УДК 622.7: 534

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

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

Мета - дослідження є аналізом методів оцінки параметрів процесу зворотного розсіювання ультразвукових хвиль, які розповсюджуються у випадково-неоднорідному середовищі, для визначення можливості їх використання в процедурі ідентифікації мінеральних різновидів залізної руди.

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

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні використання параметрів зворотного розсіювання ультразвукових хвиль при їх розповсюдженні у досліджуваному середовищі для формування ідентифікаційних характеристик зразків залізної руди в процесі її видобутку і переробки.

Практичне значення полягає в тому, що використання запропонованого підходу дозволяє оперативно отримати характеристичну інформацію про структурні ознаки мінеральних різновидів залізної руди.

Результати. Як коефіцієнт загасання та швидкість поширення, коефіцієнт зворотного розсіювання є фундаментальною властивістю ультразвуку, що використовується для характеристики багатьох процесів. На жаль, в даний час існує набагато менше апробованих методів вимірювання зворотного ультразвукового розсіювання, ніж для двох інших параметрів. Вимірювання частотної залежності зворотного розсіювання більш послідовні, ніж вимірювання абсолютної величини. Коли розсіювачі малі порівняно з довжиною хвилі ультразвуку, експериментальні дані про частотно-залежний коефіцієнт зворотного розсіювання, зазвичай узгоджуються з очікуваною поведінкою релеєвського розсіювання (пропорційно до частоти в четвертому ступені). Однак існує велика потреба у стандартизації методів вимірювання цього параметра. Метод статистики огинаючої моделює амплітуду огинаючої прийнятих сигналів за допомогою статистичного розподілу. Метод частотної спектроскопії заснований на аналізі частотного складу сигналів, що змінюється в залежності від розміру та форми поглинаючих структур. Метод кепстрального аналізу використовує частотний склад сигналів з метою оцінки відстані між поглиначами. У поєднанні ці методи можуть використовуватися для оцінки варіацій концентрації та розміру неоднорідностей у досліджуваному середовищі. Існуючі моделі розсіювання ультразвуку дозволяють з інформації, що міститься в спектральній характеристиці розсіяного сигналу, одержати числові параметри, що описують кількість розсіювачів та їхній просторовий розподіл, тобто. охарактеризувати структурні та текстурні особливості досліджуваних зразків. Таким чином, обґрунтування можливості використання параметрів зворотного ультразвукового розсіювання для формування ідентифікаційних характеристик зразків залізної руди в процесі її видобутку та переробки є важливою науково-практичною проблемою, оскільки її вирішення дозволить покращити результати оперативної ідентифікації принаймні основних мінералого-технологічних різновидів залізної руди певного родовища.

Ключові слова: ультразвук, зворотне розсіювання, вимірювання, методи, оцінка.

doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-55-3-10

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Згасання, швидкість розповсюдження та коефіцієнт зворотного розсіювання ультразвуку широко використовуються для характеристики багатьох мінеральних та органічних речовин. Порівняння методів вимірювання цих параметрів говорить про те, що стосовно згасання та швидкості поширення виходять добре порівняні результати, але має місце значне розходження щодо вимірювань коефіцієнта зворотного розсіювання.

Існує кілька факторів, які можуть сприяти збільшенню дисперсії вимірювань зворотного розсіювання [1]. По-перше, вимірювання згасання та швидкості ультразвуку зазвичай виконуються у наскрізному режимі. При цьому зазвичай спостерігається відносно високе відношення сигнал/шум (SNR). Вимірювання коефіцієнта зворотного розсіювання виконуються в режимі ехо-імпульсу, відношення сигнал-шум у цьому випадку порівняно низьке. Менший SNR сприяє збільшенню дисперсії вимірювань. По-друге, існує набагато більша кількість апробованих та стандартизованих вимірювальних процедур та алгоритмів для оцінки коефіцієнта згасання та швидкості ультразвуку, ніж для коефіцієнта зворотного розсіювання. По-третє, математична складність алгоритмів обчислення коефіцієнта зворотного розсіювання, як правило, перевищує таку для коефіцієнта згасання та швидкості ультразвуку. Нарешті, методи вимірювання згасання та швидкості ультразвуку можуть бути ретельно протестовані шляхом виконання вимірювань на стандартних об'єктах (наприклад, металах, рідинах та ін.),

·© Моркун В. С., Моркун Н. В., Гапоненко А. А., Бобров Є.Ю., 2022

для яких відомі справжні значення. Посилання на коефіцієнти зворотного розсіювання стосовно таких поширених тест-об'єктів порівняно рідкісні (якщо взагалі існують). Це повною мірою стосується таких складних структур, якими є мінерали залізної руди. У той же час обґрунтування можливості використання параметрів зворотного ультразвукового розсіювання для формування ідентифікаційних характеристик зразків залізної руди в процесі її видобутку та переробки є важливою науково-практичною проблемою, оскільки її вирішення дозволить покращити результати оперативної ідентифікації при наймі основних мінералого-технологічних різновидів залізної руди [2].

Аналіз досліджень і публікацій. Вплив поглинання та розсіювання на процес поширення ехо-сигналу, що приймається ультразвуковим датчиком, проявляється в сукупності як зменшення його амплітуди. Гірська порода є випадково неоднорідним середовищем, тому процес розсіювання ультразвуку в ній залежить від багатьох геометричних факторів, таких як розмір, форма і просторовий розподіл об'єктів, що розсіюють, а також від фізичних властивостей, таких як пружні характеристики і щільність матеріалу, з якого ці об'єкти складаються [3].

Кількісні оціночні параметри процесу розповсюдження розсіяного ультразвукового сигналу знайшли широке застосування у техніці, медицині та ін. галузях [4]. Характеристичні параметри ультразвукових вимірів можуть бути отримані шляхом параметризації обернено розсіяних ехо-сигналів з використанням форм-факторів [5]. Однак, у випадку, коли розмір розсіювальних утворень у зразку, що сканується, занадто малий або занадто великий в порівнянні з довжиною хвилі, отримувана інформація про їх властивості виявляється спотвореною [6,7]. Стосовно цих умов доцільно використовувати частотно-залежний аналіз зворотно розсіяних ехо-сигналів. У теорії та практиці ультразвукових вимірювань широко використовується така кількісна характеристика процесу розповсюдження ультразвуку як ефективний діаметр розсіювача (ESD). Для отримання ESD можна підігнати гаусову модель коефіцієнта зворотного розсіювання (BSC) за методом, описаним в роботі [8]. Однак у середовищах з різними розмірами розсіювачів параметризація BSC для отримання ESD не гарантує точних результатів [9]. З іншого боку, у роботі [10] повідомляється, що характер розподілу розміру розсіювачів впливає на оцінку ESD.

Відзначається вплив частоти зондувального ультразвукового сигналу на оцінку ESD, особливо коли діапазон розмірів розсіювачів широкий [11,12]. Отже, використання одного розміру як ESD, не дає повної картини мікроструктури предмета досліджень [9]. У роботі [13] підкреслюється взаємозв'язок форми та розподілу розсіювачів за розмірами і частотними характеристиками зондуючого сигналу. Вплив розподілу агрегатів за розмірами на параметри зворотного розсіювання досліджено у таких публікаціях, як [14,15]. Робиться висновок, що аналіз розподілу розсіювачів за розмірами дозволяє сформувати характеристичні ознаки мікроструктури зразка. У роботі [16] пропонується метод оцінки розподілу розсіювачів за розмірами, який включає виявлення вкладу кожного розсіювача індивідуально у BSC. Пропонований метод перевірявся з використанням чотирьох змодельованих фантомів з різними розподілами. Зроблено висновок про те, що запропонований підхід дозволяє точно оцінити розподіл розсіювачів за розміром. У роботі [17] пропонується метод вимірювання зворотного розсіювання шляхом моделювання поля перетворювача. Однак застосування цього підходу утруднено при використанні сканера зі складною діаграмою спрямованості, що виникає через динамічну апертуру.

Таким чином, для оцінки структурних і текстурних особливостей мінеральних різновидів залізняку доцільно розглянути можливість використання частотної залежності обернено розсіяних ультразвукових сигналів у сканованих зразках гірської породи.

Постановка завдання. Завданням дослідження є аналіз методів оцінки параметрів процесу зворотного розсіювання ультразвукових хвиль для визначення можливості їх використання в процедурі ідентифікації мінеральних різновидів залізної руди.

Викладення матеріалу і результати. Існує три основні підходи при аналізі акустичних сигналів. Кожен метод застосовується як при моделюванні, так і для обробки експериментальних даних [18]. Основна відмінність між методами полягає в тому, чи виконується аналіз сигналу у часовій або частотній області.

Метод статистики огинаючої моделює амплітуду огинаючої прийнятих сигналів за допомогою статистичного розподілу. Характеристики розподілу залежать від фізичного розміру, концентрації та просторового розподілу розташованих у зразку структур [19]. Амплітуда оги-

наючої сигналів порівнюється з трьома статистичними розподілами: Релея, узагальненого гамма-розподілу та розподілу Накагамі. Повністю розвинений спекл вважається встановленим, коли відношення середнього значення дисперсії амплітуди (також відоме як відношення спекл-сигналу до шуму, SNR) дорівнює 1,91 [20]. Відповідні параметри кожного розподілу реєструються в залежності від розміру та концентрації поглинача.

Метод частотної спектроскопії заснований на аналізі частотного складу сигналів, що змінюється в залежності від розміру та форми поглинаючих структур [21]. Спектральний нахил (*SS*) нормалізованої або необмеженої смуги спектру потужності розраховується за допомогою лінійної регресії в межах смуги частот перетворювача -6 дБ. Нормалізовані спектри потужності визначають або з частотних спектрів сигналу без обмеження смуги пропускання у разі моделювання, або шляхом нормалізації спектрів потужності за спектрами, отриманими з еталонного сигналу для експериментів. Цей підхід аналогічний тому, що використовується при ультразвуковій характеристиці біологічних зразків [22]. Пряма лінія може бути підігнана до результуючих нормалізованих спектр використовує частотний склад сигналів з метою оцінки відстані між поглиначами [23]. Кепстр – це зворотне перетворення Фур'є від натурального логарифму квадрата спектральної густини сигналу і в межах смуги пропускання перетворювача -6 дБ, щоб отримати спектральні параметри

$$PS_{fit}(f) = SS \times f + Y_{int}, \tag{1}$$

де PS_{fit} є результатом виконання лінійної регресії за нормалізованими спектрами, *SS* - спектральний нахил, виміряний в дБ/МГц, а Y_{int} являє собою точку перетину осі *Y* прямою підлаштування, виміряну в дБ.

Метод кепстрального аналізу

$$C(q) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \ln\,|X(jw)|^2 \exp(jwq)\,dw\,, \tag{2}$$

де $X(jw) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)\exp(-jwt)\,dt$, q - кепстральний час.

Цей метод дозволяє рознести енергетичні сплески аналізованого сигналу та шумові процеси по осі кепстрального часу. Положення домінуючого (першого) кепстрального піку може бути перетворено на фізичну відстань з урахуванням швидкості ультразвуку в середовищі.

Далі розглянуто основні методи, що реалізують наведені підходи при аналізі розсіяних імпульсних ультразвукових сигналів.

Подання будь-якого сигналу в часовій та частотній областях пов'язане парою перетворення Фур'є

$$P(w) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} p(t)\exp(iwt)dt; \tag{3}$$

$$p(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} P(w)\exp(-iwt)dw, \tag{4}$$

де $w = 2\pi f$ - кутова частота акустичної хвилі.

Геометрія типової вимірювальної системи показана на рис. 1, де розсіювачі ультразвуку знаходяться в середовищі, властивості якого відмінні від властивостей цих розсіювачів [24].

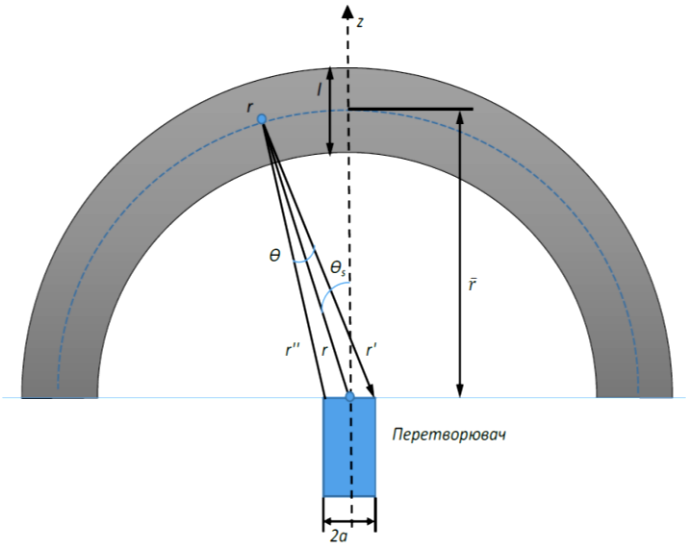

Рис. 1. Геометрія типової вимірювальної системи із застосуванням зворотно розсіяних ультразвукових хвиль

Навколишнє середовище має щільність ρ_0 та швидкість звуку c_0. У загальному випадку c_0 є комплексним, тому хвильове число $k = w/c_0$ також є комплексним. У режимі передачі на поверхню перетворювача наводяться коливання електричним збудженням, отже нормальний розподіл швидкості на поверхні перетворювача дорівнює $U_T(\mathbf{r}_T;\ w)$. Поле тиску, що падає на $\mathbf{r}$, позначається $P_{in}(\mathbf{r};\ w)$ і в частотній області може бути визначено таким чином

$$P_{in}(\mathbf{r};w) = P_0(w)D_T(\mathbf{r};w)\ , \tag{5}$$

де $P_0(w) = p_0c_0U(w)$ - характерна амплітуда тиску на поверхні перетворювача, $U(w)$ - амплітуда загальної нормальної швидкості на поверхні перетворювача, а $D_T(\mathbf{r};\ w)$ - діаграма спрямованості, яка визначається як

$$D_T(\mathbf{r};w) = \frac{-ik}{2\pi}\iint_{S_T}\frac{U_T(\mathbf{r}_T;w)}{S\qquad U(w)}\frac{exp(ikr_T')}{r_T'}dS(\mathbf{r}_T). \tag{6}$$

Для перетворювача, виконаного за технологією фазованої решітки у цьому виразі величину $U_T(\mathbf{r}_T;w)/U(w)$ можна розглядати як відносну чутливість та фазову затримку кожного елемента перетворювача, а $r_T' = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_T|$ - як відстань від точкового джерела на поверхні перетворювача до точки спостереження. Використовуючи це визначення діаграми спрямованості, перетворювач можна сфокусувати геометрично або динамічно за допомогою фазових затримок його елементів.

Точні вимірювання зворотного ультразвукового розсіювання та коефіцієнтів загасання можуть бути виконані з використанням методу еталонного фантому [25]. При реалізації цього методу сигнали реєструються від розсіювачів у зразку. Потім при ідентичних налаштуваннях приладу також записуються сигнали від еталонного фантома, що має швидкість звуку, приблизно таку ж, як у зразка, і має відомі властивості згасання і зворотного розсіювання.

Нехай $|S_s(f, z)|^2$ - значення спектра потужності ехо-сигналу на глибині z і частоті f від зразка, а $|S_r(f, z)|^2$ - спектр потужності з тієї ж глибини в еталонному фантомі [26]. Припускаючи, що інструментарій та параметри променю мають однаковий вплив на сигнал від обох середовищ, відношення спектрів потужності ехо-сигналу може бути виражене як

$$\overline{\frac{|S_s(f,z)|^2}{|S_r(f,z)|^2}} = \frac{BSC_s(f)}{BSC_r(f)}\exp\{-4z(\alpha_s(f) - \alpha_r(f))\}, \tag{7}$$

де $BSC(f)$ та α - коефіцієнти зворотного розсіювання і згасання на частоті f; індекси s та r відносяться до зразка та еталонного середовища відповідно.

Відношення спектра потужності від зразка до спектру еталонного середовища береться як функція глибини, і виходить натуральний логарифм цього відношення від глибини. Нахил графіка залежності пропорційний різниці коефіцієнтів ослаблення зразка та зразка. Оскільки останнє відомо, це дає коефіцієнт загасання зразка. Для однорідного середовища наведене вище рівняння може бути вирішено відповідно залежності коефіцієнта зворотного розсіювання від частоти.

Метод вимірювання коефіцієнта зворотного розсіювання η об'єму, що містить випадковий розподіл розсіювачів вперше запропонований в роботі [27]. Це метод заміщення, при якому середньоквадратичне значення стробованого зворотно розсіяного сигналу порівнюється з середньоквадратичним значенням відбитого сигналу від розсіювача, розташованого на тій же відстані, що і перетворювач від розсіюючого об'єму. Відношення цих двох величин дає коефіцієнт зворотного розсіювання. Зразок озвучується синусоїдальним імпульсом вузькосмугового планарного перетворювача. Фактичний обсяг променю (тобто обсяг розсіювачів, які роблять значний внесок у зворотно розсіяний сигнал) визначається по латералі шириною -3 дБ ультразвукового променю, а по осі - часовим вікном. У цьому наближенні поле вважається постійним усередині певного циліндричного об'єму.

Вираз коефіцієнта зворотного розсіювання розсіюючого об'єму визначається як η

$$\eta = \frac{P_s}{P_i}\frac{R^2K^2}{V_s\Gamma^4A(f)}\ , \tag{8}$$

$$A(f) = \left(\frac{e^{\tau c\alpha} - e^{-\tau c\alpha}}{2c\alpha\tau}\right)\left(\frac{e^{-2c\alpha t_1} - e^{-c\alpha t_2}}{2c\alpha\Delta t}\right), \tag{9}$$

$$V_s = \frac{1}{2}Sc(t_2 - t_1), \tag{10}$$

де P_s - середня акустична потужність зворотного розсіювання, а P_i - падаюча потужність, V_s - розсіюючий об'єм, $A(f)$ - функція корекції згасання для зразка, S - поперечний переріз об'єму, що розсіює, $\Delta t = t_2 - t_1$ - тривалість вікна стробування, Γ - коефіцієнт передачі акустичного тиску між зразком та навколишнім середовищем, K – коефіцієнт відображення тиску на межі розділу зразок - навколишнє середовище. τ – тривалість імпульсу, R – відстань від перетворювача до центру об'єму розсіювання, α – коефіцієнт загасання, c – швидкість поширення ультразвуку у зразку.

Нове формулювання для обробки даних коефіцієнта зворотного розсіювання було запропоновано у роботі [28]. Це формулювання не має обмежень на положення розсіюючого об'єму та площини відбивача щодо перетворювача. Дифракційна функція перетворювача строго розраховується, а потім апроксимується у разі плоского чи фокусуючого перетворювача.

Крім того, метод, запропонований у роботі [27], може бути отриманий з цього формулювання у разі плоского перетворювача. Цей підхід дозволив вивести вираз коефіцієнта зворотного розсіювання [29]. Якщо помістити базову площину на половині відстані між центром перетворювача і об'ємом, що розсіює, $z_{ref} = R/2$, вийде

$$\eta(w) \cong \frac{\langle |V_s(r \in V; w)|^2 \rangle}{\left|\overline{V}_{ref}\left(z_{ref}; w\right)\right|^2} \frac{K^2 (k\alpha)^2 \left(\frac{R}{r_0}\right)^2}{\Gamma^2(w) A(R; w) 4\pi^3 l E_\infty} \times$$
$$\times \exp\left[-\left(\frac{2}{\pi}\right)\left(\frac{R}{2r_0}\right)^{0,5}\right] \exp[-E_\infty \pi (R/r_0)^2] , \quad (11)$$

де $\langle |V_s(r \in V; w)|^2 \rangle$ - середня амплітуда спектра відбитих сигналів, $\left|\overline{V}_{ref}\left(z_{ref}; w\right)\right|^2$ - амплітуда спектру сигналу, відбитого від еталонної площини, $E_\infty = 0{,}46$, R - відстань між перетворювачем і центром об'єму, що розсіює, $r_0 = ka^2/2\pi$, k = хвильовий вектор, a - радіус перетворювача, $l = c\Delta t/2$ - довжина об'єму, що розсіює, Δt - тривалість строба, $A(R; \omega)$ - функція корекції згасання.

У разі, коли загасання в речовині, в якій знаходиться зразок, незначне, функція корекції згасання набуває вигляду

$$A(r \in V; w) \cong \exp[-4\alpha(R - r_i)] \times \frac{\exp[2\alpha l] - exp[-2\alpha l]}{4\alpha l} \times \frac{\exp[2\alpha \Delta tc] - exp[-2\alpha \Delta tc]}{4\alpha \Delta tc}, \quad (12)$$

де r_i - відстань між гранню перетворювача та передньою гранню зразка.

У тому випадку, коли в акустичному полі присутній розподіл дискретних розсіювачів, ехо-сигнал, що приймається, є сумою окремих ехо-сигналів, тобто [28]

$$\overline{P}_s(\mathbf{r}_j; w) = \sum_{j=1}^{N} \overline{P}_s(\mathbf{r}_j; w) = P_0(w) \sum_{j=1}^{N} D^2\left(\mathbf{r}_j; w\right) \left[\frac{2\pi i \Phi_s(\mathbf{r}; w)}{k S_R}\right], \quad (13)$$

де $\Phi_s(\mathbf{r}; w) = \frac{1}{3} k^2 a_s^3 (\gamma_k - \gamma_\rho)$ - функція амплітуди зворотного розсіювання окремого розсіювача.

Коли розсіювачі розподілені випадковим чином, потужність розсіювання від області розсіювання може бути отримана з використанням тієї ж процедури, що і для розсіювання від неоднорідності. Для дискретних розсіювачів маємо

$$\gamma_{k\rho}(\mathbf{r}) = \begin{matrix} \gamma_k - \gamma_\rho , & \text{всередені розсіювача} \\ 0 , & \text{інакше} \end{matrix} . \quad (14)$$

Нехай n_0 - числова щільність розсіювачів, тоді для елементарного об'єму dV маємо $n_0 dV$ розсіювачів. Автокореляційну функцію $\gamma_{k\rho}(\mathbf{r})$ можна знайти з геометричних міркувань

$$\langle \gamma_{k\rho}(\mathbf{r}) \gamma_{k\rho}(\mathbf{r} + \boldsymbol{r}_\Delta) \rangle = \left(\frac{4}{3}\pi a_s^3\right) n_0 (\gamma_k - \gamma_\rho)^2 \times$$
$$\times \left(1 - \frac{3|r_\Delta|}{4a_s} + \frac{|r_\Delta|^3}{16 a_s^3}\right), \qquad 0 \le |r_\Delta| \le 2a_s$$
$$0, \qquad \text{інакше} , \quad (15)$$

де $\left(\frac{4}{3}\pi a_s^3\right) n_0$- об'ємна частка всіх дискретних розсіювачів.

Значенням автокореляційної функції при $|r_\Delta| = 0$ є середньоквадратичне значення контрасту стисливість-щільність. За умови $ka_s \ll 1$ коефіцієнт зворотного розсіювання структури з дискретно розподілених розсіювачів визначається виразом

$$\eta(w) = n_0 \sigma_d(w) , \quad (16)$$

де $\sigma_d(w) = |\Phi_s(\mathbf{r}; w)|^2$ - диференціальний поперечний переріз зворотного розсіювання кожного окремого розсіювача.

Рівняння (16) показує, що коефіцієнт зворотного розсіювання є середнім поперечним перерізом зворотного розсіювання на одиницю об'єму.

Параметри, що описують модель спектра Гауса зворотно розсіяного ультразвукового сигналу (амплітуда, центральна частота та ширина смуги пропускання), можуть бути використані для оцінки характеристик середовища. У роботі [30] робиться висновок, що два оціночні параметри: центральна частота і ширина смуги пропускання значною мірою постійні в залежності від конце-

нтрації твердої фази суспензії, але вони значно відрізняються для дрібно гранульованих (зразок №1) і велико гранульованих частинок, що входять до неї (зразок № 2). Це добре узгоджується з очікуванням, що спектральні властивості зворотного розсіювання змінюються залежно від середнього розміру частинок. На рис. 2 наведено двовимірний простір цих параметрів.

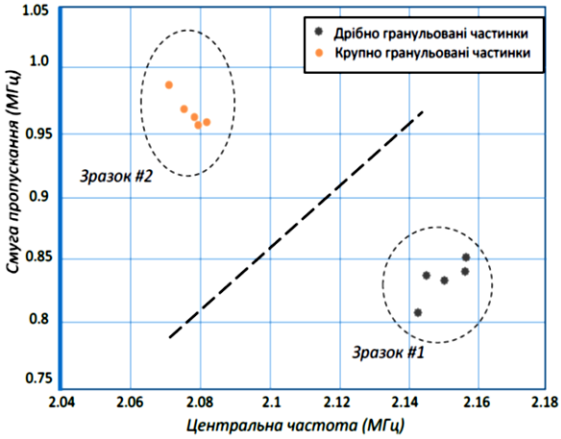

Рис. 2. Двовимірний простір параметрів (смуга пропускання по центральній частоті): кластеризація точок даних для двох зразків №1 та №2 відповідно

Точки даних на рис. 2 для різної концентрації утворюють окремі та такі, що не перекриваються, кластери для двох різних зразків. Відповідно, можна провести різницю між цими двома зразками, тобто два параметри дозволяють класифікувати фактично даний тип зразка. Інтенсивність $I = A^2$ зворотно розсіяних ультразвукових хвиль визначається за оціночною амплітудою A (отриманою з моделі спектра Гауса) у кожному окремому випадку. Пропонується оцінювати концентрацію частинок у суспензії за величиною виміряної інтенсивності, використовуючи ці результати як довідкові дані в процесі калібрування системи. Однак проблема полягає в тому, що фактично заданий тип суспензії (дрібно- або великорозмірні частинки) повинен бути ідентифікований заздалегідь, для того, щоб знати, яку з калібрувальних кривих слід використовувати.

У більш загальному випадку, досліджуване невідоме структурно неоднорідне середовище може бути охарактеризовано щодо розміру складових її частинок на основі центральної частоти і ширини смуги пропускання спектра розсіяного ехо-сигналу, а концентрація частинок може бути оцінена на основі виміряної його інтенсивності. У будь-якому випадку дані, отримані з використанням еталонних зразків, необхідні для калібрування вимірювальної системи для врахування фактичних передавальних характеристик ультразвукових перетворювачів, що використовуються.

Висновки та напрямки подальших досліджень. У практиці ультразвукових вимірювань застосовуються три основні підходи при аналізі сигналів, що приймаються. Методи, які реалізують ці підходи, застосовується як при моделюванні, так і для обробки отриманих експериментальних даних. Основна відмінність між ними полягає в тому, чи виконується аналіз сигналів у часовій або частотній області. У поєднанні ці методи можуть використовуватися для оцінки варіацій концентрації та розміру неоднорідностей у досліджуваному середовищі.

Існуючі моделі розсіювання ультразвуку дозволяють з інформації, що міститься в спектральній характеристиці розсіяного сигналу, одержати числові параметри, що описують кількість розсіювачів та їхній просторовий розподіл, тобто. охарактеризувати структурні та текстурні особливості досліджуваних зразків.

Таким чином, параметри зворотного ультразвукового розсіювання доцільно використовувати для формування ідентифікаційних характеристик зразків залізної руди у процесі її видобутку та переробки.

Напрямом подальших досліджень слід вважати розробку комплексу програмно-технічних засобів ідентифікації мінералого-технологічних різновидів залізняку на основі результатів вимірювань характеристичних параметрів процесу поширення ультразвуку в гірських породах.

Список літератури

1. **Keith A. Wear, Timothy A. Stiles, Gary R. Frank, Ernest L.** Madsen ...+11 more authors. Interlaboratory comparison of ultrasonic backscatter coefficient measurements from 2 to 9 MHz. - 2005 - Journal of Ultrasound in Medicine. DOI:10.7863/JUM.2005.24.9.1235.

2. **Morkun V., Morkun N., Pikilniak A.** The Propagation of Ultrasonic Waves in Gas-containing Suspensions. Cambridge Scholars Publishingю - 2019, 130 p.

3. **Morkun, V., Fischerauer, G., Morkun, N., Tron, V., Haponenko, A.** Determining Rock Varieties on The Basis of Fuzzy Clustering of Ultrasonic Measurement Results. (2022). CEUR Workshop Proceedings. 3156, с. 274-283.

4. **Noushin Jafarpisheh, Ivan M. Rosado-Mendez Timothy J.** Hall Hassan Rivaz. Estimation of the Scatterer Size Distributions in Quantitative Ultrasound Using Constrained Optimization. https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.09900.

5. **M. F. Insana and T. J. Hall,** "Characterising the microstructure of random media using ultrasound," *Phys. Med. Biol.*, vol. 35, no. 10, p. 1373, 1990.

6. **M. F. Insana, R. F. Wagner, D. G. Brown, and T. J. Hall**, "Describing small-scale structure in random media using pulse-echo ultrasound," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, no. 1, pp. 179–192, 1990.

7. *Y. Zhu, A. Han, W. D. O'Brien Jr, M. L. Oelze, and M. F. Insana*, "Limitations on estimation of effective scatterer diameters," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 142, no. 6, pp. 3677–3690, 2017.

8. **A. Gerig, J. Zagzebski, and T. Varghese**, "Statistics of ultrasonic scatterer size estimation with a reference phantom," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, no. 6, pp. 3430–3437, 2003.

9. R. Lavarello and M. Oelze, "Quantitative ultrasound estimates from populations of scatterers with continuous size distributions: Effects of the size estimator algorithm," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, no. 9, pp. 2066–2076, 2012.

10. **R. J. Lavarello and M. L. Oelze**, "Assessment of the effects of scatterer size distributions on effective scatterer diameter estimates," in *2010 IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2010, pp. 732–735.

11**. R. Lavarello and M. Oelze**, "Quantitative ultrasound estimates from populations of scatterers with continuous size distributions," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 58, no. 4, pp. 744–753, 2011.

12. **E. P. Nordberg and T. J. Hall**, "Effective scatterer diameter estimates for broad scatterer size distributions," *Ultrason. Imaging*, vol. 37, no. 1, pp. 3–21, 2015.

13. **R. K. Saha and M. C. Kolios**, "Effects of cell spatial organization and size distribution on ultrasound backscattering," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 58, no. 10, pp. 2118–2131, 2011.

14. **D. Savéry and G. Cloutier**, "Effect of red cell clustering and anisotropy on ultrasound blood backscatter: A Monte Carlo study," *ieee Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 52, no. 1, pp. 94–103, 2005.

15. **I. Fontaine, D. Savery, and G. Cloutier**, "Simulation of ultrasound backscattering by red cell aggregates: Effect of shear rate and anisotropy," *Biophys. J.*, vol. 82, no. 4, pp. 1696–1710, 2002.

16. **M. F. Insana and T. J. Hall**, "Parametric ultrasound imaging from backscatter coefficient measurements: image formation and interpretation," *Ultrason. Imaging*, vol. 12, no. 4, pp. 245–267, 1990.

17. **E. L. Madsen**, in Ultrasonic scattering in biological tissues, edited by K. K. Shung and G.A. Thieme (CRC press, Boca Raton, FL, 1993), pp. 206–248.

18. **Eno Hysi, Muhannad N.Fadhel, Michael J.Moore, JasonZalev, Eric M.Strohm, Michael C.Kolios**. Insights into photoacoustic speckle and applications in tumor characterization. - Photoacoustics,Volume 14, June 2019, Pages 37-48.

19. **Shankar P.M.** A general statistical model for ultrasonic backscattering from tissues. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2000;47(3):727–736.

20. **Foster D.R., Arditi M., Foster F.S., Patterson M.S., Hunt J.W**. Computer simulations of speckle in B-Scan images. *Ultrason. Imaging.* 1983;5(October (4)):308–330.

21. **Diebold G.J., Khan M.I., Park S.M.** Photoacoustic 'signatures' of particulate matter: optical production of acoustic monopole radiation. *Science.* 1990;250(October (4977)):101–104.

22. **Lizzi F.L., Ostromogilsky M., Feleppa E.J., Rorke M.C., Yaremko M.M**. Relationship of ultrasonic spectral parameters to features of tissue microstructure. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 1987;34 (May (3)):319–329.

23. **Wear K.A., Wagner R.F., Insana M.F., Hall T.J.** Application of autoregressive spectral analysis to cepstral estimation of mean scatterer spacing. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 1993;40(January (1)):50–58.

24. The measurement of backscatter coefficient from a broadband pulse-echo system: A new formulation. - Article *in* IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control · April 1997. DOI: 10.1109/58.585136 · Source: IEEE Xplore

25. **L. X. Yao, J. A. Zagzebski, and E. L. Madsen**, Ultrasonic Imaging 12, 58–70 (1990).

26. **James A. Zagzebski1, Ivan M. Rosado-Mendez1, Haidy Gerges Nasief, Timothy J. Hall**. Quantitative ultrasound: Enhancing diagnosis using estimates of acoustic attenuation and backscatter. - Cite as: AIP Conference Proceedings 1747, 050001 (2016); https://doi.org/10.1063/1.4954108

27. **R.A. Sigelman, J.M. Reid**, "Analysis and measurement of ultrasound backscattering from an ensemble of scatterers excited by sine-wave bursts", J. Acoust. Soc. Am. 53, 1351- 1355(1973)

28. **X. Chen, D. Phillips, K.Schwarz and al**," The measurement of backscatter coefficient from a broadband pulse-echo system: A new formulation", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 44, 515-525.(1997).

29. **N. Houhat and T. Boutkedjirt**. Frequency and concentration dependence of the ultrasonic backscatter coefficient in a soft tissue mimicking material. - Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference. - 23-27 April 2012, Nantes, France. 238-242 p.

30. **Michael Vogt, Michael Deilmann**. Parametric Spectrum Analysis of Backscattered Ultrasound Signals for the Characterization of Particles in Suspensions. - GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019.
DOI 10.5162/sensoren2019/5.3.3