

10. Пігулевський П.И. О современной активизации докембрийских глубинных разломов Украинского щита // 36. наук. пр. НГУ. Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". Дніпропетровськ. – 2015. № 46. – С. 38-44.
11. Пігулевський П.Г., Свистун В.К. Геофізичні дослідження процесів підтоплення в промисловому Кривбасі. Харків. ФОП Мезіна В.В., 2018. – 210 с.
12. Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 1. Фізико-геологічні передумови досліджень/Geoinformatika. – 2016. – № 3 (59). – С.69-75.
13. Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 2. Результати застосування геоелектричних методів при обмеженні ділянок підтоплення / Geoinformatika. – 2016. – № 4 (60). – С. 62-74.
14. Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 3. Результати застосування геоелектричних методів при вирішенні інженерно-геологічних задач/Geoінформатика. – 2017. – №2 (62). – С. 55-63.
15. Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану Південно-Західного Кривбасу. Частина 4. Використання потенціальних полів при вивченні сучасної тектоніки // Геоінформатика. – 2017. – №3 (63). – С. 48-55.
16. Pihulevskiy P.G., Anisimova, L.B., Kalinichenko, O.O., Panteleeva, N.B., Hanchuk, O.V. [2021]. Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. Journal of Physics: Conference Series. 2021 | conference-paper. p. 12. <https://doi.org/10.1088/1742-96/1840/1/012018>.
17. Svistun V. and Pigulevskiy P. (2021). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine "Dnirogeofizika" during 2000–2011 carried out works on collection, analysis and formation of an electronic gravimetric data base (GDB) of the territory of Ukraine. Based on the results of the work car. 20th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, 11-13 May 2021. Volume 2021, 1 – 7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521132>.

Рукопис подано до редакції 15.05.2023

УДК 622.7: 534

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет
Н.В. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Львівський національний університет ім. Івана Франка
А.А. ГАПОНЕНКО, Є.Ю. БОБРОВ, аспіранти, Криворізький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Метою дослідження є дослідження та обґрунтування і застосування ультразвукових вимірювань для визначення нелінійних характеристик гірської породи.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного та імітаційного моделювання, а також методи швидкого перетворення Фур'є для аналізу результатів ультразвукових вимірювань.

Наукова новизна полягає у теоретичному обґрунтуванні та моделюванні методів нелінійних ультразвукових вимірювань для оцінки характеристик гетерогенних середовищ.

Практичне значення полягає в обґрунтуванні застосування нелінійних ультразвукових вимірювань для визначення структурно-текстурних особливостей гірської породи.

Результати. Взаємодія акустичного сигналу з речовиною називається «лінійною», якщо відгук матеріалу та сила вихідного сигналу змінюються лінійно залежно від сили вхідного сигналу, як у законі Гука. Більшість відомих акустичних явищ пов'язані з лінійно-пружними характеристиками матеріалу. Однак у матеріалах з деякими специфічними властивостями з'являється ряд нових «нелінійних ефектів», таких як спотворення форми акустичних хвиль через амплітудно-залежну швидкість поширення хвилі, генерація вищих гармонік, формування сумарної та різницевої частоти для кількох вхідних сигналів, акустичне перетікання, самофокусування тощо. Гірська порода, зокрема залізорудна сировина, є гетерогенним середовищем, яка має специфічні структурно-текстурні особливості та включає фазові неоднорідності типу тріщин і пір. Запропоновано метод оцінки фазової неоднорідності гірської породи, заснований на визначенні функції відображення нелінійної залежності поширення в ній акустичного сигналу, що включає формування ультразвукових синусоїдальних імпульсів фіксованої частоти, але різної амплітуди, випромінювання їх в досліджуване середовище, спектральний аналіз та обчислення функції відображення нелінійної залежності, що враховує різницю огинають прийнятих імпульсів різної амплітуди, їх гармонійне та повне спотворення, що дозволяє визначити рівень додаткового нелінійного ослаблення основної частотної складової прийнятого сигналу, який не залежить від коефіцієнта посилення підсилювача, акустичного опору середовища, характеристик розсіювання, дифракційних ефектів і визначається лише розподілом фазових неоднорідностей у гірській породі.

Ключові слова: ультразвук, вимірювання, нелінійність, моделювання, огинаюча імпульсу, спотворення.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Взаємодія акустичного сигналу з речовиною називається «лінійною», якщо відгук матеріалу та сила вихідного сигналу змінюються лінійно залежно від сили вхідного сигналу, як у законі Гука. Більшість відомих акустичних явищ пов'язані з лінійно-пружними властивостями матеріалу. Однак для матеріалів з деякими специфічними властивостями з'являється ряд нових «нелінійних ефектів», таких як спотворення форми акустичних хвиль через амплітудно-залежну швидкість поширення хвилі, генерація вищих гармонік, формування сумарної та різницевої частоти для кількох вхідних сигналів, акустичне перетікання, самофокусування тощо [1]. Вони все частіше використовуються для неруйнівної характеристики матеріалів та виявлення пошкоджень у промислових виробках. Нарешті, питання, які стосуються застосування нелінійних вимірювань у гірничий галузі потребують подальших досліджень.

Аналіз досліджень і публікацій. Нелінійні властивості завжди тісно пов'язані з кількістю та специфічним характером дефектів у матеріалах [2]. Доведено, що нелінійні акустичні методи є корисними для вимірювання міцності зчеплення в шаруватих структурах [3], неруйнівного виявлення пошкоджених дефектів у кристалах [4], кераміці [5], вугільних електродах [6] і бетонних конструкціях [7], а також втомних тріщин в металах, таких як сталі, титанові та алюмінієві сплави [8]. Деякі дефекти матеріалів, такі як внутрішні напруги, мікротомні тріщини та об'ємні розриви, як правило, є передвісниками основного розтріскування та подальшого руйнування матеріалу. Однак звичайні лінійні акустичні характеристики, такі як швидкість звуку, коефіцієнти загасання, пропускання та відбиття, виявилися нечутливими до цих неоднорідностей матеріалів. У літературі нещодавно були запропоновані нелінійні акустичні методи для виявлення такого роду дефектів у матеріалах [1,9].

При поширенні звукових хвиль високої інтенсивності виникають нелінійні ефекти, що призводять до прогресивного спотворення профілів і спектрів хвиль при їх розповсюдженні у нелінійному середовищі. Розрахунок величини спотворення результатів вимірювання акустичних параметрів, викликаного нелінійним характером поширення хвилі в середовищі, відкриває можливість для визначення величини B/A , що представляє собою відношення коефіцієнтів, які стоять при першому та другому ступенях розкладання акустичного тиску в ряд за малим об'ємним стисненням [10]. Ця величина отримала назву нелінійний акустичний параметр середовища. Даний параметр досить чутливий до зміни стану середовища та його структури.

У роботі [11] пропонується метод визначення локальної оцінки коефіцієнта нелінійності β . Метод заснований на одновимірному розв'язанні нелінійного рівняння Вестерфельта з втратами, що дозволяє отримати локальний зв'язок між β та полем хвилі тиску. На основі кількох припущень представлений підхід, заснований на співвідношенні між гармонійним і фундаментальним полями, який дозволяє зменшити вплив просторових амплітудних варіацій спекл-паттерна. Розроблений алгоритм здатний оцінити коефіцієнт нелінійності різних типів матеріалів, що цікавлять, а для його реалізації не потрібно спеціальної вимірювальної установки або перетворювача.

Для швидкої оцінки параметрів ультразвукового імпульсу розроблено метод, заснований на квазілінійному наближенні [12]. Цей метод безпосередньо обчислює поперечний профіль імпульсу при будь-якій геометрії вимірювань. Обчислювальний алгоритм обробляє три просторові виміри. Порівняння форм імпульсів, поперечних та аксіальних профілів, отриманих цим методом та іншими сучасними програмно-технічними засобами, показує задовільний збіг.

Постановка завдання. Використання ультразвукових методів для вимірювання характеристик гірських порід за наявності в них фазових неоднорідностей типу тріщин і пір стикається з низкою труднощів, обумовлених тим, що в цьому випадку процес поширення ультразвуку набуває істотно нелінійного характеру. У цьому випадку фундаментальне припущення, що конститутивна поведінка досліджуваного матеріалу є лінійно-пружною, що обґрунтовує можливість застосування лінійних вимірювань, є несправедливим [13]. Більшість гірських порід не є лінійно еластичними навіть до утворення тріщин. Що ще важливіше, нелінійна еластичність гірських порід значно збільшується за наявності тріщин і пір. У зв'язку з цим виникає проблема врахування наявності фазових неоднорідностей у гірській породі на результати ультразвукових вимірювань їх нелінійних характеристик.

Викладення матеріалу і результати. Міжзернові пори та тріщини в гірській породі спільно утворюють повну або загальну пористість [14]

$$m = m_{ig} + m_{fr}, \quad (1)$$

де m - загальна пористість; m_{ig} - міжзернова або міжгранулярна пористість; m_{fr} - тріщинна пористість.

У роботі [15] для характеристики загального впливу всіх меж розділу фазових неоднорідностей на параметри поздовжньої акустичної хвилі в горі породі пропонується використовувати нормовану швидкість $\bar{V}_p$

$$\bar{V}_p = 100 \frac{V_p}{V_{pm}}, \quad (2)$$

де V_p - швидкість поздовжніх хвиль у зразку гірської породи; V_{pm} - швидкість у твердій матриці гірської породи, в якій відсутня міжзернова пористість та тріщини.

У роботі [15] показано, що для гірських порід із міжзерновою пористістю залежність нормованої швидкості від пористості має вигляд

$$\bar{V}_p = 100 - 1.6m_{ig}, \quad (3)$$

а для тріщинуватих порід визначається виразом

$$\bar{V}_p = 100 - 22m_{fr}, \quad (4)$$

При одночасній наявності міжзернових пор та тріщин вираз для нормованої швидкості має вигляд

$$\bar{V}_p = 100 - 1.6m_{ig} - 22m_{fr}. \quad (5)$$

Враховуючи, що загальна пористість складається з цих двох компонент (1), з формули (5) було отримано вираз [16] для розрахунку величини тріщинної пористості з використанням залежності нормованої швидкості від загальної пористості

$$m_{fr} = \left(100 - 1.6m - 100 \times \frac{V_p}{V_{pm}} \right) / 20.4. \quad (6)$$

З виразів (3)-(6) можна зробити висновок, що швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль мають суттєву залежність від наявності тріщин та пір у гірських породах. Разом з тим, на процес розповсюдження поздовжніх ультразвукових хвиль впливає багато інших факторів, тому використання для визначення характеристик гірської породи тільки одного цього параметру, а саме швидкості їх поширення, може привести до отримання неоднозначних оцінок.

При розповсюдженні акустичних хвиль у нелінійно-пружному твердому тілі відбувається їхнє спотворення. Визначальне співвідношення може бути задано усіченим розкладанням у ряд Тейлора по градієнту зміщення (одномірний випадок, тобто тільки одна компонента зміщення відмінна від нуля) [17]

$$\sigma = E_0 u' + 0.5\beta E_0 [u']^2, \quad (7)$$

де σ і u - напруга та зміщення; E_0 і β - параметри лінійної пружності та нелінійності відповідно; $u' = \partial u / \partial x$ - градієнт зміщення.

Квадратичний член у рівнянні (7) викликає зменшення миттєвої жорсткості при розтягуванні та збільшення при стисканні. За відсутності об'ємних сил баланс лінійної кількості руху визначається виразом

$$\sigma' = \rho \ddot{u}, \quad (8)$$

де ρ - масова щільність; $\ddot{u} = \partial^2 u / \partial t^2$.

Підставляючи рівняння (7) до рівняння (8) та з урахуванням $c^2 = E_0 / \rho$, нелінійне хвильове рівняння набуває вигляду [17]

$$\ddot{u} = c^2 u'' = \beta c^2 A_1^2 x [1 - \cos 2(kx - wt)], \quad (9)$$

Вирішення цього рівняння відносно хвиль, що поширюються в напрямку x , має такий вигляд [17]

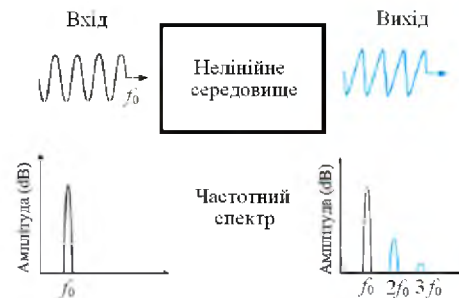
$$u(x, t) = A_1 \cos(kx - wt) + \frac{1}{8} \beta k^2 A_1^2 x [1 - \cos 2(kx - wt)], \quad (10)$$

де A_1 , k та w амплітуда, хвильове число і кутова частота хвиль.

Фізичний аспект цього рішення полягає у тому, що безперервні первинні хвилі (u_1) генерують квазістатичний імпульс величини $\frac{1}{8}\beta k^2 A_1^2 x$ та другу гармоніку (на частоті 2ω), що має кумулятивну амплітуду $\frac{1}{8}\beta k^2 A_1^2 x$. Оскільки другі гармоніки мають хвильове число $2k$, вони поширюються з тією ж швидкістю, що й первинні хвилі, тобто $c = \omega/k = 2\omega/2k$. Якщо ряд Тейлора у рівнянні (7) не був би обрізаним на порядку 2, то гармоніки порядку 3 і вище також існували б у розв'язанні.

Рис. 1 ілюструє, що при розповсюдженні ультразвукових хвиль середовище діє як нелінійний оператор, і через самовзаємодію вхідний сигнал спотворюється. Перетворюючи часовий сигнал у частотну область за допомогою перетворення Фур'є або швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), можна отримати вищі гармоніки на цілих кратних вхідній частоті f_0 (де $\omega = 2\pi f$).

Рис. 1. Середовище, як нелінійний перетворювач синусоїдальних хвиль на частоті f_0 .



Розглянемо рух синусоїдального хвильового пакета, що має кінцеву тривалість у середовищі з дисперсією у вигляді суперпозиції гармонійних функцій [18].

Введемо позначення

$$u(x, 0) = f(x). \quad (11)$$

Представимо початкове збурення у вигляді

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k) e^{ikx} dk, \quad (12)$$

де

$$A(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-ikx} dx. \quad (13)$$

З урахуванням (11) $u(x, t)$ буде мати наступний вигляд

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k) e^{i(kx - \omega(k)t)} dt. \quad (14)$$

Таким чином, функція $u(x, t)$ є суперпозицією гармонійних хвиль, що утворюють початкове збурення та поширюються у середовищі.

У процесі моделювання реалізація обчислень інтегралів (12)-(14) проводиться на інтервалах кінцевої тривалості, тобто виконується розкладання функції не в інтеграл, а в ряд Фур'є. У цьому випадку початковий імпульс описується виразом [19]

$$f(x) = \sum_{n=0}^{N-1} A(n) e^{iknx}, \quad (15)$$

де $k = \frac{2\pi}{x_{max} - x_{min}}$.

$$A(n) = \frac{1}{x_{max} - x_{min}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) e^{-iknx} dx, \quad (16)$$

де $n = 0, 1, \dots, N - 1$.

Відповідно отримаємо

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^N A(n) e^{i(kn(x - x_{min}) - \omega(kn)t)}, \quad (17)$$

де N – кількість значень функції $f(x)$.

На рис. 2а наведені уявна та дійсна частини початкового збурення, а на рис. 2б - трансформація огинаючої хвильового пакета при поширенні його в дисперсійному середовищі у моменти часу $t_0 = 0$, $t_1 = 100$, $t_2 = 200$ ($\times 10^{-5} c$).

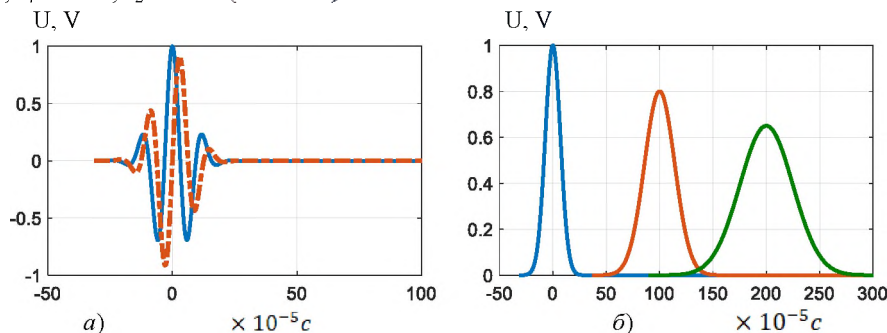


Рис. 2. а - уявна та дійсна частини початкового збурення; б - трансформація огинаючої хвильового пакета при поширенні його в дисперсійному середовищі

При поширенні змінюється форма хвильового пакета, відбувається зменшення висоти огинаючої пакета при одночасному збільшенні його ширини, тобто відбувається розпливання хвильового пакета у просторі.

Зміна форми хвильового пакета відбувається відповідно до закону збереження енергії [19]

$$\sum_{n=0}^N u(t_n, x_n)^2 = \text{const}. \quad (18)$$

Просторове моделювання ультразвукового поля у випадково неоднорідному гетерогенному середовищі виконано за допомогою програмного середовища Matlab та методу узагальненого кутового спектру (GASM), реалізованого у пакеті CREANUIS [20]. Цей метод обчислює 4-мірну (3-D та t) еволюцію основної та другої гармонік для будь-яких 2-мірних джерел (матричного перетворювача) з можливою неоднорідністю коефіцієнта нелінійності. Розглянуто модель, коли матричний перетворювач випромінює ультразвуковий пучок, що збуджується імпульсом збудження $Ax(t)$ від генератора сигналів. Після лінійного та нелінійного поширення прийнятий сигнал посилюється підсилювачем і детектується його огинаюча. На рис. 3 наведена технологія формування діаграми спрямованості ультразвукового матричного перетворювача у режимі ехолокації [21].

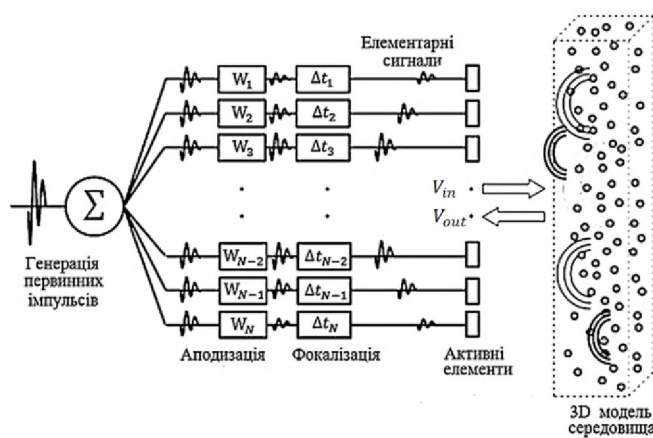


Рис. 3. Технологія формування діаграми спрямованості ультразвукового матричного перетворювача у режимі ехолокації: W_i – вагові коефіцієнти аподизації на i -му елементі; Δt_i – часові затримки, що використовуються при динамічному фокусуванні на i -й лінії

Для заданої геометрії моделювання спочатку проводиться розрахунок нелінійного УЗ-поля на основній частоті та частоті другої гармоніки. Потім розраховуються нелінійні сигнали з урахуванням основної складової та другої гармоніки тиску, що впливає на кожен розсіювач, з урахуванням просторово-

варіантної функції розсіювання точки (PSF) та коефіцієнта нелінійності.

Технологія формування ультразвукового променя (фокусування, віконна обробка та аподизація) реалізується під час моделювання. Основна (p_1) та друга гармоніка (p_2) складові хвилі тиску визначаються як

$$p_1(x, y, z, t) = F^{-1}(P_0(k_x, k_y, z_0, k_t) e^{-iK(z-z_0)}), \quad (19)$$

$$p_2(x, y, z, t) = F^{-1}\left(\frac{-ik_t^2}{2K\rho_0 c_0^2} \left(\int_{z_0}^z F(\beta(x, y, z) p_1^2(x, y, z, t) e^{iKu} du)\right) e^{-iK(z-z_0)}\right), \quad (20)$$

де x, y, z – просторові змінні; t – часова змінна; z_0 – вихідне положення зонду; β – коефіцієнт нелінійності; ρ_0 – щільність; c_0 – швидкість акустичних хвиль; F та F^{-1} – 2D-FT перетворення Фур'є і зворотне перетворення Фур'є у вимірах x, y та t ; k_x, k_y, k_t – хвильове число у вимірах x, y та t ; P_0 – перетворення Фур'є вихідної хвилі у вихідному положенні z_0 .

Комплексне тривимірне хвильове число K визначається виразом

$$K(k_x, k_y, k_t) = \sqrt{k_t^2 - k_x^2 - k_y^2} - i\alpha(f), \quad (21)$$

де $\alpha(f)$ – згасання у середовищі.

Модель загасання GASM враховує частотно-залежне згасання у середовищі відповідно до формули

$$\alpha(f) = \alpha_0 \left(\frac{f}{10^6}\right)^\gamma, \quad (22)$$

де f – частота сформованого сигналу (Гц); α_0 – постійна згасання середовища ($\text{Np} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MHz}^{-\gamma}$); γ – число від 1 до 2 для середовища, що моделюється.

На рис. 4 наведено результати просторового моделювання ультразвукового поля матричного перетворювача.

Розглянемо метод кількісної оцінки нелінійності досліджуваного середовища стосовно процесу розповсюдження в ньому ультразвукового сигналу.

Вихідний сигнал матричного перетворювача (рис. 3) можна розрахувати за інтегралом ультразвукового поля на приймальній апертурі. Основна складова вихідного сигналу може бути визначена як [22]

$$V_{out} = G_1 V_{in} \operatorname{sech} \left(e^{-\alpha_1 z} C V_{in} \frac{\beta k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0} \right), \quad (23)$$

де $\beta = (1 + B/2A)$ - нелінійний параметр; α_1 - коефіцієнт загасання; ρ_0 - щільність; k_1 - хвильове число; z_0 - координата точки вимірювань; C - постійна, що визначає ефективність перетворювача (вимірюється експериментально); G_1 - фундаментальний дифракційний член [23]; V_{in} - напруга імпульсу збудження, яку можна представити у наступному вигляді

$$V_{in} = A x(t), \quad (24)$$

де A - пікова напруга імпульсу збудження; $x(t)$ - синусоїдальне збудження.

Рис. 4. Результати моделювання ультразвукового поля матричного перетворювача

Огинаюча прийнятого сигналу після посилення та квадратурної демодуляції запишеться як

$$H(t) = N G_1 A x(t) \operatorname{sech} \left(e^{-\alpha_1 z} C A x(t) \frac{\beta k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0} \right), \quad (25)$$

де N - коефіцієнт посилення системи.

З цього виразу випливає, що на огинаючу прийнятого сигналу впливають багато факторів: коефіцієнт посилення підсилювача, параметри вихідного імпульсу, додаткове згасання через нелінійні ефекти в середовищі і т.д. На рис. 5 наведено результати моделювання впливу на огинаючу ультразвукову сигналу змін нелінійних параметрів середовища та шумів у вимірювальному каналі.

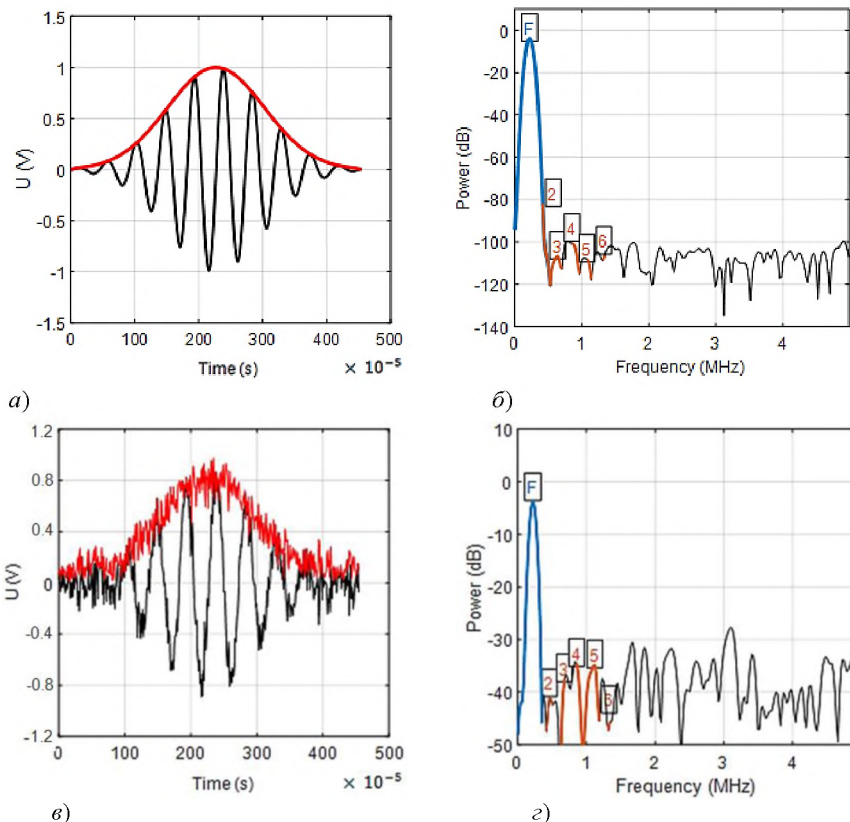
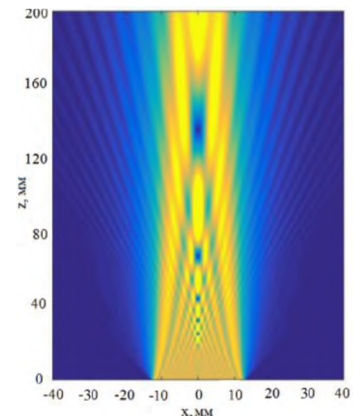


Рис. 5. Результати моделювання впливу на огинаючу ультразвукового сигналу змін нелінійних параметрів середовища та шумів у вимірювальному каналі: а, б - початковий імпульс та його спектральна характеристика; в, г - спотворений нелінійним середовищем імпульс та його спектральна характеристика

Розглянемо метод визначення нелінійної функції розповсюдження акустичного сигналу, заснований на формуванні та поширенні у досліджуваному середовищі ультразвукових синусоїдальних імпульсів з різною піковою напругою збудження.

Інформацію про нелінійне середовище можна вивести з різниці між огинаючими прийнятих сигналів, що пройшли відповідну відстань у середовищі, та у порівнянні специфікацій, які визначають їх гармонічне та повне спотворення.

Передбачається, що імпульси збудження, що генеруються, з піковими напругами A_1 та A_2 , визначається виразами

$$V_{in1} = A_1 x(t), \quad (26)$$

$$V_{in2} = A_2 x(t). \quad (27)$$

Відповідно до рівняння (25) огинаючі двох прийнятих сигналів дорівнюють H_1 і H_2 . Коефіцієнти посилення підсилювача сигналу вимірювальної системи налаштовуються таким чином, щоб виконувалось рівняння

$$N_1 A_1 = N_2 A_2, \quad (28)$$

де N_1 і N_2 - коефіцієнти посилення підсилювача; A_1 і A_2 , - пікові напруги імпульсів збудження.

В якості характеристичної функції, яка відображає нелінійні особливості досліджуваного середовища використовується наступна різниця [22]

$$L(t) = I_2(t) - I_1(t) = D \ln(H_2(t)) - D \ln(H_1(t)), \quad (29)$$

$$H_1(t) = N_1 G_1 A_1 x(t) \operatorname{sech} \left(e^{-\alpha_1 z} C A_1 x(t) \frac{\beta k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0} \right), \quad (30)$$

$$H_2(t) = N_2 G_1 A_2 x(t) \operatorname{sech} \left(e^{-\alpha_1 z} C A_2 x(t) \frac{\beta k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0} \right). \quad (31)$$

де D - лінійний член, який вибирається з урахуванням бажаного динамічного діапазону вимірювань; G_1 - загальний коефіцієнт посилення системи.

З урахуванням (26)-(28) функція відображення $L(t)$ нелінійної залежності поширення ультразвукового сигналу має вигляд [22]

$$L(t) = D \ln(\cosh(Q \beta A_1) \operatorname{sech}(Q \beta A_2)), \quad (32)$$

$$\text{де} \quad Q = e^{-\alpha_1 z} C x(t) \frac{k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0}. \quad (33)$$

Рівняння (32) показує, що у разі відомих A_1 та A_2 функція $L(t)$ являє собою рівень додаткового нелінійного послаблення основної частотної складової через нелінійні ефекти. Крім того, з рівняння (32) видно, що коефіцієнт посилення підсилювача, акустичний опір середовища, характеристика розсіювання, дифракційні ефекти та інші фактори не мають відношення до результату. Отже, функція нелінійного відображення $L(t)$ залежить від наявності і виявляє розподіл нелінійного елемента в середовищі.

В процесі моделювання методу визначення нелінійної функції розповсюдження акустичного сигналу, заснованого на формуванні та поширенні у досліджуваному середовищі ультразвукових синусоїдальних імпульсів з різною піковою напругою збудження визначалась залежність нелінійного параметру β , тобто значення функції нелінійного відображення $L(t)$, від пікових напруг сигналів збудження A_1 та A_2 . Встановлено, що при зміні пікових амплітуд сигналів збудження частотою 220 кГц у діапазоні 100-600 В і співвідношення A_1/A_2 в діапазоні 15,6 дБ значення $L(t)$ змінювались з 1,352 до 3,784.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Останнім часом ультразвукові вимірювання нелінійних параметрів привертають значну увагу з метою оцінки характеристик досліджуваного середовища. При поширенні ультразвукової хвилі нелінійні ефекти призводять до спотворення форми хвилі, генерації гармонік та додаткового згасання. Запропоновано метод оцінки фазової неоднорідності гірської породи, заснований на визначенні функції відображення нелінійної залежності поширення в ній акустичного сигналу, що включає формування ультразвукових синусоїдальних імпульсів фіксованої частоти, але різної амплітуди, випромінювання їх у досліджуване середовище, спектральний аналіз та обчислення функції відображення нелінійної залежності, що враховує різницю огинаючих прийнятих імпульсів різної амплітуди, їх гармонічне та повне спотворення, що дозволяє визначити рівень додаткового нелінійного ослаблення основної частотної складової прийнятого сигналу, який не залежить від коефіцієнта посилення підсилювача, акустичного опору середовища, характеристик розсіювання, дифрак-

ційних ефектів і визначається лише наявністю та розподілом фазових неоднорідностей у гірській породі.

Напрямок подальших досліджень є кількісна оцінка функції відображення нелінійної залежності поширення ультразвукового сигналу у гірській породі, зокрема залізорудній сировині, з різними мінералогічними ознаками.

Список літератури

1. **Yongping Zheng, Roman Gr. Maev, Igor Yu. Solodov.** Nonlinear acoustic applications for material characterization: A review. - Can. J. Phys. 77: 927-967 (1999).
2. **J.H. Cantrell and W.T. Yost.** J. Appl. Phys. 81, 2957 (1997).
3. **S.U. Fassbender, M. Kroening, W. Arnold.** Mater. Sci. Forum, (Part 2, Nondestructive characterization of materials VII), 210, 783 (1996).
4. **I.Yu. Solodov.** Ultrasonics, 36, 383 (1998).
5. **A.M. Sutin and V.E. Nazarov.** Radiophys. Quantum Electron. 38, 109 (1995).
6. **A.M. Sutin, C. Delclos, and M. Lenclud.** In Proc. 2nd Int. Symp. on Acoustic and Vibration Surveillance Methods and Diagnostic Techniques. Senlis, France. 1995. p. 725.
7. **L.K. Zarembo, V.A. Krasil'nikov, and I.E. Shkol'nik.** Soviet J. Nondestructive Testing. 25, 706 (1990).
8. **J.K. Na, W.T. Yost, and J.H. Cantrell.** In Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 12B. Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti. Plenum Press, New York. 1993. p. 2075.
9. **K.E.A. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J.A. TenCate, and P.A. Johnson.** In Proc. 2nd. Int. Conf. Emerging Technologies in NDT. Athens, 1999.
10. **Галанін В.В., Адишпрін-Заде К.А.** Визначення нелінійного параметру В/А біологічних рідин на основі спектрального аналізу інтенсивних ультразвукових хвиль. - Вісник нових медичинських технологій, том 26, 2, 2019, 107-110 с. DOI: [10.24411/1609-2163-2019-16333](https://doi.org/10.24411/1609-2163-2019-16333).
11. **Sloun RV, Demi L, Shan C, et al.** Ultrasound coefficient of nonlinearity imaging. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Control. 2015;62:1331-1341.
12. **Pieur F, Johansen TF, Holm S, et al.** Fast simulation of second harmonic ultrasound field using a quasi-linear method. J Acoust Soc Am. 2012;131:4365-4375.
13. **M. L. Wang, J. P. Lynch, and H. Sohn.** Sensor Technologies for Civil Infrastructures. – Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 80 High Street, Sawston, Cambridge.
14. **В.С. Жуков, Ю.О. Кузьмін.** Експериментальні дослідження впливу тріщинуватості гірських порід та модельних матеріалів на швидкість поширення поздовжньої хвилі. - Фізика землі, 2020 № 4, С. 39-50.
15. **Туранк К., Фурментро Д., Денні А.** Поширення хвиль і межі розділу в породах. Механіка гірських порід стосовно проблем розвідки та видобутку нафти. Переклад з англ. та фр. / За ред. В. Морі, Д. Фурментро. - Мир. 1994. С. 176-184.
16. **Жуков В.С.** Оцінка тріщинуватості колекторів за швидкістю поширення пружних хвиль. - 2012. С. 148-152.
17. **Cliff J. Lissenden.** Nonlinear ultrasonic guided waves. Principles for nondestructive evaluation. Journal of Applied Physics 129, 021101 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0038340>.
18. **Фарлю С.** Рівняння з частковими похідними для науковців та інженерів. - Мир, 1985.
19. **Поршнев С. В.** Комп'ютерне моделювання фізичних процесів у пакеті MATLAB. - Видавництво «Лань», 2011. - 736 с.
20. **F. Varray, O. Basset, P. Tortoli, C. Cachard.** CREANUIS: A Nonlinear Radio Frequency Ultrasound Image Simulator. - Ultrasound in Medicine and Biology, vol. 39, no. 10, pp. 1915-1924, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2013.04.005>.
21. **F. Varray, A. Ramalli, C. Cachard, P. Tortoli, O. Basset.** Fundamental and second-harmonic ultrasound field computation of inhomogeneous nonlinear medium with a generalized angular spectrum method. - IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 58, no. 7, pp. 1366-1376, 2011.
22. **Wuxuan Chen, Peng Wang, Zhihong Zhang, Xudong Deng, Congyao Zhang, Shenggen Ju** (2019) Nonlinear ultrasonic imaging in pulse-echo mode using Westervelt equation: a preliminary research, Computer Assisted Surgery, 24:sup2, 54-61.
DOI: 10.1080/24699322.2019.1649065/24699322.2019.1649065.
23. **Nikoonahad M, Liu DC.** Pulse-echo single frequency acoustic nonlinearity parameter (B/A) measurement. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Control. 1990;37: 127-134

Рукопис подано до редакції 15.05.2023