

УДК 622.24.05-004.4

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ СТІНОК ТРУБОПРОВОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМ МЕТОДОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНО- ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

І. З. Лютак, З. П. Лютак, Ю. Й. Стрілецький

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: acoustic.field@gmail.com*

Запропоновано підхід щодо контролю стінок металевих трубопроводів із застосуванням розробленого інформаційно-програмного забезпечення. В роботі представлено теоретичні основи методу акустопружності на основі об'ємних ультразвукових хвиль. Теоретично обґрунтовано обчислення параметрів поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінці металевого трубопроводу. На основі викладеної теорії представлено метод контролю напружено-деформованого стану стінок трубопроводу ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями. Наведено підхід до розроблення інформаційно-програмного забезпечення, що реалізує систему автоматизованого контролю із розподіленими елементами. Наведено результати обчислень теоретичних досліджень у вигляді таблиці. На основі проведеного дослідження можна розробити систему контролю технічного стану трубопроводів малих, середніх та великих діаметрів. Протяжність трубопроводу, що може контролюватись, обмежується методом передачі даних від первинного датчика до центрального сервера і може складати кілька кілометрів.

Ключові слова: ультразвук, трубопровід, контроль, інформаційно-програмне забезпечення, спрямовані хвилі.

Предложен подход контроля стенок стальных трубопроводов с применением разработанного информационно-программного обеспечения. В работе представлены теоретические основы метода акустопружности на основе объемных ультразвуковых волн. Теоретически обосновано вычисления параметров распространения ультразвуковых направленных волн в стенке металлического трубопровода. На основе изложенной теории представлен метод контроля напряженно-деформированного состояния стенок трубопровода ультразвуковыми направленными кольцевыми волнами. Приведены подход к разработке информационно-программного обеспечения, реализующего систему автоматизированного контроля с распределенными элементами. Приведены результаты вычислений теоретических исследований в виде таблицы. На основе проведенного исследования можно разработать систему контроля технического состояния трубопроводов малых, средних и больших диаметров. Протяженность трубопровода, который может контролироваться ограничивается методом передачи данных от первичного датчика к центральному серверу и может составлять несколько километров.

Ключевые слова: ультразвук, трубопровод, контроль, информационно-программное обеспечение, направленные волны.

The approach to control walls of steel pipes using a developed software is proposed. The paper presents the theoretical basis of an acoustoelastic method based on bulk ultrasonic waves. The theoretical foundation for calculating the parameters of propagation of ultrasonic guided circumferential in walls of a metal pipes is presented. Based on the theory outlined a method to control the stress-strain state of the walls of the pipe by ultrasonic circumferential waves is presented. The approach of development the software that implements the automated control system with distributed elements is performed. The results of theoretical research calculations are in a table. Based on the study can be to developed a system of testing technical state of pipelines with small, medium and large diameters. The length of the pipeline, which can be tested is limited by possibility in transferring data from the primary sensor to a central server and may be a few kilometres.

Keywords: ultrasound, pipeline monitoring, software, ultrasonic guided circumferential wave.

Вступ. Проведення контролю великих та протяжних об'єктів, якими є трубопроводи, вимагає не тільки наявності методу контролю, але і його автоматизації. Для великих об'єктів

потрібна також і система збору, зберігання та аналізу інформації, що дозволить відповідальним виконавцям в будь-який момент часу отримати дані про технічний стан ділянки об'єкта. Для трубопроводів, що працюють, одним із важливих параметрів є напружено-деформований стан (НДС) їх стінок. На значення НДС має вплив ряд важливих експлуатаційних факторів, наприклад, товщина стінки, наявність зовнішніх сил, що можуть деформувати трубу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження НДС ультразвуковим методом стінок магістральних трубопроводів проводиться тривалий термін. Цей метод визнано як один із найбільш точних. Недоліком застосування ультразвуку для контролю НДС є складність реалізації методу та пристрою, точковість вимірювань. Для забезпечення застосування ультразвукових хвиль при контролі ділянки об'єкту контролю авторами було запропоновано використовувати ультразвукові спрямовані кільцеві хвилі (УСКХ) [1]. Для застосування УСКХ було розроблено основи алгоритму обчислення параметрів їх поширення [2]. При контролі НДС основою методу є визначення значення акустопружних констант. Ці дослідження велись протягом тривалого періоду. Приведемо основні праці, що становлять основу методу [3, 4, 5]. Удосконалення досліджень визначення констант акустопружності було запропоновано в [6]. В реалізації методу контролю за допомогою пристрою критичним є визначення параметрів первинного давача, зокрема чутливого елемента [7, 8]. Реалізація автоматизованого контролю акустичним методом таких протяжних об'єктів як трубопроводи повинна базуватись на системі із розподіленими елементами. Основні напрямки розроблення такої системи наведено в [9].

Мета дослідження. Із аналізу досліджень видно, що розроблено основу акустичного методу для контролю НДС трубопроводів, проведено ряд робіт для побудови інформаційних систем із розподіленими елементами контролю. Проте на даний час немає інформаційно-програмного забезпечення, що реалізує метод контролю технічного стану трубопроводів акустопружним методом. Існуючі методи контролю НДС ультразвуком не можуть бути ефективними у розподіленій системі вимірювання через ряд причин: а) точковість вимірювання б) складність проведення контролю, що вимагає наявності фахівців та додаткового обладнання тощо. В

роботі необхідно розробити метод контролю НДС акустичними хвилями із використанням УСКХ та привести теоретичні і технічні параметри методу для створення інформаційно-програмного забезпечення, що реалізуватиме систему контролю із розподіленими елементами.

Теорія пружності третього порядку Мурнагана. На основі теорії пружності третього порядку Мурнагана існує ряд математичних моделей, що враховують нелінійні властивості матеріалу. Вибір математичної моделі здійснено за таким критерієм, щоб явище акустопружності описувалось компонентами головних деформацій.

На основі теорії пружності третього порядку Мурнагана науковці Хагес та Келлі описали явище акустопружності для об'ємних ультразвукових хвиль [3]:

$$\begin{aligned} \rho \cdot c_{11}^2 &= \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)D + (4m + 4\lambda + 10\mu)I_1, \\ \rho \cdot c_{12}^2 &= \mu + (\lambda + m)D + 4\mu I_1 + 2\mu I_2 - \frac{nI_3}{2}, \\ \rho \cdot c_{13}^2 &= \mu + (\lambda + m)D + 4\mu\alpha_1 + 2\mu I_3 - \frac{nI_2}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

де ρ - густина; індекси 1, 2, 3 – осі Декартової системи координат; c_{11} , c_{12} , c_{13} – швидкість ультразвукових об'ємних хвиль із напрямком поширення вздовж осі вказаної першим індексом та поляризацією коливань, вказаної другим індексом; λ , μ - пружні константи Ляме; l , m , n – пружні константи Мурнагана третього порядку; I_1 , I_2 , I_3 – компоненти головних деформацій; $D = I_1 + I_2 + I_3$.

Співвідношення між головними деформаціями, представленими в (1) та ε в напрямку осі 1 є таким [3]:

$$I_1 = \varepsilon, I_2 = I_3 = -\nu\varepsilon. \quad (2)$$

Рівняння (1) та (2) дозволяють проводити контроль НДС об'ємними ультразвуковими хвилями.

Проведення обчислення швидкості поширення УСКХ в стінці труби у ненапруженому стані. Основна ідея проведення розрахунку поширення УСКХ по периметру стінки трубопроводу полягає у застосуванні модального підходу.

При модальному підході будується двовимірний сітка скінченних елементів стінки труби вздовж її осі. Наступним кроком застосовуються граничні умови в напрямку,

перпендикулярному сітці скінченних елементів. Ці умови визначають періодичний розподіл напружень і деформацій відповідно до умов поширення УСКХ в напрямку по периметру труби навколо її осі. Для обчислення просторового періоду розподілу напружень та деформацій застосовується модальний підхід, при якому обчислюються власні числа та вектори коливання побудованої сітки скінченних елементів, і реалізується за допомогою існуючого програмного забезпечення. Для побудови моделі скінченних елементів використано циклічні осесиметричні умови розв'язку рівняння власних коливань стінки труби.

Рівняння, що застосовує модальний підхід для опису поширення спрямованих хвиль, було представлено Л. Гаврічем у праці [10]. У цій праці Л. Гавріч розробив власне програмне забезпечення, що реалізує метод обчислення вільних коливань за допомогою скінченних елементів.

Адаптацію математичної моделі поширення спрямованих хвиль, розроблену Л. Гаврічем, було здійснено рядом науковців у праці [11], що дозволило застосовувати її у існуючих програмах, котрі реалізують метод модального аналізу.

Рівняння власних коливань

Поле зміщень елементарного об'єму пружного середовища в площині x_1x_2 для хвилі, що поширюється в напрямку x_3 , запишемо так [10]:

$$\begin{aligned} u_1(x_1, x_2, x_3, t) &= U_1(x_1, x_2) e^{-j(kx_3 - \omega t)}, \\ u_2(x_1, x_2, x_3, t) &= U_2(x_1, x_2) e^{-j(kx_3 - \omega t)}, \\ u_3(x_1, x_2, x_3, t) &= U_3(x_1, x_2) e^{-j(kx_3 - \omega t - \pi/2)}, \end{aligned} \quad (3)$$

де j – комплексне хвильове число; k – хвильове число; ω – частота; t – час; $U_1(x_1, x_2)$, $U_2(x_1, x_2)$, $U_3(x_1, x_2)$ – розподіл амплітуд зміщень елементарного об'єму пружного середовища.

Будь-яка точка хвилеводу згідно з (3) піддається гармонічним коливанням із частотою ω . Пружні коливання поширюються вздовж осі 3 із хвильовим числом k із зміщенням по фазі відносно коливань в одній площині поперечного перерізу стінки трубопроводу. Виразимо енергію скінченного елемента через Гамільтоніан так [10]:

$$\Pi(x_1, x_2, k) = \left[\begin{aligned} &k^2 \cdot K_{\Pi 2}(x_1, x_2) + k \cdot K_{\Pi 1}(x_1, x_2) + \\ &+ k \cdot K_{\Pi 0}(x_1, x_2) - K_K(x_1, x_2) \end{aligned} \right] / 2, \quad (4)$$

де Π – Гамільтоніан, що описує енергію скінченного елемента; K_{Π} – потенціальна енергія пружних сил, K_K – кінетична енергія.

Вираз (4) є доволі простим, оскільки в ньому відсутні члени, що описують енергію скінченних елементів вздовж осі 3. Ці члени були вилучені, оскільки вважаємо, що вздовж осі 3 енергія дорівнює деякій константі. Це відповідає поширенню УСКХ по периметру стінки труби навколо її осі.

Члени (4) визначаються так [10]:

$$\begin{aligned} K_{\Pi 0}(x_1, x_2) &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 - \nu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 \right] + \\ &+ \frac{E}{2(1+\nu)} \left[\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \nu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 \right], \\ K_{\Pi 1}(x_1, x_2) &= \frac{2\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} u_3 + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} u_3 \right) - \\ &- \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} u_2 + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} u_1 \right), \\ K_{\Pi 2}(x_1, x_2) &= \frac{E}{2(1+\nu)} (u_1^2 + u_2^2) + \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} u_3^2, \\ K_K(x_1, x_2) &= \omega^2 \rho (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2), \end{aligned} \quad (5)$$

де E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона, ρ – густина.

Для опису розподілу енергії по всьому об'єму досліджуваного середовища необхідно провести сумування всіх елементів [10]:

$$(k^2 [K_{\Pi 2}] + k [K_{\Pi 1}] + [K_{\Pi 0}] - \omega^2 [M]) \{u\} = \{0\}, \quad (6)$$

де M – матриця маси.

В результаті проведення обчислення необхідно віднайти скалярні значення хвильових чисел k_1, k_2, \dots, k_i та відповідні їм вектори переміщень $\{u\}_1, \{u\}_2, \dots, \{u\}_i$ для одного значення частоти ω . Кількість знайдених значень є в два рази більшою ступенів свободи розглядуваного пружного середовища.

Запропонований Л. Гаврічем метод обчислення поширення спрямованих хвиль було удосконалено П. Вілкоксом для використання у комерційних пакетах скінченних елементів [11]. Метод П. Вілкокса є апроксимацією рівняння (6).

Розв'язок методу власних коливань шукається у такій формі [12, 13]:

$$(\ddot{u}M + \dot{u}C + Ku) = 0, \quad (7)$$

де \ddot{u} , \dot{u} - відповідно прискорення та швидкість коливань об'єму пружного середовища; \mathbf{M} - матриця маси; \mathbf{C} - матриця демпфування; \mathbf{K} - матриця жорсткості;

Коефіцієнти матриці жорсткості є функціями порядку циклічної симетрії та частоти. Без врахування демпфування рівняння (7) матиме такий вигляд [13]:

$$(\ddot{u}\mathbf{M} + \mathbf{K}) = 0, \quad (8)$$

Розв'язком власних коливань сегменту стінки труби (7) та (8) для циклічної осесиметричної моделі є гармонійні рівняння розподілу зміщень елементарного об'єму пружного середовища для знайденої частоти власних коливань ω [11]:

$$\begin{aligned} u_r &= U_r(r, z) \cos k_\theta \theta, \\ u_z &= U_z(r, z) \cos k_\theta \theta, \\ u_\theta &= U_\theta(r, z) \sin k_\theta \theta, \end{aligned} \quad (9)$$

де r , θ , z - циліндрична система координат; $U_r(r, z)$, $U_z(r, z)$, $U_\theta(r, z)$ - амплітуди розподілу зміщень елементарного об'єму пружного середовища; k_θ - порядок циклічної симетрії.

Застосування (9) узгоджується із властивостями поширення спрямованих хвиль, де зміщення елементарного об'єму пружного середовища у напрямку θ є зміщеним у фазі на 90° від зміщень у площині rz [14]. Підхід дозволяє встановити зв'язок між власними частотами та параметрами поширення УСКХ (порядком циклічної симетрії k_θ).

Особливість побудови числової моделі за підходом циклічної симетрії представлено сегментом трубопроводу, (рис. 1). За основу вибрано циліндричну систему координат φ , ρ , z .

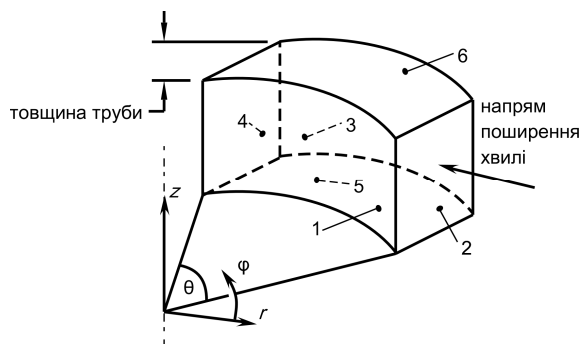
Вісь трубопроводу збігається із вісю z циліндричної системи координат. Величина сегменту труби θ дорівнює:

$$\theta = \frac{360^\circ}{k_\theta} \quad (10)$$

При моделюванні поширення УСКХ циклічною осесиметричною моделлю знайдений розв'язок розподілу гармонійних коливань для одного сегменту циклічно повторюється по периметру труби. Це означає, що при поширенні УСКХ в стінці труби, число k_θ співвідноситься із кутовим хвильовим числом спрямованої кільцевої хвилі, що визначене І. Вікторовим [15]. Зв'язок між довжиною хвилі УСКХ та числом циклічної симетрії k_θ є такий [13]:

$$\lambda = 2\pi r_m / k_\theta, \quad (11)$$

де λ - довжина хвилі УСКХ, r_m - радіус труби, взятий до середини товщини стінки.



границі 1, 3 – відповідно внутрішня та зовнішня стінки труби; 2, 4 – границі сегменту по периметру труби; 5, 6 – границі сегменту по довжині труби

Рисунок 1 – Сегмент стінки труби для циклічної осесиметричної моделі

Зміна величини сегменту труби, що веде, відповідно, до зміни порядку циклічної симетрії, буде задавати довжину хвилі УСКХ, для якої шукатиметься розв'язок рівняння (7) у формі, що представлена рівняннями (9) [13].

Граничні умови на межі сегменту труби 5 та 6, (рис. 1) є симетричними. Симетричні граничні умови означають, що переміщення елементарного об'єму середовища стінки сегменту труби є вільними в напрямку, що лежить в площині грані та дорівнюють нулю в напрямку, перпендикулярному поверхні грані [12]. Симетричні граничні умови на верхній та нижній межах сегменту стінки труби дозволяють шукати розв'язок для хвилі, що поширюється по периметру труби (в напрямку координати φ) без врахування скінченності труби в напрямку осі z [13]. Граничні умови на інших гранях сегменту трубопроводу є вільними (напруження дорівнюють нулю).

Розглянемо поширення УСКХ в стінці труби діаметром 273 мм та товщиною стінки 10 мм. Параметри металу виберемо такими: модуль Юнга $E = 207 \cdot 10^9$ Па, коефіцієнт Пуассона 0,296. Це відповідає константам пружності другого порядку Ляме $\lambda = 11,58 \cdot 10^{10}$ Па, $\mu = 7,99 \cdot 10^{10}$ Па. Хвильове рівняння для УСКХ, розв'язане із застосуванням математичної моделі, представимо графічно (рис. 2).

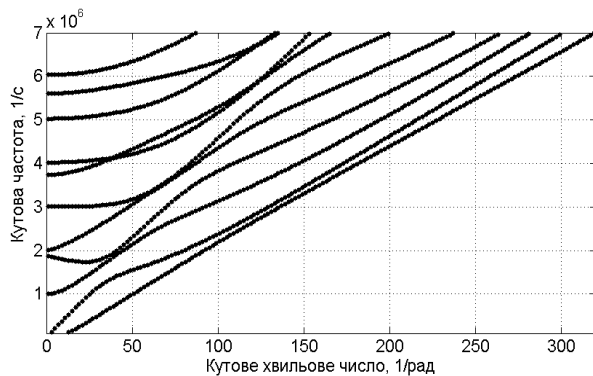


Рисунок 2 – Дисперсне рівняння кутового хвильового числа поширення УСКХ в стінці трубопроводу діаметром 273 мм та товщиною стінки 10 мм

Розв'яжемо рівняння поширення УСКХ для кутового хвильового числа, що дорівнює 100 із кутовою частотою $6,331 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Сітку скінченних елементів побудуємо для сектора труби, що дорівнює $1/100$ довжини кола із одного шару. В результаті розв'язку рівняння вільних коливань знайдено кутову частоту, що дорівнює $6,347 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Відносна похибка проведення обчислення між результатами, отриманими із розв'язку математичної моделі, та методом власних коливань складає 0,3 %, що входить в межі похибки числового пошуку кореня.

Для порівняння отриманих результатів розрахунків було проведено обчислення рівнянь, що описують дисперсні властивості спрямованих симетричних ультразвукових хвиль, що поширюються в пластині [16]:

$$\frac{\tan(qh)}{q} + \frac{4k^2 p \tan(ph)}{(q^2 - k^2)} = 0, \quad (12)$$

$$p^2 = \left(\frac{\omega}{c_t}\right)^2 - k^2, \quad q^2 = \left(\frac{\omega}{c_l}\right)^2 - k^2,$$

де k – хвильове число спрямованої хвилі; c_l , c_t – відповідно швидкості поширення поздовжньої та поперечної хвиль.

Рівняння, що описує дисперсні властивості спрямованих антисиметричних ультразвукових хвиль, що поширюються в пластині [16]:

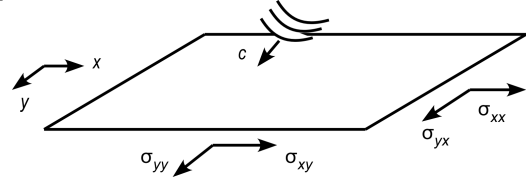
$$q \cdot \tan(qh) + \frac{(q^2 - k^2)^2 \tan(ph)}{4k^2 p} = 0. \quad (13)$$

В результаті розв'язку було знайдено

симетричну моду ультразвукової спрямованої хвилі, що відповідає моді ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі із кутовою частотою $6,3437 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Відносна похибка визначення параметрів ультразвукових спрямованої та спрямованої кільцевої хвиль складає 0,5 %, що є в межах похибки числового пошуку кореня.

Теоретичні основи визначення залежності зміни швидкості УСКХ від значення напружено-деформованого стану металу стінки труби

Розглянемо поширення ультразвукової поздовжньої хвилі нормально до площини пружного середовища із плоским напружено-деформованим станом, (рис. 3).



x, y – Декартові координати, $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ – відповідно головні напруження по координатних осях та зсувне, c – швидкість поширення ультразвукової хвилі в середовищі із напружено-деформованим станом

Рисунок 3 – Поширення ультразвукової хвилі при плоскому напружено-деформованому стані

Плоский напружено-деформований стан розглядатимемо як такий, при якому значення напруження вздовж третьої координатної осі та відповідні йому зсувні компоненти напруження дорівнюють нулю. Матеріалом середовища поширення буде сталь. Приймемо, що $|\sigma_{xy}| = |\sigma_{yx}|$. Відповідно до праць ряду науковців на основі теорії акустопружності (1) зміна початкової швидкості поширення ультразвукової хвилі c_0 внаслідок явища акустопружності в цьому випадку матиме такий вигляд [4, 5, 6]:

$$\frac{c - c_0}{c_0} = A_x \sigma_{xx} + A_y \sigma_{yy}, \quad (14)$$

де c – швидкість поширення ультразвукової хвилі в середовищі із напружено-деформованим станом; A_x, A_y – акустопружні коефіцієнти, що можуть мати різні значення для ортотропних матеріалів.

Згрупувавши змінні в (14) отримаємо залежність між сумою напружень та зміною швидкості поширення ультразвукової хвилі [6]:

$$\frac{c-c_0}{c} = A_+ (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + A_- (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}), \quad (15)$$

$$A_+ = \frac{A_+ + A_-}{2}, \quad A_- = \frac{A_+ - A_-}{2},$$

У випадку ізотропності матеріалу акустопружна константа A дорівнює нулю. Відповідно зміна швидкості поширення ультразвукової хвилі пропорційна сумі нормальних напружень плоского напружено-деформованого стану. Для сталі акустопружна константа A_+ є набагато більшою за A_- [6].

Для сталі коефіцієнти акустопружності можна визначити в лабораторних умовах, наприклад, шляхом розтягу зразка на розривній машині. У цьому випадку матиме місце одноосний розтяг зразка, при якому визначається одна акустопружна константа, в напрямку якої відбувається розтяг:

$$A = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{c_k - c_0}{c_k \cdot \sigma_k}, \quad (16)$$

де індекс k дорівнює кількості експериментів.

Для визначення акустопружних коефіцієнтів із ортотропних сталей необхідно вирізати зразки у взаємно перпендикулярному напрямку, наприклад, для ортотропної трубної сталі зразки вирізаються вздовж і поперек осі труби.

Представлені рівняння, що описують явище акустопружності є лінійними. Лінійна апроксимація явища акустопружності може бути застосована і до опису поширення інших типів хвиль, зокрема спрямованих кільцевих, що поширюються в стінці труби. В цьому випадку константа акустопружності, визначена експериментально, буде відрізнятися від константи акустопружності для поздовжньої хвилі.

Для застосування (14) для об'єктів із складною геометричною формою необхідно практично перейти від Декартової системи координат до системи із нормально-тангенціальними компонентами (σ_{nn} , σ_{tt} , σ_{nt} – відповідно нормальні, тангенціальні та зсувні напруження), які визначені одиничним вектором n , розміщеним на границі об'єкту, що утворює із площиною пружного середовища кут α [6], (рис. 4):

$$\frac{c-c_0}{c} = \sigma_{tt} (A_x \sin^2 \alpha + A_y \sin^2 \alpha). \quad (17)$$

Взаємозв'язок між компонентами Декартової та нормально-тангенціальною системою координат є таким [6]:

$$\sigma_{tt} = \sigma_{xx} \cos^2 \alpha + \sigma_{yy} \sin^2 \alpha + \sigma_{xy} \sin 2\alpha,$$

$$\sigma_{nn} = \sigma_{xx} \sin^2 \alpha + \sigma_{yy} \cos^2 \alpha - \sigma_{xy} \sin 2\alpha,$$

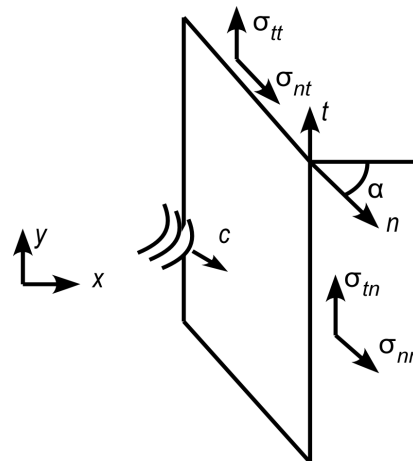
$$\sigma_{nt} = \frac{(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})}{2} \sin 2\alpha + \sigma_{xy} \cos 2\alpha, \quad (18)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{tt} \sin^2 \alpha, \quad \sigma_{yy} = \sigma_{nn} \cos^2 \alpha,$$

$$\sigma_{xy} = (\sigma_{nt} \sin 2\alpha) / 2.$$

Розробимо спосіб обчислення явища акустопружності, що базується на лінійній апроксимації. Розглянемо дві конфігурації поширення ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі в сегменті стінки труби визначеної довжини L_0 . В першій конфігурації метал стінки труби є в ненапружено-деформованому стані, при цьому швидкість поширення моди УСКХ дорівнює c_0 , (рис. 5). Фаза коливань при поширенні УСКХ на відстань L_0 дорівнює деякому значенню A . У другій конфігурації сегмент стінки труби є в напружено-деформованому стані, при якому головне напруження в напрямку поширення УСКХ більше нуля за абсолютним значенням. Швидкість поширення моди УСКХ зміниться внаслідок явища акустопружності і дорівнюватиме c . Також метал при напружено-деформованому стані набуде деяких деформацій $d\varepsilon$:

$$d\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}. \quad (19)$$



σ - вектори напружень в металі

Рисунок 4 – Поширення ультразвукової хвилі при плоскому напружено-деформованому стані в системі нормально - тангенціальних координат

Фаза коливань у т. 2, (рис. 5) у стінці труби, що є у ненапруженому стані дорівнюватиме [6]:

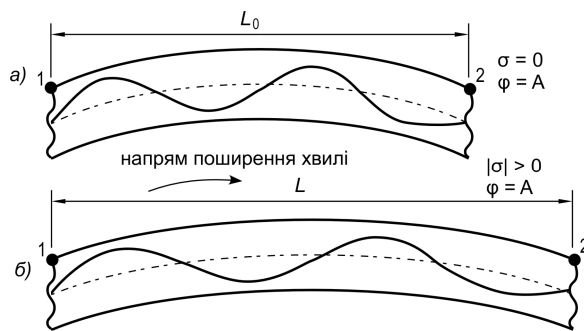
$$\phi_0 = f_0 \cdot T_{(0)2} = f_0 \frac{L_0}{c_0}, \quad (20)$$

де f_0 – частота моди УСКХ, $T_{(0)2}$ – час приходу моди УСКХ в т. 2, ϕ_0 – фаза коливань моди УСКХ в т. 2.

Шляхом зміни початкової частоти моди УСКХ (в момент генерування) досягнемо такого значення фази коливань ультразвукової хвилі в т. 2, що і при ненапруженому стані. У такому випадку, коли метал стінки труби є у напружено-деформованому стані фаза коливань моди УСКХ в т. 2 буде такою:

$$\phi = f \cdot T_{(1)2} = f \frac{L}{c}, \quad (21)$$

де f – частота моди УСКХ у металі з НДС, $T_{(1)2}$ – час приходу моди УСКХ в т. 2 у металі з НДС, ϕ – фаза коливань моди УСКХ в т. 2 у металі з НДС.



а) - ненапружено-деформований стан металу,
б) напружено-деформований стан металу: 1, 2 – відповідно точки генерування та ресстрації моди УСКХ; ϕ - фаза коливань УСКХ

Рисунок 5 – Поширення УСКХ у металі стінки труби

Сума фаз коливань мод УСКХ у двох конфігураціях буде постійною:

$$\phi_0 + \phi = f_0 \frac{L_0}{c_0} + f \frac{L}{c} = const, \quad (22)$$

На основі рівняння (22) відносна зміна швидкості поширення моди УСКХ так залежить від відносної зміни частоти коливань хвилі [6]:

$$\frac{c - c_0}{c_0} = d\varepsilon + \frac{f - f_0}{f_0} d\varepsilon + \frac{f - f_0}{f_0}, \quad (23)$$

Оскільки УСКХ поширюється у напрямку, перпендикулярному до площини сітки скінченних елементів, можна застосувати рівняння (23) - відношення швидкостей ультразвукових хвиль у напружено-деформованому та ненапружено-деформованому станах [17].

Значення частот визначається шляхом розв'язку рівняння вільних коливань при поширенні спрямованої хвилі. Для одного власного значення відношення частот УСКХ у ненапружено-деформованому та напружено-деформованому станах буде пропорційним до відношення швидкостей УСКХ згідно з (23).

Відношення зміни швидкості УСКХ внаслідок акустопружності до деформацій буде таким [12]:

$$\frac{c - c_0}{d\varepsilon \cdot c_0} = 1 + \frac{f - f_0}{d\varepsilon \cdot f_0} + \frac{f - f_0}{f_0}. \quad (24)$$

Порядок обчислення математичної моделі акустопружності УСКХ. Порядок проведення обчислення акустопружності УСКХ проводиться так:

1. Пружні властивості сталі описуються згідно з теорією пружності третього порядку Мурнагана, що дозволяє враховувати явище акустопружності. На основі теорії пружності третього порядку Мурнагана розроблено модель матеріалу, яка застосовується в модальному аналізі методу скінченних елементів. В основі підходу Мурнагана визначено залежність між зміною швидкості ультразвукових хвиль від величини деформацій.

2. Проведення обчислення швидкості поширення УСКХ в стінці труби у ненапруженому стані згідно з модальним підходом. В результаті проведення обчислення знаходяться власні числа, вектори та частоти вільних коливань сітки скінченних елементів, що відповідає параметрам поширення УСКХ.

3. Проведення обчислення швидкості поширення УСКХ в стінці труби у напружено-деформованому стані згідно з модальним підходом. При напружено-деформованому стані у матеріалі скінченних елементів, що описується теорією пружності третього порядку Мурнагана, змінюється швидкість поширення ультразвукових хвиль. В результаті проведення обчислення модальним методом знаходиться зміна частоти коливань сітки скінченних елементів при таких же власних числах.

4. Визначення коефіцієнта акустопружності УСКХ.

Підхід розроблення інформаційно-програмного забезпечення контролю технічного стану трубопроводів. Система моніторингу технічного стану трубопроводів складається із ряду давачів для контролю таких параметрів як товщина стінок та величина напружень (рис. 6), оскільки ці величини характеризують експлуатаційні параметри [7]. Як давачі товщини ми використали ультразвукові давачі, які генерують пластинчасті хвилі. Перевага такого підходу полягає в тому, що можна контролювати стаціонарними давачами певну ділянку газопроводу, довжина якої може складати кілька десятків метрів. Такі давачі потрібно монтувати в місцях з підвищеною кількістю деструктивних чинників впливу на газопровід, наприклад, технологічні коліна, місця кріплення тощо.

Як давачі визначення напружень нами використано як ультразвукові, так і тензометричні, оскільки це значно підвищує достовірність вимірюваних результатів.

Виміряна інформація передається до сервера, який здійснює кінцеву обробку результатів та надає оброблену інформацію на веб-сервер для її перегляду через Інтернет. Користувач Інтернет, який заходить авторизовано на веб-сервер для перегляду інформації про технічний стан газопроводу, ініціалізує нову серію вимірювань для вибраної ним ділянки трубопроводу. В цьому випадку веб-сервер подає сигнал вимірювальним пристроям для генерації сигналів та початку вимірювань. Через визначений період часу виміряна інформація надходить до користувача веб-сервера в обробленому вигляді.

Для оптимального визначення шляху тестування програми необхідно використовувати так званий підхід визначення-використання змінної, що полягає у побудові шляху від декларування змінної до її використання без врахування будь-яких проміжних етапів передекларування. Для визначення правильного шляху тестування необхідно врахувати і змінні технології побудови мережевого програмного забезпечення, такі як request та response, що відкривають доступ до ресурсів мережевих пакетів, реалізованих у платформі мови програмування, без наявного їх декларування. Інші змінні дають доступ до потоків вводу/виводу інформації та впливають на напрям виконання веб-сторінок. За допомогою змінних можна обробляти всі запити гіпертекстових сторінок однієї сесії користувача, що дає змогу передавати дані між окремими HTML сторінками та модулями.

Одним із найбільш вживаних об'єктів є session, який працює як контейнер для зберігання даних, представлених парами "ім'я – значення", що використовується багатьма веб-сторінками і може бути модифікованим будь-якою із них.



Рисунок 6 – Схема системи моніторингу технічного стану газопроводів

З врахуванням особливостей об'єктів, веб-сторінку можна розглядати, з точки зору складання тестів, як набір процедур, оскільки важливими спільними рисами їх є єдина точка входу та доступ до декларованих процедур тільки всередині веб-сторінки.

В запропонованому підході використано технологію Джава. При проектуванні програмного забезпечення нами розглянуто комплексний підхід як до використання сучасних методів при побудові модулів серверної частини з використанням універсальної мови моделювання (УММ), так і до тестування із врахуванням об'єктів [18]. Такий підхід, що враховує конкурентний доступ до ресурсів серверної частини на етапі проектування та інші особливості функціонування системи моніторингу, значно зменшує час розроблення та підвищує надійність системи загалом.

Проведення обчислення швидкості поширення УСКХ в стінці труби у напруженому стані. Побудова рівнянь для проведення обчислення поширення пружних коливань в пакетах скінченних елементів базується на принципі, який полягає в тому, що робота зовнішніх навантажень дорівнює роботі внутрішніх деформацій скінченних елементів, що виражається через густину енергії деформації W_s [12]:

$$\Delta W_s = W_s^{en} - W_s^{zh} = 0, \quad (25)$$

де верхній індекс *вн* позначає густину енергії деформації від зусилля реакції пружного середовища, а індекс *зн* – від зовнішніх зусиль.

Такий підхід є гнучким для проведення обчислення об'єктів із складною геометрією та схемою навантажень. Для опису акустопружності УСКХ також застосовується рівняння, що побудоване на принципі густини енергії деформації W_s , виражене на основі теорії Лагранжа [12]:

$$W_s = W_s(D^{(K)}) = W_s(F^T F), \quad (26)$$

де $D^{(K)}$ – тензор деформацій Коші-Гріна, F – градієнт деформацій.

Використання тензору деформацій Коші-Гріна дозволяє описувати зміщення в пружному середовищі, викликані зовнішнім зусиллям без врахування зміщення початку системи координат. Визначення градієнту деформацій та його залежність від тензору деформацій Коші-Гріна є такими [12]:

$$F = dx / dX, \quad D^{(K)} = F^T F, \quad (27)$$

де X , x – відповідно вектори-орти системи координат в недеформованому та деформованому зовнішніми зусиллями середовищі.

Відповідність між недеформованим та деформованим пружним середовищем можна виразити через вектор зміщення елементарного об'єму середовища u так [12]:

$$x = X + u(X, t), \quad (28)$$

де t – час.

Градієнт деформацій a , відповідно, і тензор Коші-Гріна містить повну інформацію про локальні зміщення та поворот пружного середовища [12]:

$$D_{ij}^{(K)} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \delta_{ij}, \quad (29)$$

де δ_{ij} – елементи тензора головних деформацій; $i, j, k = 1, 2, 3$ – індекси координатних осей.

Оскільки поворот середовища згідно з (27) викликає деформації ε , що не загально прийнято із інженерної точки зору, приведемо взаємозв'язок між цими величинами [12]:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(D^{(K)} - I), \quad (30)$$

де I – головні напруження.

Для ізотропного матеріалу головні

напруження можна виразити через тензор деформацій Коші-Гріна так [12]:

$$\begin{aligned} I_1 &= D^{(K)}_{11} + D^{(K)}_{22} + D^{(K)}_{33}, \\ I_2 &= \left(I_1^2 - (D^{(K)})_{11}^2 - (D^{(K)})_{22}^2 - (D^{(K)})_{33}^2 \right) / 2, \\ I_3 &= \det(D^{(K)}) = \det(F)^2. \end{aligned} \quad (31)$$

Враховуючи залежності головних напружень та деформацій, градієнт деформацій можна виразити через головні напруження та зміщення елементарного об'єму пружного середовища так [12]:

$$F = \nabla u + I. \quad (32)$$

Градієнт деформацій дозволяє обчислювати координати точки у деформованому пружному середовищі по відношенню до координат цієї точки у недеформованому середовищі.

Рівняння (26)-(32) повністю описують залежність між деформаціями в пружному середовищі та енергією. Очевидно, що обчислення краще проводити, використовуючи тензор деформацій Коші-Гріна, оскільки при цьому не потрібно розглядати всі процеси у двох системах координат (недеформованій і зміщеній та повернутій внаслідок дії зовнішньої сили). Градієнт деформацій F явно представляє зміщення точки середовища внаслідок дії зовнішнього зусилля.

Рівняння (6) відповідає рівнянню, реалізованому в існуючому програмному забезпеченні модального методу скінченних елементів при обчисленні власних коливань механічної системи [12]. Єдиною умовою для проведення обчислення явища акустопружності вибраним пакетом прикладних програм, що реалізує модальний метод обчислення власних коливань, є необхідність підтримки моделі матеріалу на основі теорії пружності третього порядку (Ф. Мурнагана). Модель матеріалу скінченних елементів застосовує теорію пружності третього порядку Мурнагана через густину енергії деформації, виражену через компоненти головних деформацій на основі (1) [12]:

$$\begin{aligned} W_s &= \frac{1}{2}(\lambda + 2\mu)(I_1^\varepsilon)^2 - 2\mu I_2^\varepsilon + \\ &+ \frac{1}{3}(l + 2m)(I_1^\varepsilon)^3 - 2m I_1^\varepsilon I_2^\varepsilon + n I_3^\varepsilon, \\ I_1^\varepsilon &= (I_1 - 3) / 2, \quad I_2^\varepsilon = (I_2 - 2I_1 + 3) / 4, \\ I_3^\varepsilon &= (I_3 - I_2 + I_1 - 1) / 8. \end{aligned} \quad (33)$$

При прикладанні зовнішніх зусиль до стінки труби, вона деформується на деяку величину $L = (1 + d\varepsilon)L_0$, де $d\varepsilon$ – приріст деформації стінки труби, L_0 – довжина сегменту стінки труби без зовнішніх зусиль.

Визначення достовірності результатів розрахунку величини явища акустопружності ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль, отриманих на основі розробленої математичної моделі

Оцінка точності обчислень акустопружності моделлю із теорією пружності третього порядку проведемо для експериментальних результатів представлених Д. Іглом [3]. Параметри матеріалу сталі є такими: густина 7800 кг/м^3 , константи Ляме $\lambda = 11.58 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $\mu = 7.99 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, константи Мурнагана $l = -24.8 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $m = -62.3 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $n = -71.4 \cdot 10^{10} \text{ Па}$. Відносні деформації дорівнюють $5 \cdot 10^{-4}$. Форма об'єкту дослідження - прямокутна пластина, що відповідає зразку, використаному в праці [3].

Як результат розрахунків було отримано -2.61 , що відповідає експериментальним даним -2.52 [12]. Це показує правильність моделі акустопружності. Похибка в результатах є похибкою проведених експериментальних досліджень.

Зв'язок між константами Ляме, модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона, що отримуються при лабораторних дослідженнях є таким:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (34)$$

Визначення коефіцієнтів пружності третього порядку можна здійснити в лабораторних умовах за таким рівнянням [3]:

$$l = \frac{\lambda}{1-2\nu} \left[\frac{1-\nu}{\nu} \frac{dc_{22}}{d\varepsilon} + \frac{2}{1+\nu} \left(\frac{dc_{21}}{d\varepsilon} + \nu \frac{dc_{23}}{d\varepsilon} \right) + 2\nu \right],$$

$$m = 2(\lambda + \mu) \left(\frac{\nu}{1+\nu} \frac{dc_{23}}{d\varepsilon} + \frac{1}{1+\nu} \frac{dc_{21}}{d\varepsilon} + 2\nu - 1 \right), \quad (35)$$

$$n = \frac{4\mu}{1+\nu} \left(\frac{dc_{21}}{d\varepsilon} - \frac{dc_{23}}{d\varepsilon} - 1 - \nu \right).$$

Відносні переміщення можна обчислити в умовах лабораторних досліджень, виходячи із закону Гука так:

$$d\varepsilon = F/SE, \quad (36)$$

де F – сила прикладена до зразка сталі, S – площа поперечного перерізу, E – модуль Юнга.

Для обчислення акустопружного ефекту в якості матеріалу труби виберемо сталь із параметрами, що приведені при верифікації результатів. Геометричні розміри труби є такими: діаметр 273 мм, товщина стінки 10 мм. Акустопружний ефект будемо обчислювати для 8-и мод за двома частотними діапазонами 1 МГц та 2.5 МГц. У зв'язку із тим, що при збільшенні частоти необхідне збільшення скінченних елементів на частоті 2.5 Гц, обчислення проводитимуться тільки із половиною околу труби. Граничні умови на розділі частини труби будуть симетричними. Це дозволить моделювати частину труби як одне ціле.

Розрахунки проводитимуться у три етапи. У першому етапі розраховуються власні частоти труби без напружень. В другому етапі до трубопроводу прикладаються зовнішні навантаження та розраховуються величини напружень та деформацій. На третьому етапі розраховуються власні частоти трубопроводу після прикладання навантажень. При цьому він знаходиться у напружено-деформованому стані (табл. 1).

Як можна побачити із представлених результатів розрахунків, власні частоти змінюються від величини НДС.

Для визначення швидкості поширення окремих мод УСКХ в стінці трубопроводу проведено розрахунок їх дисперсних властивостей розробленим алгоритмом.

ВИСНОВКИ

Представлений підхід визначення величини напружено-деформованого стану в стінці трубопроводу за допомогою явища акустопружності ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями є перспективним та таким, що підвищує достовірність контролю. Представлені дослідження різних мод кільцевих хвиль дозволяють оптимально вибирати необхідні параметри генеруючого та приймального ультразвукових перетворювачів з метою використання необхідної моди.

Результати досліджень показали, що більш яскраво виражений ефект акустопружності є для мод на частоті 2.5 МГц. Для вказаного частотного діапазону найбільший коефіцієнт акустопружності є присутнім для 7-ї та 8-ї мод.

Подальші дослідження повинні стосуватись реалізації пристрою контролю та системи зв'язку розподілених компонентів вимірювання із системою збору та аналізу даних.

Таблиця 1 - Зміна власних частот ультразвукових коливань в стінці трубопроводу діаметром 273 мм та товщиною стінки 10 мм

Номер моди	Частота мод в стінці труб без напружень, Гц	Частота мод в стінці труб з напруженнями, Гц	Напруження, МПа	Відносні переміщення, мкм/м
1	2499779	2499828	524	1243
2	2499801	2499871	524	1243
3	2499827	2499920	524	1243
4	2499941	2499976	524	1243
5	2500012	2500034	524	1243
6	2500018	2500044	524	1243
7	2500079	2500096	524	1243
8	2500138	2500168	524	1243
9	999869.0	999700.8	354	834
10	999903.1	999804.2	354	834
11	999925.3	999851.1	354	834
12	999984.6	999939.3	354	834
13	1000065	1000062	354	834
14	1000082	1000085	354	834
15	1000098	1000159	354	834
16	1000150	1000195	354	834

1. Лютак І. З. *Определение напряженно-деформированного состояния трубопроводов ультразвуковыми направленными кольцевыми волнами* / И. З. Лютак. // *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*.- 2010.- № 3.- С. 25-28. 2. Лютак І. З. *Розроблення алгоритму та структури даних для обчислення параметрів поширення ультразвукових мод Лемба* / І. З. Лютак // *Науковий вісник національного лісотехнічного університету України*.- 2015.- Випуск 25.2.- С. 306-311. 3. D. M. Egle. *Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel* / D. M. Egle, D. E. Bray // *Journal of the Acoustical Society of America*. - 1976. - Vol. 60. - P. 741 – 744. - ISSN 0001-4966. 4. Johnson G. C. *Acoustoelasticity in Transversely Isotropic Materials* / G. C. Johnson, G. T. Mase // *Journal of the Acoustical Society of America*.- 1984.- Vol. 75.- p. 1741-1747. 5. King R. B. *Determination of in-plane Stress States in Plates Using Horizontally Polarized Shear Waves* / R. B. King, C. M. Fortunko // *Journal of Applied Physics*.- 1983.- Vol. 54.- p. 3027-3035. 6. Dike J. J. *Residual Stress Determination Using Acoustoelasticity* / J. J. Dike, G. C. Johnson // *Journal of Applied Mechanics*.- 1990.- Vol. 57.- Iss. 1.- p. 12-17. 7. Лютак І. З. *Модель роботи чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача* / І. З. Лютак, А. А. Мандра, І. З. Лютак, А. О. Бедзір // *Методи та прилади контролю якості*. – 2011. – № 27. – С. 27 - 32.- ISSN 1993-9981. 8. Mandra A.A. *Modeling of ultrasonic guided waves propagation in a waveguide with cross-section of finite size* / A.A. Mandra, I.Z. Lyutak, Z.P. Lyutak // *Journal Of Hydrocarbon Power Engineering*, 2014.- v. 1, iss. 1, Pages 58 – 65. 9. Лютак І. З. *Підхід до проектування програмного забезпечення для розподіленої системи контролю якості ґрунтових вод* / І. З. Лютак // *Екологічна безпека та збалансоване ресурсоко-ристування. Спеціальний випуск*.- 2014.- С. 40-44. 10. Gavrić L. J.

Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique / L. J. Gavrić // *Sound and Vib.* - 1995. - №185(3). - P. 531 - 543. - ISSN 0022-460X. 11. Wilcox P. *Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section* / P. Wilcox, M. Evans, O. Diligent, M. Lowe, P. Cawley // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* - 2002. - Vol. 21. - P. 203 - 210. - ISSN 0003-6951. 12. *Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Comsol версія 3.5a*. - COMSOL Inc., 2009. - 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM) 12 см. - Системні вимоги: Pentium-266; 32 Mb RAM; DVD-ROM Windows 98/2000/NT/XP.- Назва з титул. екрану. 13. Fong K. L. J. *A study of curvature effects on guided elastic waves* / K. L. J. Fong. - PhD thesis. Imperial College London, 2005. – 209 p. 14. Lowe, M.J.S. *Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media* / M.J.S Lowe // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Fr. Contr.*- 1995.- 42.- (4).- p. 525-542. 15. И. А. Викторов. *Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике*. М.: Наука.- 1966.- 168 с. 16. Rose J. L. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press.- 1999.- 476 p. 17. Wong T. E. *The acoustoelastic response of a textured material during elastic-plastic deformation* / T. E. Wong and G. C. Johnson // *Metallurgical and Materials Transactions A*.- 1990.- Volume 21.- Number 11.- p. 3011-3019.- DOI: 10.1007/BF02647221. 18. S. Rapps, E.J. Weyuker, *Selecting software test data using data flow information*, *IEEE Trans. Software Eng. SE-20* (No. 4) (1995) 385–403.

Поступила в редакцію 22.12.2015р.

Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Юрчишин В. М., докт. техн. наук, проф. Сучков Г. М.