

УДК 550.832.9

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., А. А. ГАПОНЕНКО,
І. А. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники, Криворізький національний університет
Д. І. ПАРАНЮК, інж., ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В ГІРСЬКІЙ ПОРОДІ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ АКУСТИЧНОГО КАРОТАЖУ БУРОВИХ СВЕРДЛОВИН

Метою дослідження є підвищення точності ультразвукового каротажу для визначення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи на основі значень: швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнту загасання ультразвуку на основній частоті та вищих гармоніках, а також співвідношення цих параметрів.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи: аналіз вітчизняного і закордонного досвіду; методи математичної статистики і теорії імовірності для оброблення результатів експериментів; методи аналітичного конструювання і комп'ютерного моделювання; методи чисельного моделювання для синтезу і аналізу математичної моделі.

Наукова новизна полягає у розробленні методу визначення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи на основі значень швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнту загасання ультразвуку на основній частоті та першій гармоніці, а також співвідношення цих параметрів.

Практичне значення полягає у розробленні ультразвукового вимірювального каналу, що складається з генератора та приймача ультразвукового сигналу, підсилювачів у вхідному та вихідному каналах, осцилографа та комп'ютера. Для збудження і прийому ультразвукових коливань у стінці пробуреної свердловини пропонується використовувати електромагнітний акустичний перетворювач. Сигнал, що генерується за допомогою цифрового осцилографа, посилюється з використанням підсилювача перед подачею до генератора. Приймач також підключений до цифрового осцилографа через спеціально розроблений підсилювач.

Результати. Для визначення фізико-механічних та хіміко-мінералогічних характеристик гірських порід як оціночні параметри було використано такі параметри: швидкість поширення поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль на частоті 2,5 МГц, коефіцієнт загасання ультразвуку на частоті 100 кГц та 2,5 МГц на основній частоті та першій гармоніці, а також співвідношення цих параметрів. Запропонований спосіб ідентифікації основних різновидів гірських порід характеризується точністю 87 %. Для досягнення більш високої якості ідентифікації геолого-мінералогічної структури досліджуваного середовища доцільно застосувати додатково магнітометричні та ядерно-фізичні вимірювання.

Ключові слова: ультразвукові хвилі, акустичний каротаж, мінералого-технологічні різновиди руди, електромагнітний акустичний канал.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-99-106

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Визначення геолого-мінералогічної структури рудних родовищ є однією із головних задач початкового етапу видобутку та переробки сировини для металургійного виробництва. Одним із найбільш поширених методів вирішення цієї задачі є буріння розвідувальних свердловин із подальшим дослідженням хіміко-мінералогічних та фізико-механічних характеристик гірської породи через яку вони проходять. Ця інформація може бути отримана шляхом дослідження безпосередньо кернів, які достають із свердловини або методом каротажу, тобто за допомогою геофізичних вимірювань: ядернофізичних, магнітометричних, акустичних тощо. Зазначені вимірювання виконуються із використанням спеціальних зондів, які опускаються у свердловину і мають контакт із її стінками. Кожний із згаданих методів вимірювань надає можливість визначити як правило неоднозначну залежність відповідних параметрів від характеристик гірської породи.

Аналіз досліджень та публікацій. Промислові контури корисних копалин, представлених мінералого-технологічними різновидами, визначають за допомогою буріння розвідувальних свердловин з подальшим дослідженням шламу або керна, випробуванням шламу вибухових свердловин, бороздовим випробуванням або випробуванням за допомогою різних геофізичних засобів [1–4].

Використання механічної швидкості буріння як динамічного показника, що характеризує властивості породи, запропоновано у [5]. Проте в умовах складної геологічної структури залізрудних родовищ потрібен аналіз більшої кількості показників, що підтверджується результатами, одержаними у [6–7]. Зокрема, у [6] запропоновано визначити тип породи в процесі бурін-

ня за двома показниками: механічна швидкість буріння і крутний момент. Водночас досягнення необхідної точності розпізнавання різновидів породи можливо лише в умовах бінарної геологічної структури.

Для моніторингу процесу буріння у роботі [8] використані такі параметри: горизонтальні і вертикальні вібрації, осьовий тиск, крутний момент, швидкість буріння, швидкість обертання тощо. Водночас, у переліку контрольованих параметрів наявні лише параметри бурової установки і не здійснюється пряме або непряме вимірювання характеристик породи, що буриться. Аналогічний підхід використано у роботі [9] для розпізнавання геологічної структури з наявністю трьох різновидів породи. Проте, розпізнавання різновидів породи головним чином здійснювалося за одним показником і за параметрами бурильної установки без вимірювання характеристик власне породи.

До недоліків розглянутих способів випробування варто віднести такі: зниження вірогідності інформації через поділ операцій відбору і аналізу проб, велика трудомісткість і відсутність оперативності. Найбільш ефективним вирішенням проблеми є каротаж - повний запис інформації, зібраної під час буріння свердловини за допомогою геофізичних досліджень. Така інформація дозволяє побудувати повну картину геологічного розрізу, пройденого даної свердловиною. Отже, для ідентифікації геолого-мінералогічної структури гірського масиву потрібен комплекс вимірювань із подальшою математичною обробкою отриманих результатів.

Як показано у роботах [10,11] перспективним методом геофізичних досліджень бурових свердловин є акустичний (ультразвуковий) каротаж. Він дозволяє за допомогою вимірювань параметрів процесу розповсюдження ультразвукових хвиль в гірській породі з достатньо високою точністю визначати її фізико-механічні і хіміко-мінералогічні характеристики. Для формування ультразвукового вимірювального каналу пропонується використовувати електромагнітні акустичні перетворювачі, що дозволяє формувати та приймати ультразвукові хвилі без безпосереднього контакту з досліджуваною структурою.

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення точності ультразвукового каротажу для визначення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи на основі значень: швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнту загасання ультразвуку на основній частоті та вищих гармоніках, а також співвідношення цих параметрів.

Викладення матеріалу та результати. *Залежність швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль від характеристик гірської породи.* У гірських породах швидкості поширення пружних хвиль змінюються в широкому діапазоні і залежать від фізичних властивостей, структури, текстури, стану та інших внутрішніх і зовнішніх факторів. У роботах [10–14] показано, що швидкість поширення поздовжніх пружних хвиль C_p в скельних породах змінюється в основному у інтервалі 1500-7000 м/с, поперечних хвиль C_s – 800-5000 м/с. Співвідношення швидкостей поширення поздовжніх і поперечних пружних хвиль у магматичних і метаморфічних порід зазвичай $C_p/C_s=1,7-1,9$. У разі повного водонасичення порід відношення C_p/C_s збільшується. У осадових порід C_p/C_s варіюється у інтервалі від 1,5 до 2,0 і більше. Зі збільшенням глибини залягання осадових порід діапазон варіювання співвідношення C_p/C_s різко звужується. У табл. 1 наведені найбільш ймовірні значення швидкостей поширення пружних хвиль в різних гірських породах [10].

Швидкості поширення пружних хвиль в породах помітно змінюються в залежності від мінерального складу, густини, пористості, зернистості і інших параметрів. Їх значення збільшуються від кислих різниць інтрузивних порід до основних і ультраосновних. У вивержених порід помітно зменшення значень швидкостей поширення пружних хвиль із збільшенням вмісту SiO_2 . У породах основного складу швидкості поздовжніх хвиль в інтрузивних різницях в середньому на 20% вище, ніж в ефузивних. З підвищенням кислотності ця різниця зменшується. У швидкостей поширення поперечних хвиль такий зв'язок не спостерігається [10]. Значення швидкостей поширення поздовжніх і поперечних пружних хвиль для магматичних і метаморфічних порід лінійно пов'язані з густиною. Для осадових порід такі закономірності не встановлені. Значення швидкостей пружних хвиль змінюються в зв'язку з нестриманістю структурно-текстурних характеристик порід в різних місцях відбору проб для випробувань. Так, коефіцієнт варіації швидкостей поздовжніх хвиль у порід, взятих з одного родовища, складає: у глин до 40%, у вапняків і доломіту до 25%. Розподіл значень швидкостей пружних хвиль у більшості магматичних і метаморфічних порід підпорядковується нормальному закону [10,11].

Швидкості поширення пружних хвиль в гірських породах

Породи	Густина	Швидкість поширення пружних хвиль, м/с		C_p/C_s
		поздовжніх	поперечних	
Дуніти	3,02	6370	3140	1,87
Перідотіти	3,05	6520	3610	1,82
Піроксеніти	3,28	7200	4160	1,72
Габро	2,99	6410	3590	1,80
Базальти	2,81	5360	3160	1,72
Діабази	2,95	5910	3440	1,77
Діорити	2,84	5390	3320	1,82
Сисніти	2,74	5180	2810	1,87
Граніти	2,72	5460	3170	1,71
Пегматити	2,63	4120	2600	1,78
Гнейси	2,77	5870	3100	1,77
Кварцити	2,8-2,9	4600-6000	2630-3810	1,75
Мармури	2,7	5400	3000	1,8
Пісковики	2,49-2,56	2290-3160	2290-3160	1,67-1,77
Доломіти	2,6-2,79	3600-4930	2190-3220	1,55-1,7
Вапняки	2,6-2,68	3110-4630	2330-3010	1,66-1,88
Вугілля	1,44	1500-1800	810	1,9

Залежність коефіцієнту загасання ультразвукових хвиль від характеристик гірської породи. На відміну від швидкості поширення пружних хвиль, фізична дисперсія яких у більшості порід практично відсутня, коефіцієнт загасання визначається частотою пружних коливань. В широкому діапазоні частот – від 1 Гц до 10 МГц коефіцієнт загасання a у різних гірських порід змінюється від $1 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$. Декремент загасання в цьому ж діапазоні частот в середньому змінюється від $1 \cdot 10^{-2}$ до 1,0.

Коефіцієнт загасання збільшується зі зростанням частоти. Однак чітко вираженою однозначною функціональною залежністю загасання від частоти для порід не встановлено. Наприклад, у гранітів в інтервалі частот від 10 до 1000 кГц найкраща апроксимація спостерігається при описі частотної залежності квадратичною функцією $a = mf^2$, де m - коефіцієнт пропорційності. У габро-діабазів, кварцитів, граніто-гнейсів, піщаників, сланців і інших порід частотна залежність в інтервалі від 500 до 5000 кГц підкоряється закону $a = A_1f + A_2f^2$. Така залежність спостерігається як для поздовжніх, так і для поперечних хвиль [10,11].

Можна вважати, що декремент загасання, що дорівнює добутку коефіцієнта загасання на довжину хвилі ($a\lambda$), у кожному типі вивержених і осадових порід не залежить від частоти. Вплив міжзеренних границь на коефіцієнт загасання виявляється у тому, що коефіцієнт загасання у монокристалі принаймні на порядок менше, ніж у породі, що складається з даного мінералу. При цьому чим дрібніше зерна породи, тим більше позначається фактор розсіювання. Вплив факторів пористості, тріщинуватості і недосконалості контактів між зернами мінералів в породі проявляється при впливі на неї тиску. Дослідження на гірських породах показують, що коефіцієнт загасання пружних хвиль зі збільшенням тиску зменшується. Це пов'язано з ущільненням зв'язків між мінералами. Розмір зерна в породі (d) визначає граничну частоту, при якій дотримується квадратичний закон розсіювання ($a_p = A_2f^2$). У граніті ($d=2,5$ мм) гранична частота за експериментальними даними становить 2 МГц; у габро-діабазі ($d=1$ мм) – 6 МГц; у пісковіку ($d=1,2$ мм) – 3,5 МГц [10].

У кристалічних порід коефіцієнт загасання поперечних хвиль зазвичай дорівнює коефіцієнту загасання поздовжніх хвиль або приблизно в 1,5-2 рази перевищує його. У вологих глин і водонасичених пісків спостерігається значна різниця в коефіцієнтах загасання поперечних і поздовжніх хвиль (до 5 і більше) [10,11]. Слід зазначити, що у випадку коли швидкості поширення пружних хвиль у багатьох міцних монолітних породах змінюються на 40-60% – їх коефіцієнти загасання змінюються у 2-4 рази. Отже, що коефіцієнт загасання пружних хвиль є більш чутливим параметром для якісної характеристики гірських порід, ніж швидкість ультразвуку.

Згідно з механікою пружних хвиль, ультразвукові хвилі викликають невеликі деформації розтягування і стиснення у середовищі, а тертя між утвореними частками відбувається під час деформації стиснення [15]. Область контакту між поверхнями тріщин і частками складається з

деяких нерівностей, які знаходяться в безпосередній близькості одна від одної. Енергія, що розсіюється у кожній нерівності, може бути записана виразом [16]

$$W_f = a\tau_f\sigma, \quad (1)$$

де τ_f - напруга зсуву на початковій поверхні тріщини, викликана ультразвуком, σ - стиснення. Напруга a є довжиною контакту між нерівностями тріщини, і може бути визначена як

$$a = 2 \times (3\pi/4 \times RC\delta)^{1/3}, \quad (2)$$

де $R=R_1R_2/(R_1+R_2)$, δ - ковзне зміщення, C - матеріальна стала, яка може бути записана як:

$$C = [1-V_1^2/\pi E_1 + 1 - V_2^2/\pi E_2], \quad (3)$$

де V_i і E_i – коефіцієнти Пуассона і модулі Юнга відповідно.

Величина τ_f визначається наступним виразом

$$\tau_f = 1/2 \times \mu\delta (1-\cos 2\theta), \quad (4)$$

де μ є коефіцієнтом тертя, а μ є кут між тріщиною і напрямком напруги, створюваного ультразвуком.

Грунтуючись на рівняннях (1)-(3), можна зробити висновок, що більша амплітуда деформації, викликана пружними коливаннями, призводить до збільшення величини розсіюваної енергії у середовищі і збільшення коефіцієнта загасання.

Оцінка частотної залежності коефіцієнта загасання ультразвуку у гірській породі. Частотна залежність коефіцієнта загасання ультразвуку від характеристик гірської породи дозволяє використовувати цей параметр для ідентифікації її геолого-мінералогічної структури. Як показано у роботах [17,18] поглинання і розсіяння ультразвуку на частках середовища залежить від довжини хвилі акустичних коливань. На малих частотах поглинання ультразвуку переважає над розсіюванням, тому на цих частотах поле випромінювання формується, в основному, нерозсіяними акустичними коливаннями. Але навіть на високих частотах існують області, де нерозсіяне випромінювання переважає над розсіяним. Це має місце на малих відстанях від джерела випромінювання. В іншому випадку внесок розсіяного випромінювання стає істотним. Зі збільшенням частоти різко зростає перетин розсіювання ультразвукових хвиль на твердих частинках. У цьому випадку поле випромінювання формується як нерозсіяними, так і розсіяними хвилями. Коректний розрахунок поля випромінювання розсіяних хвиль є складним завданням. Інтенсивність одноразово розсіяних хвиль можна знайти з рівняння [17,18]

$$I_\lambda^s(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \int d\vec{r}' \int d\vec{\Omega}' \sum_s (\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \frac{e^{-\tau(\vec{r}', \vec{r}, \lambda)}}{(\vec{r} - \vec{r}') \cdot \vec{\Omega}'} \times \\ \times \delta\left(\vec{\Omega} - \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}\right) I_\lambda^s(\vec{r}', \vec{\Omega}'). \quad (5)$$

При цьому інтегральна інтенсивність одноразово розсіяних хвиль визначається виразом

$$I_\lambda^s(\vec{r}) = \int_{4\pi} d\Omega(\vec{r}, \vec{\Omega}). \quad (6)$$

Підставляючи в (6) у праву частину виразу (5) і проводячи інтегрування, отримаємо

$$I_\lambda^s(\vec{r}) = \int d\vec{r}' \int d\vec{\Omega}' \sum_s \left(\vec{\Omega}' \rightarrow \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right) \frac{e^{-\tau(\vec{r}', \vec{r}, \lambda)}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \cdot I_\lambda^s(\vec{r}', \vec{\Omega}'). \quad (7)$$

Оцінимо цю величину в точці A на вісі ультразвукового пучка (рис. 1).

Запишемо (7) у циліндричній системі координат

$$I_\lambda^s(Z) = 2\pi \int_0^Z dZ' \int_0^a d\rho' \cdot \rho' I_{\lambda, \lambda}^s e^{-\Sigma Z'} \sum_s (\mu) \frac{e^{-\Sigma \xi}}{\xi^2}, \quad (8)$$

де $\xi = |\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{(Z - Z')^2 + \rho^2}$; $\mu = \vec{k} \cdot \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$; \vec{k} – одиничний вектор, спрямований уздовж осі Z .

Для обчислення (10) виконаємо ряд припущень. По-перше, розглянемо випадок, коли $Z \gg a$, тоді $\xi \approx Z - Z'$. По-друге, припустимо, що розсіювання на частинках є ізотропним, тоді

$$\sum_s (\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') = \frac{n\sigma_s}{4\pi}, \quad (9)$$

де σ_s – повний переріз розсіювання. З урахуванням цих наближень, виконавши інтегрування у (8), одержимо

$$I_\lambda^S(Z) = \frac{n\sigma_s}{4} e^{-\Sigma(\lambda)Z} I_{0,\lambda} \left\{ Z \ln\left(1 + \frac{a^2}{Z^2}\right) + 2a \cdot \arctg \frac{Z}{a} \right\}. \quad (10)$$

Введемо величину β_v

$$\beta_v = \frac{I_\lambda^o(Z) + I_\lambda^S(Z)}{I_\lambda^o(Z)} = 1 + \frac{I_\lambda^S(Z)}{I_\lambda^o(Z)} \quad (11)$$

і знайдемо її асимптотичне значення за умови, що $Z \gg a$

$$\beta_v = 1 + \frac{n\delta_s}{4} \left\{ Z \ln\left(1 + \frac{a^2}{Z^2}\right) + 2a \cdot \arctg \frac{Z}{a} \right\} \approx 1 + \frac{n\delta_s \pi a}{4}. \quad (12)$$

Величина β_v залежить не тільки від радіуса дискового джерела a , але і від частоти ультразвукових хвиль. Сенс цієї величини полягає у наступному: $\beta_v - 1$ показує сумірність вкладів розсіяного і нерозсіяного випромінювання. Назвемо β_v фактором накопичення. При цьому очевидно, що чим більше β_v відрізняється від одиниці, тим більший внесок розсіяного випромінювання. На рис. 2 показана залежність асимптотичного значення фактора накопичення від частоти ультразвукових хвиль.

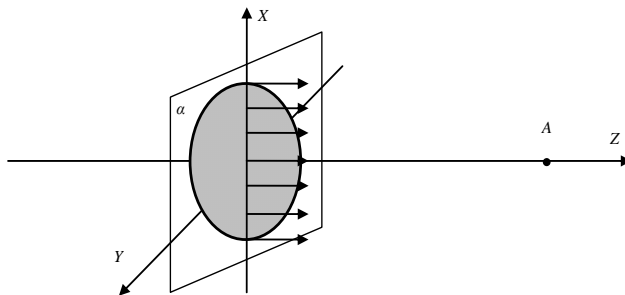


Рис. 1. Просторова орієнтація випромінювача ультразвуку

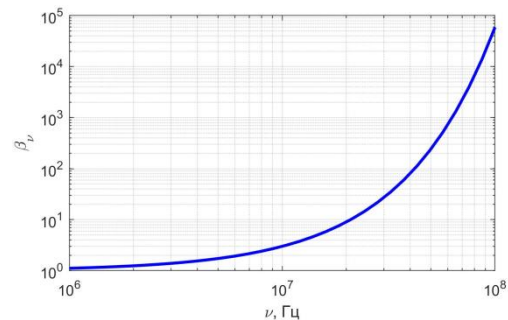


Рис. 2. Залежність асимптотичного значення фактора накопичення від частоти ультразвукових коливань

Як видно з рис. 2, при великих частотах не можна нехтувати не тільки одноразовим розсіяним, але і багаторазовим розсіяним випромінюванням ультразвукових хвиль.

Оцінка нелінійності процесу поширення ультразвуку в гірській породі. Для оцінки нелінійності процесу поширення ультразвуку необхідно визначити коефіцієнт загасання ультразвуку на основній частоті та першій гармоніці, а також співвідношення цих параметрів [15]. Типовим нелінійним явищем є генерація другої гармоніки, тобто формування частоти гармоніки, яка в два рази перевищує частоту основної вхідної частоти, що є результатом спотворення форми сигналу у часовій області.

Нехай поздовжня ультразвукова хвиля поширюється через контакт між двома шорсткими поверхнями часток середовища, початкова площа контакту збільшується в фазі стиснення, а зменшується в фазі розрідження [23-26]. У результаті амплітуди попередніх і відображених акустичних хвиль також змінюються відповідно до змін площі контактних поверхонь. Отже, хвилі що пройшли та відбиті хвилі здійснюють амплітудну модуляцію з частотою зовнішньої дії, відмінною від падаючих хвиль [27].

Формування частоти гармоніки, яка в два рази перевищує частоту основного вхідного сигналу, є результатом неправильної форми сигналу у часовій області після певної відстані поширення. Ультразвукова хвиля спотворюється через нелінійність матеріалу, і, отже, генеруються вищі гармоніки. Таким чином, прийнятий сигнал складається не тільки з хвилі основної частоти, але також з хвилі другої або більш високих гармонік. Нелінійний параметр пов'язаний з амплітудами основної хвилі і другої гармоніки [21,22] визначають таким чином:

$$\beta = A_2/A_1,$$

де A_1 і A_2 – амплітуда основної хвилі і хвилі другої гармоніки відповідно.

Таким чином, нелінійність матеріалу може бути оцінена шляхом визначення амплітуд основної та другої гармонік. Для якісної оцінки нелінійності матеріалу всі значення нормовані для подання лише відносної зміни акустичного нелінійного відгуку.

Опис ультразвукового вимірювального каналу на основі електромагнітних акустичних перетворювачів та отримані результати. Для збудження і прийому ультразвукових коливань у стінці пробуреної свердловини пропонується використовувати електромагнітний акустичний вимірювальний канал. Електромагнітне акустичне формування ультразвуку засновано на двох фізичних механізмах: силах Лоренца і магнітострикції у феромагнітних матеріалах. Для гірських порід превалює акустичне електромагнітне явище, обумовлене силами Лоренца. Аналітичні рішення для кільцевої котушки над шаруватим провідником запропоновано у [26]. Основними рівняннями для розрахунку індукованого вихрового струму є

$$\nabla^2 A = -\mu I + \mu\sigma \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \mu\zeta \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \mu\nabla \frac{1}{\mu} \times (\nabla \times A), \quad E = -j\omega A, \quad J = \sigma E, \quad (13)$$

де A – векторний потенціал; μ , σ і ζ – проникність, провідність і діелектрична проникність матеріалу відповідно; I – густина прикладеного струму, ω – кутова частота прикладеної змінного струму, E – електричне поле, J – індукований вихровий струм.

Формування пружних коливань представляють набором рівнянь у частинних похідних, що описують деформування матеріалу і навантаження внутрішнім напруженням [12–18,26]

$$\rho(x) \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^d \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}(x,t) = f_i(x,t), \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^d \sum_{k=1}^d c_{ijkl}(x) \frac{\partial v_{ik}}{\partial x_l} + \theta_{ij}(x,t), \quad (15)$$

де ρ – густина маси, c_{ijkl} – тензор жорсткості випробувального зразка; f_i – джерело сили, θ_{ij} – джерело швидкості тензора деформації. Рівняння (14) є виразом другого закону Ньютона: коли сила прикладається до випробувального зразка, виникають напруження і деформація, а також зміщення частинок. Рівняння (15), засноване на законі Гука, описує співвідношення швидкості тензора напружень і швидкості тензора деформації при виникненні деформації.

Один з можливих варіантів реалізації вимірювального каналу на базі електромагнітних акустичних перетворювачів представлено на рис. 3.

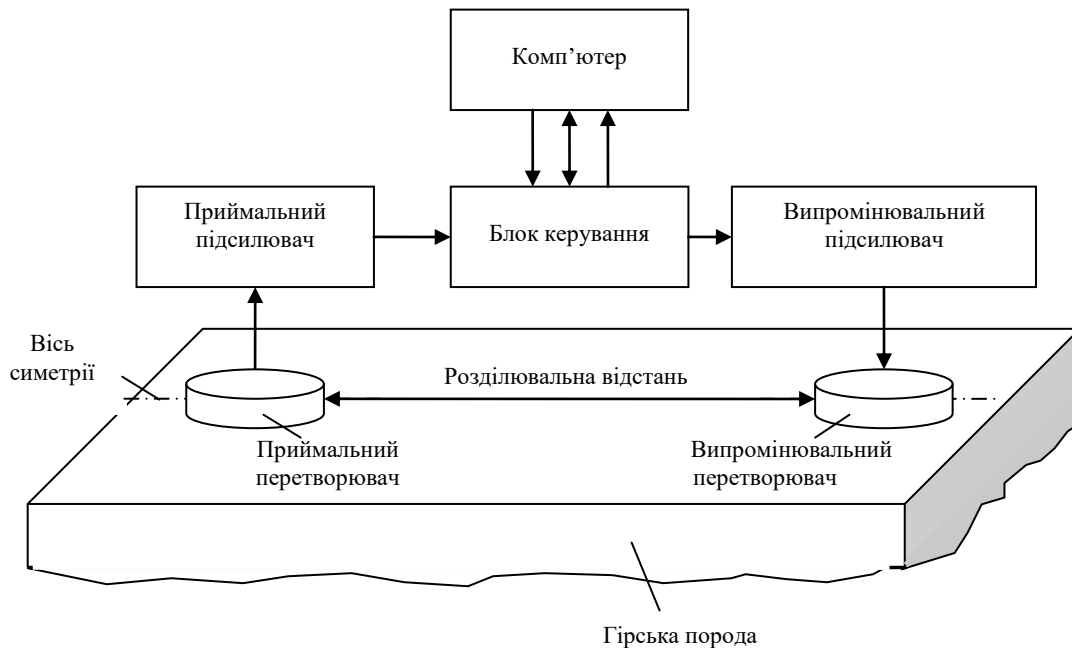


Рис. 3. Вимірювальний канал на базі електромагнітних акустичних перетворювачів

Відповідно до представленої схеми (рис. 3) комп'ютер використано для формування задання для блоку керування з вбудованим генератором довільних функцій. Сигнал, що генеру-

ється у блоці керування, посилюється з використанням підсилювача перед подачею до випромінювального перетворювача. Приймальний перетворювач підключений до блоку керування через спеціальний підсилювач з коефіцієнтом підсилення близько 95 дБ.

Як оціночні параметри для визначення фізико-механічних та хіміко-мінералогічних характеристик гірських порід були використані такі параметри: швидкість поширення поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль на частоті 2,5 МГц, коефіцієнт загасання ультразвуку на частоті 100 кГц та 2,5 МГц на основній частоті та першій гармоніці, а також співвідношення цих параметрів. Обробка отриманих результатів виконувалась за методикою, опис якої наведено в роботі [27]. Точність ідентифікації основних різновидів гірських порід становила 87%. На основі аналізу отриманих результатів зроблено висновок, що для досягнення більш високої якості ідентифікації геолого-мінералогічної структури досліджуваного середовища доцільно застосувати додатково магнітометричні та ядерно-фізичні вимірювання.

Висновки та напрямки подальших досліджень. На основі методів аналітичного конструювання, комп'ютерного моделювання, чисельного моделювання розроблено метод визначення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи на основі значень швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнту загасання ультразвуку на основній частоті та першій гармоніці, а також співвідношення цих параметрів. Практичне значення результатів полягає у розробленні ультразвукового вимірювального каналу, що складається з генератора та приймача ультразвукового сигналу, підсилювачів у вхідному та вихідному каналах, осцилографа та комп'ютера. Для збудження і прийому ультразвукових коливань у стінці пробуреної свердловини пропонується використовувати електромагнітний акустичний перетворювач. Сигнал, що генерується за допомогою цифрового осцилографа, посилюється з використанням підсилювача перед подачею до генератора. Приймач також підключений до цифрового осцилографа через спеціально розроблений підсилювач. Запропонований спосіб ідентифікації основних різновидів гірських порід характеризується точністю 87%. Для досягнення більш високої якості ідентифікації геолого-мінералогічної структури досліджуваного середовища доцільно застосувати додатково магнітометричні та ядерно-фізичні вимірювання.

Список літератури

1. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Irina G. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 7. P. 383-387.
2. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 3. P. 38-41.
3. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 6. P. 591-594.
4. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Vol. 4. P. 325-329.
5. Yue, Z.Q., Lee, C.F., Law, K.T., & Lam, L.G. Automatic monitoring of rotary percussive drilling for ground characterization // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2015. Vol. 41(4). P. 573-612.
6. Schunnesson H. Rock characterisation using percussive drilling // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2014. Vol. 35(6). P. 711-725.
7. Schunnesson H., Holme K. Drill monitoring for geological mine planning in the Viscaria copper mine, Sweden // CIM Bulletin. 2015. Vol. 90(1030). P. 82-89.
8. Beattie N. Monitoring-while-drilling for open-pit mining in a hard rock environment. M.Sc. Queen`s University. 2012.
9. Martin J. Application of pattern recognition techniques to monitoring-while-drilling on a rotary electric blast hole drill at an open-pit coal mine. M.Sc. Queen`s University. 2013.
10. Акустические свойства горных пород. URL: <http://ctcmetar.ru/volnovye-processy/9297-akusticheskie-svoystva-gornyh-porod.html> (дата звернення: 25.05.2020).
11. Акустический каротаж по скорости. URL: <http://fceland.ru/dobycha-nefti/6826-akusticheskiy-karotazh-pokorosti.html> (дата звернення: 25.05.2020).
12. Xie Y., Rodriguez S., Zhang W., Liu Z., Yin W. Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD // Journal of Sensors. 2016. Vol 2016. ID 5451821. DOI: 10.1155/2016/5451821.
13. Бражников Н. И. Ультразвуковые методы. М.-Л.: Энергия, 1965. 248 с.
14. Yang Z., Tian Y., Li W., Zhou H., Zhang W., Li J. Experimental investigation of the acoustic nonlinear behavior in granular polymer bonded explosives with progressive fatigue damage // Materials. 2017. Vol. 10(6), 660. DOI: 10.3390/ma10060660.
15. Liu G., Liu Z., Feng J., Song Z., Liu Z. Experimental research on the ultrasonic attenuation mechanism of coal // Journal of Geophysics and Engineering. 2017. Vol. 14(3). P. 502-512. DOI: 10.1088/1742-2140/aa5f23.
16. Li H. B., Zhao J., Li T. J. Micromechanical modelling of the mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2000. Vol. 37. P. 923-35.

17. **Моркун В. С.** Адаптивная система стабилизации гранулометрического состава выходного продукта замкнутого цикла измельчения на базе средств ультразвукового контроля: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. Кривой Рог, 1983. 227 с.
18. **Моркун В.С., Потапов В.Н., Моркун Н.В., Подгородецкий Н.С.** Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогащительного производства. Кривой Рог: Издат. центр КТУ, 2007. 283 с.
19. **Solodov I.** Ultrasonics of non-linear contacts: Propagation, reflection and NDE-applications // *Ultrasonics*. 1998, Vol. 36, P. 383–385.
20. **Solodov I., Krohn N., Busse G.** CAN: An example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids // *Ultrasonics*. 2004. Vol. 40. P. 621–625.
21. **Biwa S., Nakajima M., Ohno N.** On the acoustic nonlinearity of solid-solid contact with pressure-dependent interface stiffness. *Journal of Applied Mechanics*. 2004, Vol. 71, P. 508–515.
22. **Pecorari C., Solodov I.** Universality of non-classical nonlinearity. Springer: New York, 2007. P. 309–336.
23. **Zhang S., Li X., Jeong H., Cho S., Hu H.** Theoretical and experimental investigation of the pulse-echo nonlinearity acoustic sound fields of focused transducers // *Applied Acoustics*. 2017, Vol. 117, P. 145–149.
24. **Li W., Cho Y., Achenbach J.D.** Detection of thermal fatigue in composites by second harmonic lamb waves // *Smart Materials and Structures*. 2012, Vol. 21, P. 85–93.
25. **Metya A., Ghosh M., Parida N., Sagar S.P.** Higher harmonic analysis of ultrasonic signal for ageing behaviour study of C-250 grade maraging steel // *NDT and E International*. 2008. Vol. 41. P. 484–489.
26. **Dodd C. V., Deeds W. E.** Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems // *Journal of Applied Physics*. 39, 2829.
27. **Моркун В. С., Тронь В. В., Гапоненко И. А., Паранюк Д. И.** Идентификация структуры горной породы в процессе бурения на основе ультразвуковых измерений // *Гірничий вісник*. 2018. Вип. 104. С. 81–86.

Рукопис подано до редакції 30.03.2020

УДК 004.056.5:004.032.26

Н. Н. ШАПОВАЛОВА, О. Г. РИБАЛЬЧЕНКО, ст. викладачі,
С. В. БЛАШЕНКО, асист., Н. Х. САЙГАРЕЄВ, доцент
Криворізький національний університет

НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ МЕТОД РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ DDOS-АТАК

Мета роботи – теоретично обґрунтувати вибір методу реалізації раннього виявлення аномального трафіка та класифікації мережевих аномалій на основі використання методів машинного навчання, розробити математичну модель штучної нейронної мережі, визначити топологію сформованої моделі і метод її навчання, розробити і протестувати відповідне програмне забезпечення, експериментально перевірити систему.

Методи дослідження. У роботі використано наступні методи дослідження: аналіз джерел з досліджуваної теми, методи теорії штучного інтелекту для проектування топології нейронної мережі, моделювання процесу навчання алгоритмів класифікації, формалізація побудованих моделей, методи проектування програмного забезпечення для розробки програмної моделі, емпіричні методи обґрунтування оптимальної архітектури моделі.

Наукова новизна полягає в тому, що розроблена модель має оптимальну топологію, яка дозволяє ефективно вирішувати поставлене завдання класифікації типів мережевого трафіка, і має достатню високу здатність до узагальнення. Створене програмне забезпечення з використанням цієї моделі дає можливість проаналізувати мережеві аномалії та виявити DDoS-атаки на ранньому етапі.

Практична значимість виконаної роботи полягає в можливості точно фіксувати початок атаки, а також отримувати навчальні вибірки, які можуть бути використані для навчання нейронних мереж та інших класифікаторів, в тому числі для фільтрації небажаного трафіка. Аналіз мережевого трафіка дозволяє виявити мережеві аномалії та розрізнити аномальну або нормальну його поведінку, внаслідок чого стає можливим не обмежувати обсяг трафіка для клієнтів. Завдяки ранньому виявленню DDoS-атак та швидкому реагуванню, компанії будуть захищені від значних збитків.

Результати. Запропоновано алгоритм протидії DDoS-атакам на основі нейронної мережі, обґрунтовано вибір навчальної множини, що відповідає критерію достатньої репрезентативності. Розроблена математична і програмна модель нейронної мережі для виявлення мережевих аномалій. Визначена архітектура нейронної мережі та функція активації, проведено тестування роботи розробленої програмної моделі.

Ключові слова: DDoS-атака, датасет, нейронна мережа, мережева аномалія, функція активації.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-106-112

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. У час стрімкого розвитку інформаційних технологій компанії та підприємства активно зберігають і поширюють інфор-