

## МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВІДКЛИКУ ВІД СТІНКИ МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ ІЗ ІЗОЛЯЦІЙНИМ ПОКРИТТЯМ МЕТОДОМ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ МАТРИЦЬ

---

**Анотація.** Запропоновано метод передавальних матриць для моделювання відклику акустичного коливання ультразвукового спектра від стінки трубопроводу, покритого ізоляційним покриттям. Визначено структуру елементів передавальних матриць. Враховано вплив неідеальних умов механічного збудження ультразвукової хвилі первинним перетворювачем. Здійснено порівняння результатів моделювання поширення ультразвукового коливання у трьох середовищах. Представлено результати моделювання у вигляді графіків.

**Ключові слова:** ультразвук, метод передавальних матриць, первинний перетворювач.

**Аннотация.** Предложен метод передаточных матриц для моделирования отклика акустического колебания ультразвукового спектра от стенки трубопровода, покрытого изоляционным покрытием. Определена структура элементов передаточных матриц. Учтено влияние неидеальных условий механического возбуждения ультразвуковой волны первичным преобразователем. Осуществлено сравнение результатов моделирования распространения ультразвукового колебания в трех средах. Представлены результаты моделирования в виде графиков.

**Ключевые слова:** ультразвук, метод передаточных матриц, первичный преобразователь.

**Abstract.** The transfer matrix method for modeling of acoustic vibration response of ultrasonic range from the pipeline wall covered by an insulating coating is proposed. The structure of transfer matrices elements is identified. The effect of non-ideal conditions of mechanical excitation of ultrasonic wave by transducer is taken into account. Comparison of modeling results of the ultrasonic vibrations propagation in three environments is carried out. The results of modelling are presented as diagrams.

**Keywords:** ultrasonics, the method of transfer matrices, the transducer.

### 1. Вступ

Моделювання ультразвукового відклику від металу стінки магістрального трубопроводу є важливою задачею для неруйнівного контролю товщини металу та наявності в ньому дефектів. В експлуатаційних умовах проводити ремонт ізоляційного покриття магістрального трубопроводу означає наражати поверхню металу стінки на деструктивний вплив зовнішнього середовища та збільшення ймовірності корозії. Тому існуючий підхід ультразвукового контролю металу стінок магістральних трубопроводів обмежується найбільш небезпечними місцями (технологічні коліна, місця деформації тощо), в яких знімається частково ізоляційне покриття. Такий контроль параметрів металу стінок трубопроводу не дає можливості отримати достатню кількість даних і, відповідно, не відображає повну інформацію про технічний стан трубопроводу. Складність застосування контролю металу стінок магістральних трубопроводів через ізоляційне покриття полягає у невизначеності відклику ультразвукового сигналу, на який впливає матеріал покриття та стан прилягання його до поверхні труби. Для моделювання відклику ультразвукового сигналу розглядатимемо стінку труби як багат шарову систему, де поширення ультразвукової хвилі через границі розділу цих шарів описуватимемо у вигляді передавальних матриць.

В основному метод передавальних матриць застосовується для аналізу хвильових пакетів сигналів відклику, що передаються із досліджуваної структури на ультразвуковий чи звуковий приймач через повітря [1–5]. Проте застосування передавальних матриць зосереджено в основному на дослідженні поширення акустичних коливань через повітря (плоска хвиля чи дифузне поле). Взаємодія акустичних коливань, що падають на поверхню

структури із пружного середовища, мало вивчена, і практично цей напрямок нерозкритий. Наприклад, науковець Філот дослідив вплив кінцевих розмірів досліджуваної структури на її механічне збурення із застосуванням підходу просторового вікна та передавальних матриць [6]. Проте в його дослідженні не було представлено результатів розрахунку чи перевірки достовірності запропонованої моделі. В деяких працях використано підхід передавальних матриць для дослідження характеристик дерев'яної підлоги, яку було представлено нескінченним багат шаровим ізотропним середовищем [7]. У даному дослідженні порівняно втрати акустичної енергії хвилі при взаємодії повітря або твердого середовища з досліджуваним об'єктом. Результатом проведеного дослідження є висновок про практичну однаковість взаємодії акустичної хвилі, що падає на значно демпфований матеріал із повітря чи з твердого середовища. Проте в публікації не було наведено числових результатів порівняння взаємодії досліджуваного об'єкта з двома видами середовищ, відсутній опис процесу проведення обчислення. В праці Р. Рхазі представлено порівняння трьох підходів моделювання віброакустичного відклику плоских систем від механічних навантажень [1]. Особливо детально розкрито застосування підходу моделювання плоскої хвилі, описаної методом передавальних матриць. Двома іншими методами моделювання механічного збурення є статистична енергія сигналу відклику та модальних коливань. У результаті моделювання було показано, що метод передавальних матриць у порівнянні із модальним є достатньо точним та невимогливім до обчислювальних ресурсів. Недоліком досліджень є те, що моделювання проводилось у низькому частотному діапазоні, тобто у звуковому спектрі, що суттєво відрізняється за обсягом обчислювальних ресурсів у порівнянні із застосуванням ультразвукового спектра. У праці Р. Рхазі не було розкрито структуру елементів передавальних матриць, що суттєво знижує прозорість проведених обчислень та розуміння властивостей моделі.

У запропонованій роботі представимо метод передавальних матриць для моделювання відклику акустичного коливання ультразвукового спектра від стінки трубопроводу, покритого ізоляційним покриттям. Для більш глибокого розуміння результатів моделювання та можливості повторюваності моделювання визначимо структури елементів передавальних матриць. Врахуємо вплив неідеальних умов механічного збудження ультразвукової хвилі первинним перетворювачем, для чого обчислимо форму коливань чутливого елемента та оцінимо їхню дію на структуру ультразвукової хвилі. Здійснимо порівняння результатів моделювання поширення ультразвукового коливання в трьох середовищах, що часто застосовуються в неруйнівному контролі: а) повітрі; б) воді; в) твердій гумі.

## 2. Математичний опис поширення ультразвукового збурення через багат шарове середовище

Розглянемо два випадки ультразвукового збурення: у першому випадку хвиля падає із повітря на поверхню ізоляційного покриття, у другому випадку хвиля збуджується в самому ізоляційному покритті. Приймемо, що механічне збурення та відклик від досліджуваної структури є гармонійним. Напрямок поширення хвилі є нормальним до поверхні стінки трубопроводу. У полі хвильових чисел  $(k_x, k_y)$  ультразвукове збурення  $f(x, y)$  може бути представлено як безкінечна кількість плоских хвиль з використанням просторового інтегрального перетворення Фур'є [1]:

$$\begin{cases} f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y) \exp[j(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y \\ F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[j(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y \end{cases}, \quad (1)$$

де  $x, y$  – Декартові координати.

Параметри поширення ультразвукового збурення будемо визначати через тиск хвилі  $P$  та швидкість її поширення  $V$ . Параметри хвилі на початку шару та на кінці поєднаємо за допомогою передавальних матриць [1]:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_o \\ V_o \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де індекс  $i$  позначає номер ультразвукової хвилі на поверхні труби, а  $o$  – на нижньому дні труби;  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{22}$  – коефіцієнти передавальної матриці, що описують поширення ультразвукової хвилі в багатошаровому середовищі.

Структура передавальної матриці у випадку аналізу стінки трубопроводу із дефектами, які можна представити як зміну суцільності стінки по товщині, має включати зміну фізико-механічних та геометричних параметрів пружного середовища стінки труби. Для цього застосуємо математичний опис поширення гармонійного коливання в середовищі із шаром, який представляє собою непружний матеріал. Передавальні матриці можна представити на основі праці [10] для опису поширення хвилі у стінці труби з дефектом, який моделюватиметься як окремих шар. Дефект у цьому випадку представлятиме собою тонкий обмежений шар, розміщений в середині пружного середовища. Такий підхід можна застосовувати, оскільки, згідно з нормативними положеннями, прийнятими в ультразвуковому неруйнівному контролі, розмір контрольованого дефекту повинен перевищувати довжину хвилі так, щоб вона не змогла огинати дефект, а відбивалась від нього. В цьому випадку передавальну матрицю представимо у вигляді

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{p,1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(k_{y,def} H) & j \frac{\omega \rho_{def}}{k_{y,def}} \sin(k_{y,def} H) \\ j \frac{\omega \rho_{def}}{k_{y,def}} \sin(k_{y,def} H) & \cos(k_{y,def} H) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & Z_{p,2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$Z_{p,i} = j\omega \cdot m \cdot \left( 1 - \frac{D_i k_x^4}{m\omega^2} \right), \quad m = \rho \cdot e, \quad D_i = \frac{E_i e_i^3 (1 + j\eta_{int,i})}{12(1 - \nu_i^2)}, \quad i = 1, 2,$$

де  $\omega$  – частота,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $Z_{p,1}$ ,  $Z_{p,2}$  – відповідно імпеданси верхньої та нижньої поверхонь досліджуваного об'єкта,  $\rho_{def}$  – густина ділянки з дефектом,  $k_{y,def}$  – хвильове число ультразвукової хвилі при проходженні ділянки стінки труби з дефектом,  $H$  – довжина дефектної ділянки в напрямку поширення хвилі,  $m$  – маса досліджуваного об'єкта одиничної довжини,  $e$  – одиничний вектор,  $D_i$  – жорсткість згину,  $\nu_i$  – коефіцієнт Пуассона,  $\eta_{int,i}$  – коефіцієнт демпфування.

Амплітуда тиску ультразвукової хвилі  $P_0$  може бути розкладена по осях декартової системи координат так [10]:

$$P_{in} = P_0 \exp(-jk_x x - jk_y y - jk_z z). \quad (4)$$

де  $P_{in}$  – амплітуда тиску падаючої на поверхню труби ультразвукової хвилі.

Необхідно відмітити, що в рівнянні (4) необхідно додати гармонійну складову поширення ультразвукової хвилі у вигляді  $\exp(j\omega t)$ , де  $t$  – час. Оскільки гармонійна складова є присутньою в усіх рівняннях, що описують поширення ультразвукової хвилі, її, як

правило, не додають у представлення рівнянь, проте цю гармонійну складову необхідно враховувати при проведенні обчислень.

Ультразвукову хвилю, що падає на досліджувану поверхню під кутом  $\phi$  до осі  $z$  та кутом  $\theta$  до осі  $y$ , можна представити через змінені значення хвильових чисел [10]:

$$k_x = \frac{\omega}{c_a \sin \theta \sin \phi}, \quad k_y = \frac{\omega}{c_a} \sin \theta, \quad k_z = \frac{\omega}{c_a} \sin \theta \sin \phi, \quad (5)$$

де  $c_a$  – швидкість поширення ультразвукової хвилі в шарі акустичного контакту.

Хвильове число ультразвукової хвилі при поширенні через ділянку стінки труби з дефектом  $k_{y,def}$  визначимо через теорему Піфагора для прямокутних трикутників так [10]:

$$k_{y,def} = \sqrt{k_{def}^2 - k_x^2}, \quad (6)$$

де  $k_{def}$  – хвильове число ультразвукової хвилі в середовищі дефекту.

Значення  $k_{def}$  можемо визначити із наперед відомих типів дефектів, що будуть контролюватись. Наприклад, для контролю наявності газових пор у зварних з'єднаннях хвильове число необхідно розраховувати для газового середовища:

$$k_{def} = 2\pi/\lambda_g, \quad (7)$$

де  $\lambda_g$  – довжина хвилі в газі.

Перехід від акустичного шару (рідини чи повітря) до пружного середовища можна визначити із таких співвідношень [10]:

$$\tau(\theta) = \left| \frac{P_{tr}}{P_{in}} \right|^2 = \left| \frac{1 + R}{T_{11} + T_{12}/Z_{ac}} \right|, \quad (8)$$

$$R = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{Z_{in} - Z_{ac}}{Z_{in} + Z_{ac}}, \quad Z_{in} = \frac{T_{11}Z_{ac} + T_{12}}{T_{21}Z_{ac} + T_{22}}, \quad Z_{ac} = \frac{\rho_a c_a}{\cos \theta},$$

де  $\tau(\theta)$  – функція передавання акустичної енергії через границю розділу двох середовищ,  $P_{tr}$ ,  $P_r$  – відповідно амплітуди тиску пройденої та відбитої від границі розділу середовищ ультразвукової хвилі,  $\rho_a$  – густина акустичного шару.

Розмір передавальної матриці  $\mathbf{T}$  для пружних середовищ складає  $4 \times 4$ , а для пористих –  $6 \times 6$ . Ефекти демпфування також описуються компонентами передавальної матриці. Таким чином, для кожного значення хвильового числа  $k_x$ ,  $k_y$  задача генерування та проходження ультразвукових коливань буде обчислюватись класичним підходом передавальних матриць. Це дозволяє отримувати розв'язок для довільної кількості шарів досліджуваного об'єкта.

### 3. Врахування параметрів первинного перетворювача при генеруванні ультразвукового коливання

Ультразвукова хвиля генерується первинним перетворювачем. В основному її параметри визначаються формою коливання чутливого елемента. Сформована ультразвукова хвиля на виході чутливого елемента повністю описуватиметься формою його деформації у термінах частоти коливання та хвильового числа. Опис коливання п'єзоелектричного чутливого елемента у вигляді пластини представлено у праці Ф. Ебрахініна [11].

Математичний опис вільних коливань чутливого елемента представимо у такій формі [11]:

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = -\frac{E_b J_b}{\rho_b A_b} \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4}, \quad (9)$$

де  $A_b$ ,  $J_b$ ,  $E_b$ ,  $\rho_b$  – відповідно площа, момент інерції, модуль Юнга та густина чутливого елемента первинного перетворювача,  $t$  – час,  $x, y$  – осі координат,  $y(x, t)$  – зміщення чутливого елемента в напрямку, перпендикулярному своїй осі.

Особливістю (9) є те, що це рівняння описує процес коливань чутливого елемента без урахування п'єзоефекту. Це дозволяє проводити спрощені розрахунки шляхом поділу на окремі задачі, а саме: розрахунок зовнішньої сили, що діє на чутливий елемент внаслідок п'єзоефекту, та власні механічні коливання. Зусилля, що діють на чутливий елемент внаслідок п'єзоефекту, утворюються після прикладання різниці потенціалів до верхньої та нижньої поверхонь і можуть бути визначеними так [11]:

$$y(x,t) = \alpha_V U_0 \cos(\omega \cdot t), \quad (10)$$

де  $U_0$  – амплітуда електричних потенціалів,  $\alpha_V$  – коефіцієнт електромеханічного перетворення.

Електрична різниця потенціалів внаслідок п'єзоефекту створює зусилля  $F(x)$ . Коефіцієнт  $\alpha_V$  можна виразити через  $F(x)$  таким чином [11]:

$$\alpha_V = \alpha_F F(x) / (U_0 \cos \omega t),$$

$$\alpha_F = \frac{(\cosh \psi l + \cos \psi l)(-\sinh \psi x + \sin \psi x) + (\sinh \psi l + \sin \psi l)(\cosh \psi x - \cos \psi x)}{2E_b J_b \psi^3 (1 + \cos \psi l \cosh \psi l)},$$

$$\psi = \sqrt[4]{\omega^2 \frac{\rho_b A_b}{E_b J_b}},$$

де  $\alpha_F$  – коефіцієнт динамічної гнучкості чутливого елемента.

Застосуємо граничні умови для деформації чутливого елемента:

$$y(x,t) = 0 \Big|_{x=0}, \quad y(x,t) = A \Big|_{x=l}.$$

З наведеними граничними умовами коефіцієнт динамічної гнучкості чутливого елемента дорівнюватиме [11]:

$$\alpha_F = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta(x-l)}{\rho_b A_b (-\omega^2 + \psi^4 k_n^4)} \right|.$$

Розв'язок (9) проводився із застосуванням методу Фур'є з розділення змінних частоти та часу [11]:

$$y_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) \cos \omega \cdot t,$$

$$X_n(x) = A_n \frac{\cos k_n l + \cosh k_n l}{\sin k_n l - \sinh k_n l} (\cos k_n x - \cosh k_n x) + \sin k_n x - \sinh k_n x, \quad (11)$$

$$k_n = \frac{2n-1}{2 \cdot l} \pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty,$$

де  $l$  – довжина чутливого елемента,  $A_n$  – амплітуда коливання.

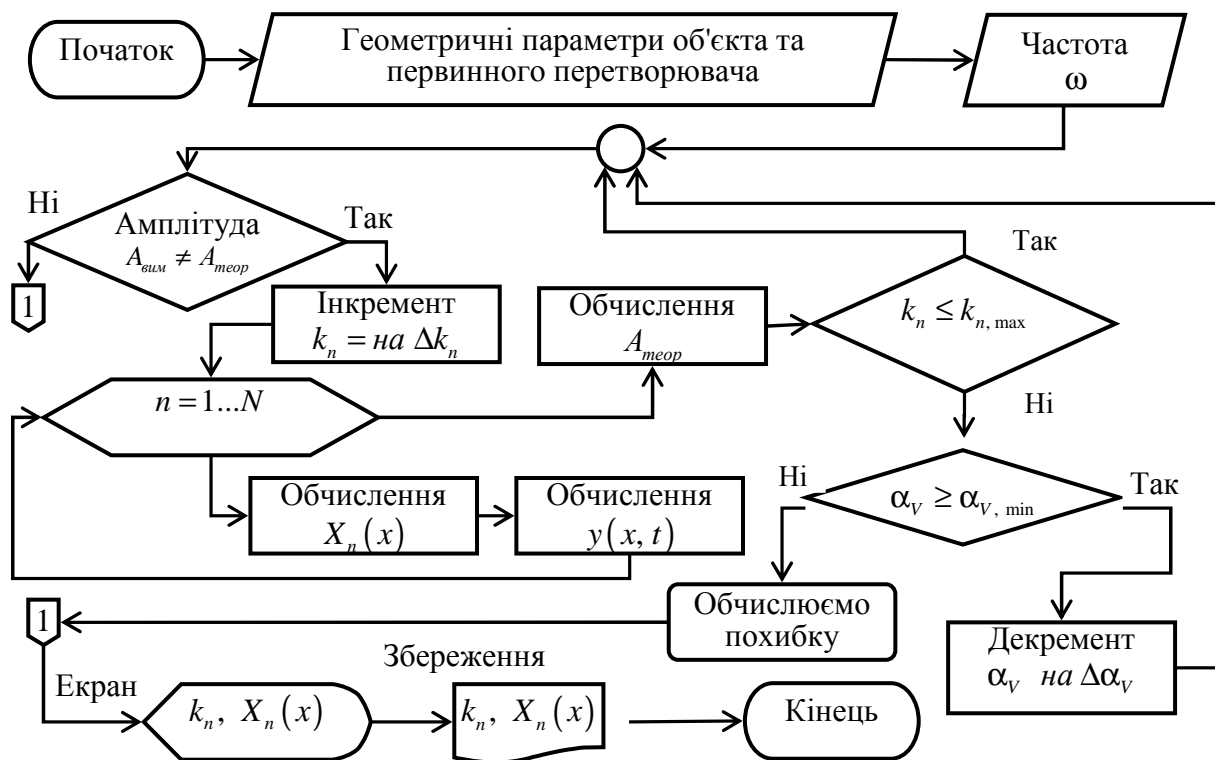
Фактично  $k_n$  – це хвильове число падаючої ультразвукової хвилі у напрямку, перпендикулярному її поширенню. Врахування параметрів коливання чутливого елемента первинного перетворювача дозволяє більш реально описувати падаючу ультразвукову хвилю на стінку трубопроводу.

Форму деформації чутливого елемента більш наочно можна представити так [12]:

$$y(x, t) = A \sum_{n=1}^{\infty} \sin k_n x \cdot \cos \omega t .$$

Розділення форми деформації чутливого елемента та гармонійного коливання довільної точки в часі дозволяє аналізувати можливий набір форм деформації цього елемента, що називаються модами власних коливань.

Такий підхід полегшує проведення експериментальних досліджень. Для отримання збіжності експериментальних та теоретичних результатів замість ітеративного підбору параметрів падаючої хвилі можна змінювати параметри електричного імпульсу генератора коливань, що подається на електроди чутливого елемента. Очевидно, що параметри електричного сигналу можна легко змінювати шляхом маніпулювання значенням вихідного опору, проте параметри падаючої ультразвукової хвилі змінювати не можна.



$A_{вим}, A_{теор}$  – відповідно амплітуда ультразвукової хвилі отримана експериментально і розрахована теоретично;  $\Delta k_n, \Delta \alpha_v$  – відповідно крок інкремента хвильового числа та коефіцієнта електромеханічного перетворення чутливого елемента;  $N$  – вибрана максимальна кількість доданків у (11);  $k_{n, max}, \alpha_{v, min}$  – відповідно граничні значення інкремента хвильового числа та коефіцієнта електромеханічного перетворення чутливого елемента

Рис. 1. Алгоритм уточнення амплітуди сигналу ультразвукової хвилі по відношенню до результатів експерименту

Для врахування параметрів первинного перетворювача при описі поширення ультразвукового збурення через багат шарове середовище необхідно, щоб хвильове число  $k_x$  у рівнянні (5) дорівнювало  $k_n$ . Це можна зробити, вибравши необхідне значення  $n$  у рівнянні (11).

Геометричні параметри, що входять як вхідні дані алгоритму (рис. 1), отримуються із експлуатаційної та монтажної документації на трубопровід та технічної інформації на первинний перетворювач. Приведений алгоритм проводить уточнення відношення амплітуди теоретично модельованого сигналу до експериментального при одному значенні робочої частоти. Відмінності в кінцевих значеннях амплітуди можна сприймати як похибку обчислення. Цю похибку можна зменшити, провівши додаткові обчислення амплітуди сигналу приведеним алгоритмом із використанням вхідних значень бічних частот робочого діапазону чутливого елемента. В алгоритмі не наводився метод обчислення амплітуди сигналу із урахуванням бічних частот, оскільки така інформація не завжди наводиться в технічній документації на первинний перетворювач. Граничне значення хвильового числа  $k_{n, \max}$  вибирається із рівняння (5).

#### 4. Представлення результатів розрахунку поширення та відклику ультразвукової хвилі

Після проведення обчислення параметрів хвилі для одного значення хвильового числа, наприклад, тиску, швидкості поширення, імпедансу поверхні, потужності випромінювання тощо отримані значення додаються до загального розв'язку. Так, для квадрату швидкості  $\langle V^2 \rangle$  та потужності випромінювання  $\Pi_{rad}$  ультразвукової хвилі загальний розв'язок буде уточнюватись за результатами нових отриманих значень таким чином [1]:

$$\begin{aligned} \langle V^2 \rangle &= \frac{1}{8\pi^2 S} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |V(k_x, k_y)_{z=0}|^2 dk_x dk_y, \\ \Pi_{rad} &= \frac{|F|^2}{8\pi^2 S} \operatorname{Re} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Z_{B,\infty}}{|Z_{S,TMM} + Z_{B,\infty}|} dk_x dk_y \right], \\ V(k_x, k_y)_{z=0} &= \frac{1}{Z_{S,TMM} + Z_{B,\infty}}, \quad Z_{B,\infty} = k_0 Z_0 / \sqrt{k_0^2 - (k_x^2 + k_y^2)}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $Z_{S,TMM}$  – імпеданс об'єкта поверхні, на яку падає ультразвукова хвиля,  $k_0$  – хвильове число,  $Z_0$  – характеристичний імпеданс,  $S$  – поверхня об'єкта контролю (трубопроводу).

Ефективність випромінювання ультразвукової хвилі визначається так [9]:

$$\sigma = \frac{\Pi_{rad}}{\rho_0 c_0 S \langle V^2 \rangle}, \quad (13)$$

де  $\rho_0$  – густина середовища випромінювання,  $c_0$  – швидкість поширення ультразвукової хвилі в середовищі випромінювання хвилі.

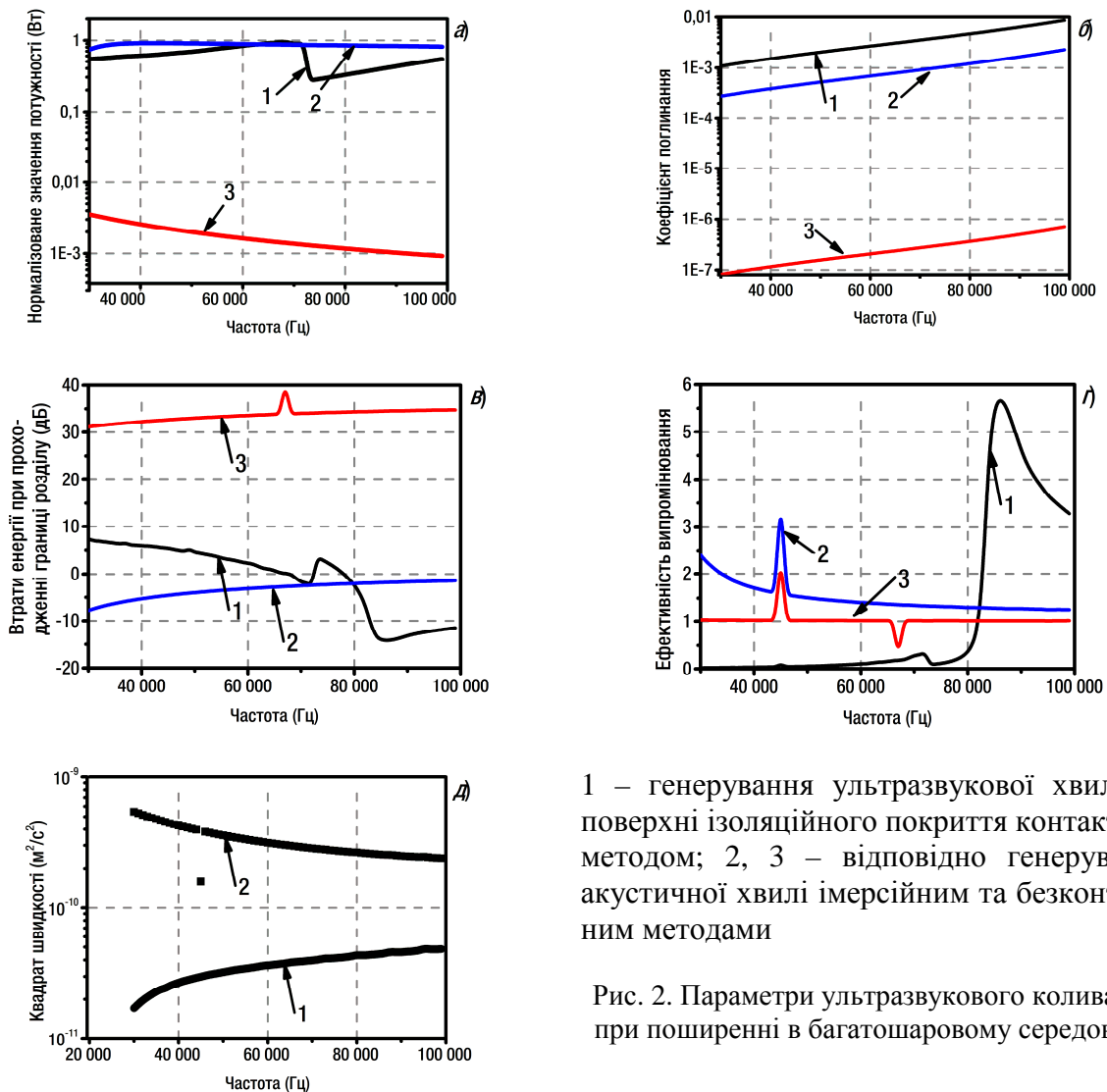
Середовище випромінювання розраховувалось для трьох конфігурацій: 1) тверда гума, 2) вода, 3) повітря. Це середовище фактично розташовується між ультразвуковим первинним перетворювачем та поверхнею стінки трубопроводу.

Параметри об'єкта дослідження для проведення розрахунків представлені в табл. 1.

Результати розрахунків ультразвукового збурення через багат шарове середовище проведені за допомогою програмного забезпечення Vibro-Acoustics NOVA (рис. 2).

Таблиця 1. Фізичні та геометричні параметри досліджуваного об'єкта

Назва параметра	Значення	Назва параметра	Значення
Густина сталі, $\text{кг/м}^3$	7841	Коефіцієнт Пуассона ізоляційного покриття	0,49
Модуль Юнга сталі, Па	$2 \cdot 10^{11}$	Модуль Юнга ізоляційного покриття, Па	$2,3 \cdot 10^9$
Коефіцієнт демпфування сталі	0,007	Модуль зсуву ізоляційного покриття, Па	$7,72 \cdot 10^8$
Коефіцієнт Пуассона сталі	0,32	Швидкість звуку в повітрі, м/с	342,2
Модуль зсуву сталі, Па	$7,58 \cdot 10^{10}$	Густина повітря, $\text{кг/м}^3$	1,213
Густина ізоляційного покриття, $\text{кг/м}^3$	1100	Коефіцієнт демпфування рідини	0,001
Коефіцієнт демпфування ізоляційного покриття	0,08	Швидкість звуку в рідині, м/с	1400
Густина рідини, $\text{кг/м}^3$	1000	Коефіцієнт демпфування рідини	0
Товщина стінки труби, м	0,01	Товщина ізоляційного покриття, м	0,001



1 – генерування ультразвукової хвилі на поверхні ізоляційного покриття контактним методом; 2, 3 – відповідно генерування акустичної хвилі іммерсійним та безконтактним методами

Рис. 2. Параметри ультразвукового коливання при поширенні в багатошаровому середовищі



Результати проведеного обчислення дають числові значення параметрів ультразвукового сигналу, що падає на поверхню стінки трубопроводу, при трьох варіантах генерування. Отримані значення узгоджуються із існуючою теорією поширення пружних коливань, що дозволяє стверджувати про правильність теоретичних викладень. Застосування як акустичний контактний шар повітря при проведенні контролю є недоцільним, оскільки результати розрахунків показують значне загасання амплітуди у порівнянні із застосуванням імерсійного чи контактного методу.

Отримані нелінійні криві (рис. 2) можуть бути пояснені поганою акустичною узгодженістю шарів ізоляційного покриття та металу труби, проте на певних частотах таке узгодження є достатнім для проведення контролю. Випадання окремих точок із результатів обчислення основної форми кривої при розрахунках квадрата швидкості, очевидно, показують погане сходження алгоритму при певній комбінації геометричних параметрів досліджуваного об'єкта та частоти ультразвукової хвилі.

## 5. Висновки

Проведені розрахунки показують, що застосування як акустичний контактний шар повітря при проведенні ультразвукового контролю стінки трубопроводу, покритої ізоляційним покриттям, є недоцільним через значне загасання амплітуди.

При застосуванні як акустичний контактний шар твердої гуми при певних співвідношеннях товщини ізоляційного покриття та частоти хвилі можна отримати малі значення загасання амплітуди сигналу, що робить можливим контроль стінок трубопроводу при наявності ізоляції.

Метод моделювання відклику пружного коливання в ультразвуковому діапазоні частот можна ефективно застосовувати при частотах до 200 кГц. При збільшенні частоти коливання хвилі сходження алгоритму із застосуванням передавальних матриць є нестійким і залежить від співвідношення механічних та геометричних параметрів акустичного контактного шару та досліджуваної структури.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rhazi D. Transfer matrix modeling of the vibroacoustic response of multi-materials structures under mechanical excitation / D. Rhazi, N. Atalla // *Journal of Sound and Vibration*. 2010. – Vol. 329. – P. 2532 – 2546.
2. Folds D.L. Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media / D.L. Folds, C.D. Loggins // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1977. – Vol. 62, Iss. 5. – P. 1102 – 1109.
3. Allard J.F. Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Absorbing Materials / J.F. Allard, N. Atalla. – John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 372 p.
4. Brouard B. A general method of modeling sound propagation in layered media / B. Brouard, D. Lafarge, J.F. Allard // *Journal of Sound and Vibration*. – 1995. – Vol. 183, Iss. 1. – P. 129 – 142.
5. Atalla N. An overview of the numerical modeling of poroelastic materials / N. Atalla // *Congress Symposium on the Acoustics of Poro-Elastic Materials*. – France, 2004.
6. Villot M. Predicting the acoustical radiation of finite size multi-layered structures by applying spatial windowing on infinite structures / M. Villot, C. Guigou-Carter, L. Gagliardini // *Journal of Sound and Vibration*. – 2001. – Vol. 245, Iss. 3. – P. 433 – 455.
7. Guigou-Carter C. Analytical and Experimental Study of Wood Floorings / C. Guigou-Carter, M. Villot, J.L. Kouyoumji // *Forum Acusticum*. – Budapest, 2005. – P. 1931 – 1936.
8. Nelisse H. Structure-borne insertion loss of sound package components / H. Nelisse, T. Onsay, N. Atalla // *Society of Automotive Engineers paper*. – Traverse City, Michigan, 2003.
9. Документація на програмне забезпечення Vibro-AcousticsNOVA версія 9.0 / Компанія ESI-GROUP – 2010. – Електронний оптичний диск (CD-ROM). – Системні вимоги: WindowsXP.

10. Legault J. Numerical and experimental investigation of the effect of structural links on the sound transmission of a lightweight double panel structure / J. Legault, N. Atalla // Journal of Sound and Vibration, 2009. – Vol. 324. – P. 712 – 734.
11. Ebrahimi F. Advances in Piezoelectric Transducers / F. Ebrahimi. – Croatia: Intechweb, 2011. – 138 p.
12. Buchacz A. Damping of Mechanical Vibrations Using Piezoelements, Including Influence of Connection Layer's Properties on the Dynamic Characteristic / A. Buchacz, M. Płaczek // Solid State Phenomena. – 2009. – Vol. 147 – 149. – P. 869 – 875.

*Стаття надійшла до редакції 08.08.2012*