**, No. 5(59): 53 (2016) (in Ukrainian).
19. J. A. Nietcho, N. Stosic, and A. Kovacevic, *Institution of Mechanical Engineers – 7th International Conference on Compressors and Their Systems*, **2011**: 317 (2011).
20. A. Krivosheya, J. Danilchenko, M. Storchak, and S. Pasternak, *Mechanisms and Machine Science*, **34**: 425 (2016).

21. I. P. Shatskii, *J. Appl. Mech. and Techn. Phys.*, **30**, No. 5: 828 (1989).
22. I. P. Shatskyi, M. V. Makoviichuk, and A. B. Shcherbii, *Proceedings of the 11th International Conference on Shell Structures: Theory and Applications, SSTA*, **2017**, 4: 165 (2018).
23. L. Ropyak and V. Ostapovych, *East-Eur. J. Enterprise Technologies*, **2**, No. 5(80): 50 (2016) (in Ukrainian).
24. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 540 (2017).
25. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, V. A. Herasymenko, and N. S. Evtushenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 2: 235 (2018).
26. I. P. Shatskyi, L. Ya. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, *Strength of Materials*, **48**, No. 5: 726 (2016).
27. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 47 (2019).
28. I. P. Shatskyi, V. V. Perepichka, and L. Y. Ropyak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 1: 69 (2020) (in Ukrainian).
29. J. Cizek, I. Dlouhy, F. Siska, and K. A. Khor, *J. Thermal Spray Technology*, **23**, No. 8: 1339 (2014).
30. L. Ya. Ropyak, V. S. Vytvytskyi, A. S. Velychkovych, T. O. Pryhorovska, and M. V. Shovkoplias, *IOP Conf Ser: Mater. Sci. Eng.*, **1018**: 012014 (2021).
31. G. Muthukumaran and P. Dinesh Babu, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, **43**: 103 (2021).
32. M. Paschekko, K. Dziedzic, E. Mendyk, and J. Jyzwik, *J. Tribol.*, **140**, No. 2: 021302 (2017).
33. M. Paschekko, J. Montusiewicz, K. Dziedzic, and J. Jozwik, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **56**: 316 (2017).
34. Z. A. Duryahina, S. A. Bespalov, V. Ya. Pidkova, and D. Yu. Polockyj, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33** (Spec. Iss.): 393 (2011).
35. Z. A. Duriagina, T. M. Kovbasyuk, and S. A. Bespalov, *Usp. Fiz. Met.*, **17**, No. 1: 29 (2016) (in Ukrainian).
36. A. Ostapovets, P. Molnár, and A. Jäger, *J. Mater. Sci.*, **48**, No. 5: 2123 (2013).
37. L. Yu. Kozak, *Mater. Sci.*, **35**, No. 1: 132 (1999).
38. V. A. Tatarenko, T. M. Radchenko, and V. M. Nadutov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **25**, No. 10: 1303 (2003).
39. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and S. M. Bokoch, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **28**, No. 12: 1699 (2006).
40. K. H. Levchuk, T. M. Radchenko, and V. A. Tatarenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 1: 1 (2021) (in Ukrainian).
41. J. Grydzhuk, I. Chudyk, A. Velychkovych, and A. Andrusyak, *East-Eur. J. Enterprise Technologies*, **1**, No. 7(97): 6 (2019).
42. T. Pryhorovska, *Engineering Solid Mechanics*, **6**, No. 4: 315 (2018).
43. V. Moisyshyn, I. Voyevydko, and V. Tokaruk, *Mining of Mineral Deposits*, **14**, No. 3: 128 (2020).
44. N. Volchenko, A. Volchenko, D. Volchenko, P. Poliakov, V. Malyk, D. Zhuravliov, V. Vytvytskyi, and P. Krasin, *East-Eur. J. Enterprise Technologies*, **1**, No. 5(97): 47 (2019).
45. R. M. Tatsiy, O. Y. Pazen, S. Y. Vovk, L. Y. Ropyak, and T. O. Pryhorovska, *J. the Serbian Society for Computational Mechanics*, **13**, No. 2: 36 (2019).

46. R. M. Tatsii, and O. Y. Pazen, *J. Eng. Phys. Thermophysics*, **91**, No. 6: 1373 (2018).
47. O. Vytyaz, I. Chudyk, and V. Mykhailiuk, *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, **591** (2015).
48. D. A. Panevnik and A. S. Velichkovich, *Neftyanoe Khozyaystvo—Oil Industry*, **2017**, No.1: 70 (2017).
49. M. Dutkiewicz, I. Gołębiowska, I. Shatskyi, V. Shopa, and A. Velychkovych, *MATEC Web Conf.*, **178**: 06010 (2018).
50. A. S. Velichkovich, *Chemical and Petroleum Engineering*, **43**, Nos. 7–8: 458 (2007).
51. I. Shatskyi, I. Popadyuk, and A. Velychkovych, *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*, **249**: 343 (2018).
52. V. Moisyshyn, and K. Levchuk, *Mining of Mineral Deposits*, **10**, No. 3: 65 (2016).
53. K. G. Levchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 5: 701 (2018) (in Ukrainian).
54. V. Moisyshyn, and K. Levchuk, *Oil and Gas Science and Technology*, **72**, No. 5, Article Number 27 (2017).
55. V. Falshtynskyi, P. Saik, V. Lozynskyi, R. Dychkovskyi, and M. Petlovanyi, *Mining of Mineral Deposits*, **12**: 68 (2018).
56. V. S. Falshtynskyi, R. O. Dychkovskyi, V. G. Lozynskyi, and P. B. Saik, *J. Sustainable Mining*, **12**, No. 3: 8 (2013).
57. S. Ilin, L. Adorska, V. Samusia, D. Kolosov, and, I. Ilina, *E3S Web of Conf.*, **109**, No. 00030. (2019).
58. I. Kessai, S. Benammar, M. Z. Doghmane, and K. F. Tee, *Appl. Sci.*, **10**, No. 18: 6523 (2020).
59. K. G. Levchuk, *SOCAR Proceedings*, No. 2: 23 (2017) (in Russian).
60. V. M. Moisyshyn, M. V. Lyskanych, L. V. Borysevych, N. B. Kolych, and R. A. Zhovnuruk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 8: 1087 (2019) (in Ukrainian).
61. E. I. Kryzhaniv's'kyi, V. P. Rudko, and I. P. Shats'kyi, *Mater. Sci.*, **40**, No. 4: 547 (2004).
62. I. P. Shats'kyi and A. B. Struk, *Strength of Materials*, **41**, No. 5: 548 (2009).
63. A. S. Velychkovych, A. V. Andrusyak, T. O. Pryhorovska, and L. Y. Ropyak, *Oil and Gas Science and Technology*, **74**, Article Number 2019039 (2019).
64. I. I. Vytvytskyi, M. V. Seniushkovych, and I. P. Shatskyi, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* [Scientific Bulletin of the National Mining University], No. 5: 29 (2017).
65. I. Shatskyi, I. Vytvytskyi, M. Seniushkovych, and A. Velychkovych, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **564**: 012073 (2019).
66. I. Shatskyi, A. Velychkovych, I. Vytvytskyi, M. Seniushkovych, *Eng. Solid Mechan.*, **7**: 355 (2019).
67. I. P. Shatskii and V. V. Perepichka, *J. Appl. Mech. Techn. Phys.*, **54**, No. 6: 1016 (2013).
68. K. G. Levchuk, V. M. Moisyshyn, and I. V. Tsidylo, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1655 (2016) (in Ukrainian).
69. I. Shatskyi and V. Perepichka, *Dynamical Systems in Applications. DSTA 2017* (Eds: J. Awrejcewicz), **249**: 335 (2018).

70. I. P. Shats'kyi, and M. V. Makoviichuk, *Mater. Sci.*, **41**, No. 4: 486 (2005).
71. I. P. Shats'kyi, M. V. Makoviichuk, and A. B. Shcherbii, *J. Math. Sci.*, **238**, No. 2: 165 (2019).
72. S. Fintová, M. Arzaghi, I. Kuběna, L. Kunz, and C. Sarrazin-Baudoux, *Int. J. Fatigue*, **98**: 187 (2017).
73. A. S. Velichkovich, I. I. Popadyuk and V. M. Shopa, *Chemical and Petroleum Engineering*, **46**, Nos. 9–10: 518 (2011).
74. Liu Yongwang, Guan Zhichuan, Zhang Hongning, and Zhang Bo, *Shock and Vibration*, **2016**: 1 (2016).
75. A. Velychkovych, I. Petryk, and L. Ropyak, *Shock and Vibration*, **2020**, Article ID 3292713 (2020).
76. V. M. Shopa, I. P. Shatskii, and I. I. Popadyuk, *Soviet Engineering Research*, **9**, No. 3: 42 (1989).
77. X. Yuan, T. Tian, H. Ling, T. Qiu, and H. He, *Shock and Vibration*, **2019**, article ID 1498962 (2019).
78. A. S. Velichkovich and S. V. Velichkovich, *Chemical and Petroleum Engineering*, **37**, Nos. 3–4: 213 (2001).
79. T. G. M. Vromen, *Control of Stick-Slip Vibrations in Drilling Systems* (Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven: 2015).
80. A. A. Bedzir, I. P. Shatskii, and V. M. Shopa, *Int. Appl. Mech.*, **31**, No. 5: 351 (1995).
81. S. V. Velichkovich, I. I. Popadyuk, I. P. Shatskii, and V. M. Shopa, *Strength of Materials*, **23**, No. 3: 279 (1991).
82. I. Yo. Popadyuk, I. P. Shats'kyi, V. M. Shopa, and A. S. Velychkovych, *J. Math. Sci.*, **215**, No. 2: 243 (2016).
83. 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).
84. V. M. Moisyshyn and O. O. Slabyi, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 4: 541 (2018).
85. Quanta Zhu, Zongming Zou, Bing Huang, Linhu Ma and Jiaxiang Xia, *Natural Gas Industry B*, **4**, No. 2: 73 (2017).
86. B. D. Borysevych, V. M. Moisyshyn, and R. B. Shcherbii, *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh ta Hazovykh Rodovyshch*, No. 3(32): 23 (2009) (in Ukrainian).
87. A. G. Belov, *Comput. Math. Model.*, **29**: 30 (2018).
88. M. M. Protodyakonov and R. I. Teder, *Metodika Ratsionalnogo Planirovaniya Eksperimenta* (Moscow: Nauka: 1970) (in Russian).