

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,  
А. А. ГАПОНЕНКО, Є. Ю. БОБРОВ, аспіранти  
Криворізький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ЕНЕРГОЄМНОЇ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

**Метою дослідження** є моделювання процесів гірничого виробництва, як контактної взаємодії породоруйнівного органу з середовищем, на прикладі буріння свердловин із застосуванням енергетичних характеристик технологічних агрегатів та параметрів акустичної емісії.

**Методи дослідження.** У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного моделювання та кепстрального аналізу, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

**Наукова новизна** полягає в обґрунтуванні застосування кепстральної технології обробки енергетичного спектру акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії для визначення фізико-механічних властивостей гірської породи в процесі буріння свердловин.

**Практичне значення** полягає у формуванні та аналізі комбінації інформативних характеристик процесу буріння свердловин для підвищення якості його моделювання та керування.

**Результати.** Проблема підвищення якості моделей та ефективності процесу буріння свердловин пов'язана з дослідженням методу оперативного визначення чи уточнення (бажано безпосередньо в процесі буріння) фізико-механічних властивостей гірських порід, що складають родовище, яке розробляється. Метою моделювання процесу буріння є встановлення залежності режимних параметрів бурової установки та характеристик гірської породи, які б дозволили сформувати оптимальну з точки зору витрат швидкість проходки. Важливим етапом вирішення цієї задачі є вибір і аналіз інформативних параметрів, що характеризують процес. Для моделювання енергоємної контактної взаємодії породоруйнівного органу з гірською породою при бурінні свердловин використано комплекс енергетичних характеристик процесу та акустичної емісії. Для кількісної оцінки характеристики акустичної емісії застосовується технологія кепстрального аналізу, яка базується на результатах побудови дискретних значень часового ряду вимірювань амплітуди коливань. Розрахунково-аналітична модель забезпечує визначення обмеженої кількості результуючих сплесків енергії, рознесених по осі кепстрального часу. Отриманий результат не залежить від форми акустичного сигналу, його фази та напрямів поширення у досліджуваному середовищі. Модель реалізована за допомогою адаптивної нейро-нечіткої структури ANFIS, що навчається. Наведений метод може бути використаний також для оцінки стану бурового обладнання.

**Ключові слова:** контактна взаємодія, буріння свердловин, енергетичні характеристики, акустична емісія, кепстр.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-78-86

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Оптимізація буріння в режимі реального часу полягає у виборі робочих параметрів, що максимізують продуктивність буріння. Зусилля оптимізації буріння часто спрямовані на підвищення швидкості буріння, зазвичай званої швидкістю проходки (ROP). Три робочі параметри буріння можуть постійно регулюватися на поверхні, щоб впливати на ROP: навантаження на долото (WOB), швидкість обертання бурильної колони (RPM) та параметр, що характеризує процес видалення продуктів руйнування [1]. У традиційному аналітичному підході до моделювання ROP негнучкі рівняння пов'язують навантаження на долото, кількість обертів за хвилину, та/або інші вимірювані параметри буріння з ROP, а коефіцієнти емпіричної моделі розраховуються для кожного шару гірської породи, щоб найкраще відповідати польовим даним [2, 3]. За останнє десятиліття вдосконалена технологія збору даних та поширена дешева обчислювальна потужність призвели до різкого збільшення застосування методів машинного навчання (ML) для прогнозування ROP. Алгоритми машинного навчання використовують статистику для виявлення взаємозв'язків між вказаними вхідними даними (ознаками/предикторами) і вихідною величиною (відгуком). Найбільшою перевагою алгоритмів ML порівняно з аналітичними моделями є їхня гнучкість у формі моделі. Без заданого рівняння моделі машинного навчання дозволяють сегментувати простір робочих параметрів буріння. Однак підвищена складність моделі знижує інтерпретованість того, як коригування вхідних даних вплине на результат. Не існує єдиної моделі ROP, яка застосовується у всіх ситуаціях [3].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Фундаментальною проблемою при веденні гірничих робіт є відрив від поверхні суцільного гірського масиву окремих його фрагментів [4]. Оскільки цей процес руйнує тверду породу на шматки різних розмірів, його можна розглядати як дроблення. Тому, як і у процесах дроблення загалом, цікавить співвідношення енергії та обсягу виконаної роботи. "Питома енергія", що визначається як енергія, необхідна для вилучення одиниці об'єму породи, є корисним параметром у цьому контексті і може також розглядатися як показник механічної ефективності процесу обробки породи. У роботі [4], посилаючись на низку джерел, визначається, що значення цього показника, «мабуть, дуже приблизно корелює з міцністю на роздавлювання забурюваного середовища при обертальному, ударно-обертовому і шарошечному бурінні».

Для визначення питомої енергоємності буріння достатньо реєструвати енергію, що споживається двигуном обертача. Облік цієї енергії у певні проміжки години та на заданій глибині характеризують загальну енергоємність буріння та дозволяє судити про властивості масиву гірських порід. Повна енергоємність буріння включає витрати енергії, пов'язані з руйнуванням породи під шарошечним долотом та з подоланням теплових та механічних втрат [5].

Уточнення інформації про міцнісні та структурні особливості гірських масивів, що підлягають вибуховому руйнуванню, можливе у процесі буріння вибухових свердловин. Уточнені при бурінні дані про стан порід дозволяють підвищити достовірність інформації та забезпечити точність розрахунків при проектуванні технологічних вибухів, і, отже, раціональніше управляти витратою матеріальних ресурсів [6].

На теперішній час існує багато загальних моделей швидкості проникнення в бурінні [7-11] та ін. Модель Maurer [7] була розроблена на основі теоретичного рівняння проникнення для шарошечного долота як функції  $WOB$ ,  $RPM$ , розміра долота та міцності гірської породи. Розроблене рівняння базується на таких спостереженнях, як величина углублення, яке може створити різець із врахуванням міцності породи.

Galle and Woods [8] досліджували ефект від обрання співвідношення  $WOB$  та  $RPM$ . Розроблено графіки для найкращого вибору комбінації параметрів буріння. У своїх роботах вони довели, що витрати на буріння зменшуються у разі використання їх методу.

Модель, запропонована Bourgoyne and Youngs [9], вважається однією з найбільш повних математичних моделей буріння, що застосовується в промисловості для шарошечних долот. Рівняння (1) визначає загальну лінійну швидкість проникнення, яка є функцією як керованих, так і некерованих змінних буріння

$$\frac{dF}{dt} = \exp(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j x_j) . \quad (1)$$

Константи, наведені в рівнянні (1)  $a_1 - a_8$ , визначаються за результатами множинної регресії на основі даних буріння. Вони представляють характеристики міцності пласта, ефекту ущільнення, перепадів тиску, ваги на долото, швидкості обертання, зносу зубів та гідравлічного показника [10].

Загальним недоліком існуючих моделей процесу буріння є те, що для їх застосування у виробничих умовах необхідно попередньо визначити фізико-механічні характеристики гірських порід та стан бурового обладнання (знос породоруйнівного органу та ін.) [10,11].

Таким чином, проблема підвищення якості моделей та ефективності процесу буріння свердловин пов'язана з дослідженням методу оперативного визначення (бажано безпосередньо в процесі буріння) чи уточнення фізико-механічних властивостей гірських порід, які складають родовище, яке розробляється.

**Постановка завдання:** моделювання процесів гірничого виробництва, як контактної взаємодії робочого органу з середовищем, на прикладі буріння свердловин із застосуванням енергетичних характеристик технологічних агрегатів та параметрів акустичної емісії.

**Викладення матеріалу і результати.** Метою моделювання процесу буріння є встановлення залежності режимних параметрів бурової установки та характеристик гірської породи, які б дозволили сформулювати оптимальну з погляду витрат швидкість проходки. Важливим етапом вирішення цього завдання є вибір та аналіз інформативних параметрів, що характеризують процес.

В силу того, що в процесі взаємодії породоруйнівного органу (ПРО) бурової установки з гірською породою (ГП) режимні параметри не можуть зберігати постійні значення навіть у разі збереження значень її властивостей міцності по глибині свердловини, процес буріння не є

стаціонарним і може розглядатися тільки як квазістаціонарний з присутністю елементів динаміки та перехідних процесів, обумовлених як конструктивними особливостями самої установки, так і змінами структурних та фізико-механічних властивостей порід, що визначають навантаження на ПРО [12].

При обертальному способі буріння має місце реалізація декількох механізмів взаємодії ПРО установки з ГП [13,14]:

- вдавлювання інструменту (залежить від величини межі міцності породи на стиск  $\sigma_c$ , МПа);
- зріз шару породи (залежить від показника міцності на зріз  $\tau_{cp}$ , МПа);
- тертя інструменту об стінки свердловини (визначається величиною глибини буріння  $Z$ , м);
- видалення бурової дрібниці із вибою (нелінійно залежить від глибини свердловини  $L$ , м) та ін.

Аналіз результатів випробувань зразків гірської маси із кар'єрів Північного ГЗК показує тісний зв'язок між питомою роботою руйнування  $a$  та коефіцієнтом міцності руди  $f$  [15]:

$$a = 0,87 f - 0,0035. \quad (2)$$

Природним підходом для оцінки міцності гірської породи, як однієї з характеристичних її властивостей, за допомогою визначення енергії руйнування, є використання для цих цілей енерговитрат на технологічну операцію, яка для цього використовується. У наведеному вище прикладі для цього використовувалася операція товчення, що виконується в лабораторних умовах [15].

У роботі [16] пропонується математична модель буріння, що базується на законі збереження енергії. Використовуючи основні закономірності механічної взаємодії зубків шарошечного долота з тріщинуватою гірською породою, отримана залежність швидкості буріння за формулою

$$v_6 = \frac{\pi^2 P_{oc} n N_3 d_3^2}{2 \left[ \frac{\sigma_p^2}{8E} \left( \frac{1-\nu}{\nu} \right)^2 \Phi d_e \pi d_d^2 - M \right]}, \quad (3)$$

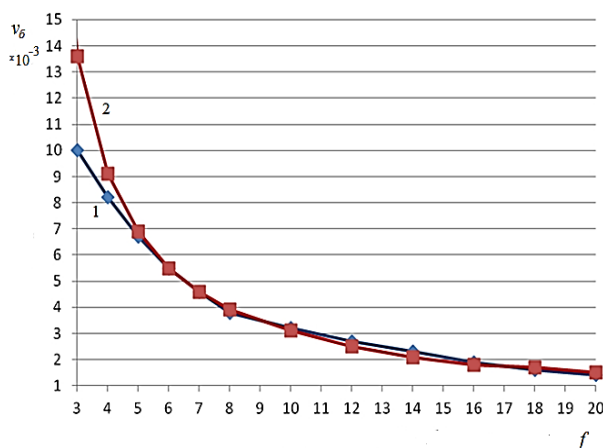
де  $P_{oc}$  – осьове зусилля;  $n$  – частота обертання бурового ставу;  $d_d$  – діаметр долота;  $N_3$  – число зубків шарошечного долота, що одночасно контактують із гірською породою;  $d_3$  – діаметр зубка;  $\sigma_p$  – межа міцності гірської породи на розрив;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  – модуль пружності породи;  $\Phi$  – показник тріщинуватості гірського масиву;  $d_e$  – розмір природної окремості.

Фізико-механічні властивості гірських порід мають високу варіацію і їх досить складно визначити у виробничих умовах. Тому у роботі [17] встановлено зв'язок фізико-механічних властивостей з коефіцієнтом міцності за шкалою М.М. Протод'яконова. Чисельний аналіз зміненої з урахуванням коефіцієнта міцності формули (3) та порівняння з практичними даними швидкості шарошечного буріння дозволили подати її у вигляді

$$v_6 = \frac{5 P_{oc} n d_3^2}{1000 f \Phi d_e d_d^2 - M}. \quad (4)$$

На відміну від низки досліджень [18-20] у формулі (4) враховується параметр тріщинуватості гірського масиву  $\Phi$ . Цей параметр визначається розміром окремості, величиною розкриття тріщин та кількістю систем тріщин [21].

На рис. 1 наведено розрахункові, відповідно до формули (4), та нормативні залежності швидкості буріння  $v_6$  від коефіцієнта міцності  $f$  [16].



**Рис. 1.** Залежність швидкості буріння  $v_6 \times 10^{-3}$ , м/с від коефіцієнта міцності  $f$ : 1 – нормативна, 2 – розрахункова

Вважається, що стан гірських порід у природному заляганні найбільш точно характеризується енергоємністю процесу буріння, яка визначається потужністю обертача і швидкістю проходки свердловини [22].

В роботі [5] розрахунок середньої енергоємності по блоку, по свердловині або штанзі в процесі буріння виконується відповідно до виразу

$$e_{cp} = \frac{E}{L_t}, \quad (5)$$

де  $e_{\text{ср}}$  - середня енергоємність блоку, кВт-год/м;  $E$  – витрати енергії на обурення блоку за лічильником, кВт-год;  $L_i$  - сумарна глибина збурених свердловин на блоці, глибина свердловини або довжина бурової штанги, м.

Відповідно до наведеного виразу існуюча шкала ЦБПНТ трансформована зі швидкості буріння на питому енергоємність буріння (табл. 1) [5].

Таблиця 1

Шкала буримості гірських порід за показниками механічної швидкості та питомої енергоємності шарошечного буріння

| Категорії міцності порід | Основний час буріння, год/м | Питома енергоємність буріння, кВт-год/м |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| VI                       | 0,020 - 0,023               | 0,5 - 0,7                               |
| VII                      | 0,024 - 0,030               | 0,7 - 0,9                               |
| VIII                     | 0,031 - 0,036               | 0,9 - 1,1                               |
| IX                       | 0,037 - 0,043               | 1,1 - 1,3                               |
| X                        | 0,044 - 0,049               | 1,3 - 1,5                               |
| XI                       | 0,050 - 0,056               | 1,5 - 1,8                               |
| XII                      | 0,057 - 0,066               | 1,8 - 2,1                               |
| XIII                     | 0,067 - 0,083               | 2,1 - 2,5                               |
| XIV                      | 0,084 - 0,097               | 2,5 - 2,9                               |
| XV                       | 0,098 - 0,118               | 2,9 - 3,5                               |
| XVI                      | 0,119 - 0,138               | 3,5 - 4,2                               |
| XVII                     | 0,139 - 0,166               | 4,2 - 5,0                               |
| XVIII                    | 0,167 - 0,193               | 5,0 - 5,9                               |
| XIX                      | 0,194 - 0,225               | 5,9 - 6,9                               |
| XX                       | 0,226 - 0,270               | 6,9 - 8,1                               |

Наведені вище залежності свідчать про те, що виражені в тому чи іншому вигляді енерговитрати є універсальною характеристикою енергоємної контактної взаємодії, однак лише одного цього параметра недостатньо для ідентифікації такої складної гетерогенної структури, як гірська порода [23].

У роботі [16] стверджується, що згідно із законом збереження енергії кінетична енергія ( $E_k$ ) зубців, що впроваджуються, шарошки з урахуванням осьового зусилля і крутного моменту ( $M$ ) витрачається на пружно-пластичні деформації та руйнування гірського масиву ( $E_{\text{уп}}$ )

$$E_k + M = E_{\text{уп}}. \quad (6)$$

Однак цей процес супроводжується й іншими енерговитратними проявами: тертя, акустична та електромагнітна емісія, вібрація та ін. І ці супутні процеси можуть бути ефективно використані для визначення характеристичних властивостей гірської породи.

Важливим елементом енергоємної контактної взаємодії є акустична емісія. Це хвилі тиску, що утворюються в матеріалі енергією, що виділяється в результаті деформації або різних типів руйнування [24]. У міру того, як ці хвилі тиску поширюються через матеріал, вони можуть бути зафіксовані датчиками і проаналізовані, щоб отримати уявлення про властивості матеріалу [25]. Широко використовуються з цією метою ультразвукові датчики різних типів.

Акустичні хвилі можуть виникати та поширюватися в одному, двох або трьох вимірах. Важливими характеристиками цих хвиль є амплітуда, довжина хвилі, частота, фаза, хвильова енергія, інтенсивність звуку та звуковий тиск. При ретельному вимірі та аналізі кожна з цих характеристик може надати цінну інформацію про джерело хвиль та середовище поширення. З спектра акустичного сигналу можна виділити широкий діапазон параметрів. Акустичні сигнали можна аналізувати у двох областях: у часі та за частотою. Важливі параметри, які можна отримати в часовій області, включають пік, середній спектр та середньоквадратичне значення спектра. Найбільш важливим параметром, який можна отримати в частотній ділянці, є базова частота [26].

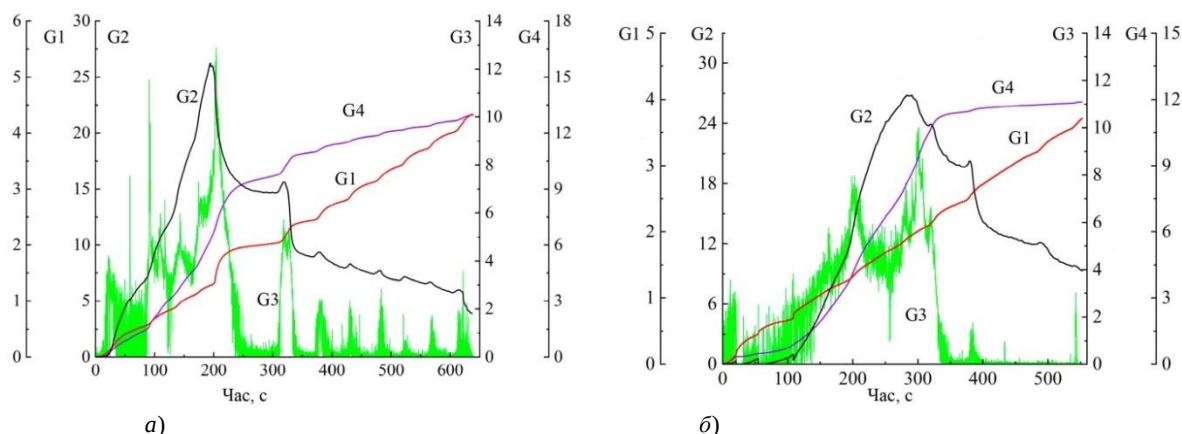
Одним із можливих способів визначення типу (класу) фактично пробуреної породи є аналіз акустичної емісії, створюваної в процесі буріння свердловин. Намір полягає в тому, щоб ідентифікувати конкретну акустичну сигнатуру кожного типу вибуреної породи або принаймні класу породи.

Під час обертального буріння шум утворюється від декількох джерел. Основними є двигун бурової установки, та результат контактної взаємодії бура з породою. Попередні аналізи [27] показали, що релевантний сигнал, який передає акустичну сигнатуру породи, можна визначити у частотному діапазоні 5000 - 8000 Гц. Нижня половина спектру сигналу представляє в основному шум бурового двигуна та інших джерел.

У роботі [28] наводяться характеристики відгуку електромагнітного випромінювання (EMR) та акустичної емісії (АЕ) у процесі руйнування під механічним навантаженням камнеподібного матеріалу з використанням системи реєстрації АЕ-EMR, що складається із системи навантаження, системи збору даних та системи екранування. Резонансна частота датчика акустичної емісії, що використовувався в експерименті, становила 42,3 кГц.

Щоб унеможливити вплив дисперсії однорідності зразка, для імітації зразків гірських порід використовувалися спеціальні зразки бетону (камнеподібні матеріали), а також вивчалися характеристики АЕ при стисканні зразків різного розміру. Кількісна оцінка акустичної емісії проводилася підрахунком імпульсів виміряного сигналу акустичної емісії, рівень яких перевищує тестове граничне значення.

На рис. 2 наведені результати вимірювань акустичної емісії двох зразків при одновісному навантаженні, які свідчать про те, що цей параметр є акустичним образом конкретного досліджуваного зразка, який відрізняється яскраво вираженими індивідуальними особливостями [28].



**Рис. 2.** Результати випробувань досліджуваних зразків: G1 – деформація ( $\times 10^{-2}$ ); G2 – напруження (МПа); G3 – акустична емісія ( $\times 10^3$ ); G4 – кумулятивна величина акустичної емісії ( $\times 10^6$ )

З рис.3 видно, що при одновісному стисненні зразка акустична емісія має різні характеристики на різних стадіях деформації [28]:

на початковому етапі навантаження зразка присутній певний сигнал акустичної емісії, який пов'язаний з тим, що в міру поступового збільшення навантаження крихітні отвори у зразку поступово ущільнюються, що призводить до певної міри мікротріщинуватості;

у період середнього навантаження мікротріщини динамічні, активність акустичної емісії зростає і швидко досягає рахункового піку. З часом активність акустичної емісії поступово слабшає, що пов'язано з досягненням певного рівня щільності мікротріщин у матеріалі. У цей час накопиченої всередині матеріалу енергії недостатньо для того, щоб мікротріщини проникли крізь матеріал і утворили макротріщини;

після періоду стабільного розвитку, через те, що енергія, накопичена всередині матеріалу, досягає межі, яку він може сприйняти, мікротріщини швидко проникають крізь матеріал і утворюють макротріщини, а величина акустичної емісії швидко збільшується до максимального рівня;

після основного руйнування зразка активність акустичної емісії після короткочасного підвищення поступово знижується, що пов'язано з сильним тертям всередині матеріалу.

Таким чином, АЕ формується зародженням та розповсюдженням мікротріщин, а також тертям їх поверхонь у процесі деформування та руйнування зразків. Поширення тріщини залежить від того, чи досягає інтенсивність напруження граничної в'язкості руйнації відповідного матеріалу.

З викладеного випливає, що акустична емісія, що виникає в процесі енергоємної контактної взаємодії породоруйнівного органу та гірської породи при бурінні свердловин, несе інформацію, яка може бути використана для розпізнавання геологічної структури родовища та формування оптимальних режимних параметрів бурової установки [29,30].

Нехай обертально-поступальний рух ПРО спрямований нормально до вільної поверхні напівпростору (гірської породи)  $Z > 0$  і вздовж своєї осі симетрії. Передбачається, що порода має ізо- або ортотропну будову, а зміна її фізико-механічних властивостей по висоті (координаті  $Z$ ) можна описати шматково-безперервною функцією з кінцевим числом точок розриву 1-го роду з відповідними координатами  $z_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ ; де  $N$  - число шарів породи. Між точками розриву передбачається монотонна зміна властивостей породи, що описуються її параметрами міцності  $\sigma, \tau, f$  (межа міцності на стиск, показник міцності на зріз і коефіцієнт міцності породи за шкалою М.М. Протод'яконова [13]). Результуюча сила  $F(z(t))$  процесу взаємодії ПРО з ГП визначається в інтегральному вигляді зусиллям подачі та має вигляд інтегрального рівняння [13,23]

$$C_F \int_0^{z_0-z(t)} K_F(\zeta(t)) \sigma(z_0 - \zeta(t)) d\zeta = \varphi_F(z(t)); \quad z \geq z_0 - h(t), \quad (7)$$

де

$$C_F = \frac{1}{(h \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)}; \quad K_F = \beta_0 + \beta h(t(\zeta));$$

$$\varphi_F(z) = \tilde{F}(t(z)) - C_F f_0 (\beta_0 + \beta h_0) [h_* - z_0 + z] / 2; \quad h_* \leq h(t).$$

Результуюча моменту обертання  $M(z(t))$  процесу взаємодії, що розвивається на ПРО також має вигляд інтегрального рівняння

$$C_M \int_0^{z_0-z(t)} K_M(\zeta(t)) \tau_{cp}(z_0 - \zeta(t)) d\zeta = \varphi_M(z(t)); \quad z \geq z_0 - h(t), \quad (8)$$

де

$$C_M = \frac{1}{(h \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)}; \quad K_M = \alpha h(t(\zeta));$$

$$\varphi_M(z) = \tilde{F}(t(z)) - C_M f_0 \alpha h_0 [h_* - z_0 + z] / 2; \quad h_* \leq h(t),$$

а величини параметрів  $\alpha, \beta_0, \beta$  - обчислюються у процесі розв'язання задачі.

Інтегральні рівняння (7), (8) описують процес взаємодії ПРО з середовищем, що характеризується властивостями міцності, геометрія якого, в загальному випадку не має обмежень за винятком обмежень, диктованих практичними міркуваннями. Математична модель процесу включає як опис статичного, так і динамічного режимів взаємодії, а з погляду класу формалізації є системою інтегральних рівнянь Вольтерра 1-го роду [13]. Наведена модель енергоємного процесу взаємодії є по суті багатовимірною моделлю, оскільки фізичний процес взаємодії сам собою реалізується у просторі (хоча у спрощених випадках його доцільно моделювати як одномірний). Наведений конкретний процес моделюється як процес, що має дві незалежні просторові координати та одну змінну за часом. Математична модель допускає моделювання багатовимірного, ID  $\geq 3$ , динамічного процесу, у якого в ролі змінних можуть розглядатися узагальнені координати.

Наведені залежності (7), (8) дозволяють моделювати перехідні процеси режимів взаємодії ПРО з ГП, що виникають при переході породоруйнівного інструменту з одного шару породи до іншого з відмінними від попереднього властивостями міцності. Ці процеси обумовлені як характеристиками ПРО, так і властивостями ГП.

Обчислені за допомогою виразів (7), (8) значення  $F(z(t))$  та  $M(z(t))$ , а також значення швидкості обертання ПРО, питомої енергоємності та характеристики акустичної емісії використані для моделювання швидкості проходження свердловини ROP. З цією метою використано обчислювальний алгоритм на основі адаптивної нейро-нечіткої структури ANFIS, реалізованої у середовищі MATLAB 2017 [31]. Для характеристичної оцінки акустичної емісії процесу буріння застосовувалась технологія кепстрального аналізу [32].

Кепстр (Cepstrum) – це зворотне перетворення Фур'є від натурального логарифму квадрата спектральної щільності випадкового процесу, вираженого функцією  $C(q)$  на осі кепстрального часу  $q$  [33]. Для аналізу процесу буріння сформовано бібліотеку кепстральних образів, що відповідають різним гірським породам.

Аналіз експериментально отриманих кепстральних образів дозволяє побудувати процедуру ідентифікації та розпізнавання основних мінералого-технологічних типів гірських порід родовища, що розробляється, в ході буріння свердловин.

Реальні енергоємні процеси контактної взаємодії вираженої періодичністю і стаціонарністю можуть не мати. Як показано в роботах [33,34]  $X(t)$  - вихідний коливальний процес допускає полігармонічну апроксимацію за допомогою адитивних комбінацій наборів синусоїдальних функцій

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) + \dots X_n(t) + \dots, \quad (9)$$

де  $X_n(t) = A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n)$  - акустична емісія, представлена у вигляді гармонійних складових з амплітудами  $A_n$ , частотами  $f_{n-i}$  і фазами  $\varphi_{n-i}$ .

Параметр  $q$  (сачтота) має розмірність часу, його застосування в кепстральному аналізі забезпечує рознесення результируючих енергетичних сплесків акустичної емісії по осі кепстрального часу. Як правило, енергетичні сплески в реальних акустичних процесах розміщуються вздовж осі сачтот  $q$  з віддаленням від нульової позначки, у той час як сплески перешкодових процесів розташовуються в безпосередній близькості до нуля.

Для формування та практичного використання бібліотек кепстральних образів використано наступне вираження [34]

$$C(q) = (2\pi)^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} \{\ln|X(jnw_1)|^2\} \exp(jnw_1 q) \Delta w \approx T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln[T_H^2[A_n^2(nw_1)]/4]\} \exp(j2\pi nq/T_H), \quad (10)$$

де  $A_n(nw_1)$  – компоненти амплітудно-частотного лінійчастого спектру.

Значення кепструму визначається як невід'ємна функція кепстрального часу у вигляді квадрата модуля  $C(q)$  [33,34]

$$|C(q)|^2 = A^2(q) + B^2(q); \quad (11)$$

$$A^2(q) = T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln[T_H^2[A_n^2(nw_1)]/4]\} \cos(2\pi nq/T_H); \quad (12)$$

$$B^2(q) = T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln[T_H^2[A_n^2(nw_1)]/4]\} \sin(2\pi nq/T_H). \quad (13)$$

При заданій роздільній здатності  $R$ , яка має розмірність Гц/ліній, верхній  $f_B$  і нижній  $f_H$  граничних частотах спектра сигналу кількість ліній  $LF$  спектра (вкладених смуг частоти) визначається співвідношенням [34]

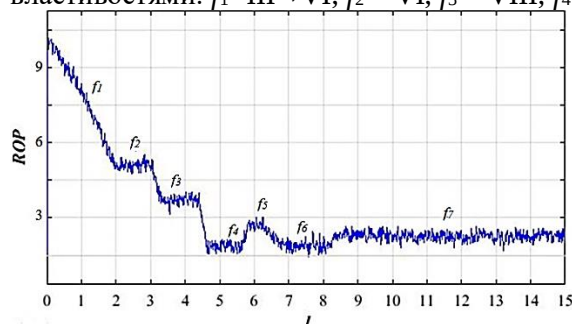
$$LF = Ant[(f_B - f_H)R^{-1} + 1], \quad (14)$$

де  $Ant$  – функція Антьє.

Для сигналу з рівномірним суцільним спектром сукупність значень кепстру в околиці точки кепстрального часу  $q = 0$  формою близька до дельта-функції. Якщо у розкладанні сигналу є значні неоднорідності у деяких частот  $f_k$ , то поблизу значень  $q_k = 1/f_k$  спостерігатимуться сплески кепстра [34].

При моделюванні процесу буріння свердловин для кепстрального аналізу акустичної емісії крок дискретизації був обраний рівним  $10^{-4}$ , значення частотних параметрів:  $f_H = 4500$  Гц;  $f_B = 9500$  Гц.

На рис. 3 наведено результати моделювання процесу буріння свердловини в гірському масиві, представленому декількома шарами, що характеризуються різними фізико-механічними властивостями:  $f_1$ - III→VI;  $f_2$  – VI;  $f_3$  – VIII;  $f_4$  – XVIII;  $f_5$  – XII;  $f_6$  – XVII;  $f_7$  – XVI.



**Рис. 3.** Залежність швидкості проходки  $ROP$ (м/с  $\times 10^3$ ) від глибини свердловини  $l$ (м); пронумеровані ділянки відповідають міцності гірської породи:  $f_1$ - III→VI;  $f_2$  – VI;  $f_3$  – VIII;  $f_4$  – XVIII;  $f_5$  – XII;  $f_6$  – XVII;  $f_7$  – XVI

Отримані результати свідчать про перспективність дослідженого підходу для моделювання та управління бурінням свердловин, який дозволяє отримувати інформацію про фізико-механічні

характеристики гірської породи безпосередньо в процесі буріння і використовувати її для коригування режимних параметрів бурової установки.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Для моделювання енергоємної контактної взаємодії породоруйнівного органу з гірською породою при бурінні свердловин використано комплекс енергетичних характеристик процесу та акустичної емісії. Для кількісної оцінки характеристики акустичної емісії застосовується технологія кепстрального аналізу, яка базується на результатах побудови дискретних вимірів часового ряду амплітуди коливань. Кепстр розглядається як зворотне перетворення Фур'є від натурального логарифму квадрата спектральної щільності випадкового процесу. Розрахунково-аналітична модель забезпечує визначення обмеженої кількості результуючих сплесків енергії, рознесених по осі кепстрального часу. Модель реалізована за допомогою адаптивної нейро-нечіткої структури ANFIS, що навчається, в програмному пакеті MATLAB 2017. Використаний метод може бути застосований також для оцінки стану бурового обладнання.

Напрямок подальших досліджень є апробація запропонованої моделі на зразках гірської породи із залізрудних родовищ, оцінка ефективності різних комбінацій вимірюваних параметрів та обчислювальних алгоритмів на основі нейромереж глибокого навчання, розробка алгоритму оптимізації процесу буріння.

### *Список літератури*

1. **M. Anemangely, A. Ramezanzadeh, B. Tokhmechi.** Determination of constant coefficients of Bourgoyne and Young drilling rate model using a novel evolutionary algorithm. - SPE Comput. Appl., 8 (4) (2017), pp. 693-702.
2. **H.R. Ansari, M.J. Hosseini, M. Amirpour.** Drilling rate of penetration prediction through committee support vector regression based on imperialist competitive algorithm. - Carbonates Evaporites, 32 (2016), pp. 205-213.
3. **Cesar Soares, Kenneth Gray.** Real-time predictive capabilities of analytical and machine learning rate of penetration (ROP) models. - Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 172, ( 2019), pp. 934-959. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.083>.
4. **Robert Teale.** The concept of specific energy in rock drilling. - International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 2 (1) (1965), pp. 57-73
5. **Угольніков В.К., Сімаков Д.Б., Угольніков Н.В.** Визначення енергоємності руйнування гірських порід при шарошечному бурінні. - Гірничий інформаційно-аналітичний бюлетень (науково-технічний журнал), 10, 2004, С. 78-81. <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-energoemnosti-razrusheniya-gornyh-porod-pri-sharoshechnom-bureni>.
6. **Сухов Р.І., Рєгутунов А.С.** Результати досліджень властивостей міцності локальних масивів у процесі буріння із застосуванням програмно-апаратного комплексу - Проблеми надрокористування, №4, 2016 р. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.12.
7. **Maurer W.C.** The 'Perfect-Cleaning' Theory of Rotary Drilling. - Journal of Pet. Tech, 1962.
8. **Galle E.M and Woods A.B.** Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits. - Drill. And Prod. Prac., API 1963, pp 48-73.
9. **Bourgoyne A.T. Jr., Young F.S.** - A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection", SPE 4238,1974.
10. **Eren T., Ozbayoglu E.** Real Time Optimization of Drilling Parameters During Drilling Operations. SPE Paper 129126, SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, Mumbai, India, 2010.
11. **Garnier A.J. and van Lingen N.H.** Phenomena Affecting Drilling Rates at Depth - SPE 1097-G, Annual Fall Meeting of SPE, Houston, TX, May 1959.
12. **Моркун В.С., Цокуренко О.О., Барський С.М.** Адаптивне управління процесами енергоємної контактної взаємодії // Удосконалення процесів гірничого виробництва при видобутку залізних і марганцевих руд / Сб. наук. пр. ДНДГРІ. – 2004. – С. 190-200.
13. **Цокуренко О.О.** Інформаційно-обчислювальний комплекс та обернені завдання. - Київ: Наукова думка, 1998. - 281 с.
14. **Моркун В.С., Цокуренко О.О.** Основні принципи адаптації управління буровим роботом-інформатором у зовнішніх екстремальних умовах // Розроб. руд. родовищ. – Кривий Ріг: КТУ. - Вип. 82. – 2003. – С. 109-121.
15. **Аналіз впливу вибухових робіт з використанням емоніту на якість підготовки залізняку для переробки на рудозбагачувальній фабриці. //Звіт з НДР. Криворізький технічний університет / Наук. кер. В.В. Перегудов/ Кривий Ріг, 2007,119 с.**
16. **Тюпін В.М., Ігнатенко І.М., Крючков І.С., Ушаков Д.К.** Встановлення швидкості шарошечного буріння вибухових свердловин і показника буримості тріщинуватих масивів гірських порід. <https://2cad.ru/blog/science/ustanovlenie-skorosti-sharoshechnogo-bureniya>.
17. **Кутузов Б.М., Тюпін В.М.** Спрощений розрахунок параметрів масового вибуху на кар'єрах // Вісті ВНЗ. Гірничий журнал. - 1985, №7. С.66-67.
18. **Кутузов Б.М.** Вибухова та механічна руйнація гірських порід. - Надра, 1973. 311с.
19. **Мосінець В.М., Пашков А.Д., Латишев В.А.** Руйнування гірських порід. - Надра, 1975. 216 с.
20. **Тангасв І.А.** Енергоємність процесів видобутку та переробки корисних копалин. - Надра, 1986. 231с.
21. **Тюпін В.М.** Вибухові та геомеханічні процеси в тріщинуватих напружених гірських масивах. - БДУ, 2017. 192 с.

22. Zharikov S. N. Drilling and blasting resource-saving technology development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 1: 21–32.
23. Моркун В.С., Цокуренко О.О., Луценко І.А. Адаптивні системи оптимального керування технологічними процесами. - Кривий Ріг: Мінерал, 2005. - 261 с.
24. Khoshouei, M., and Bagherpour, R. (2019): Application of Acoustic Emission (AE) in mining and earth sciences: a review. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining Geological-Petroleum Engineering Bulletin)*, 34,4, 19-32.
25. Hopwood, T., and McGogney, C. (1987): Acoustic emission applications in civil engineering, *Nondestructive testing handbook*, College of Engineering University of Kentucky Lexington, Kentucky, 325-345.
26. Mehrbod Khoshouei, Raheb Bagherpour, Mohammad Hossein Jalalian, Mojtaba Yari. Investigating the acoustic signs of different rock types based on the values of acoustic signal RMS. - *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*, 2020, pp. 29-38. DOI: 10.17794/rgn.2020.3.3
27. Zborovjan M.: Identification of minerals during drilling process via acoustic signal. *Metallurgy and foundry* 4/2001, Vol. 26. Krakow, Poland, 2001.
28. Li, Z.; Lei, Y.; Wang, E.; Frid, V.; Li, D.; Liu, X.; Ren, X. Characteristics of Electromagnetic Radiation and the Acoustic Emission Response of Multi-Scale Rock-like Material Failure and Their Application. *Foundations* 2022, 2, 763-780. <https://doi.org/10.3390/foundations2030052>.
29. Bastari, A., Cristalli, C., Morlacchi, R., and Pomponi, E. (2011): Acoustic emissions for particle sizing of powder through signal processing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25,3, 901-916.
30. Yamaguchi, T. J., Soma, M., Ishida, M., Watanabe, T. Ohmi, T. (2000). Extraction of peak-to-peak and RMS sinusoidal jitter using an analytic signal method: 18th IEEE VLSI Test Symposium, 395-402.
31. Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Паранюк Д. І. Методи оптимізації процесу буріння свердловин, – Кривий Ріг: Гірничий вісник. 2020. Вип. 107. С. 96-101.
32. A. M. Noll. Cepstrum pitch determination. *Journal of the Acoustical society of America* , 41:293-309, 1967.
33. A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer. *Digital signal processing*. Prentice-Hall, 1975.
34. Гулай, А. В., Зайцев, В. М. Інтелектуальна технологія кепстрального аналізу коливальних процесів. – БНТУ, 2020, 80-88 с.

УДК 331.56; 656.13

В.А. ЦОПА, д-р техн. наук, проф., Міжнародний інститут менеджменту, Київ  
С.І. ЧЕБЕРЯЧКО, д-р техн. наук, проф., О.В. ДЕРЮГІН, канд. техн. наук, доц.,  
НТУ «Дніпровська політехніка»

О.В. ПИЩИКОВА, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

## ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ РИЗИКУ ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНОЇ ПРИГОДИ ПРИ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

**Мета.** Розробка методу для оцінки ризиків дорожньо-транспортної пригоди при виконанні автомобільних перевезень.

**Методи дослідження.** Використано методом "Краватка-Метелик", який дозволяє врахувати на появу небезпечної події всі зовнішні та внутрішні небезпечні (безпечні) чинники, які можуть як збільшити, так і зменшити вірогідність небезпечної події. Для ранжування небезпечних чинників застосовано метод "Decision Making Trial and Evaluation" (далі - Dematel), який базується на парних інструментах порівняння та прийняття рішень на основі теорії графів.

**Наукова новизна.** Запропоновано механізм для визначення найвпливовіших небезпечних чинників, який встановлюється за умови, що рівень впливу небезпечного чинника, який отримується виходячи з розрахунку матриці кінцевого впливу методом Dematel є більшим за 20 % встановленого максимального значення.

**Практична значимість.** Запропоновано восьми кроковий алгоритм з розрахунку ризику настання дорожньо-транспортної пригоди.

**Результати.** Розроблений реєстр небезпечних чинників, які включають шість типів факторів: людський, організаційний, технічний, операційний, соціальний, ергономічний та збільшують вірогідність настання небезпечної події дорожньо-транспортної пригоди. Запропоновано алгоритм для оцінки професійних ризиків водіїв автомобіля, який складається з восьми основних кроків, перші три присвячені процедурі ідентифікації небезпек, небезпечних чинників та ранжуванню останніх для виявлення чинників, які є причинами настання небезпечної події й тих, які будуть наслідками перших. Проведено оцінку професійних ризиків водія автомобіля, в якій виявлено, що основними небезпечними чинниками, які впливають на настання дорожньої пригоди є брак навичок розуміння системи та навичок прийняття рішення, недбалість дотримання перевірок безпеки на різних етапах роботи маніпулятора, відсутність ефективного контролю за безпекою праці та відсутність належного передрейсового медичного контролю стану здоров'я водія, усунення яких значно зменшить рівень ризику під час перевезення.

**Ключові слова:** водій, безпека, професійний ризик, метод DEMATEL  
doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-86-95