

УДК 620.179

ОЦІНКА ВТРАТ ЕНЕРГІЇ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ ЗА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ В СЕРЕДОВИЩІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

М. О. КАРПАШ, Т. Т. КОТУРБАШ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Запропоновано спосіб оцінки втрат ультразвукових коливань під час безконтактного ультразвукового контролю в середовищі природного газу, який враховує фізичні та геометричні параметри середовища розповсюдження ультразвуку, об'єкта контролю для вибору матеріалу п'єзоперетворювача та узгоджувальних шарів. Він дає змогу оцінити вплив фізичних параметрів середовища та об'єкта контролю (температура, тиск, склад, матеріал, товщина) на втрати ультразвукового сигналу для вибору їх оптимального значення. Оцінено втрати ультразвукового сигналу за одностороннього контролю товщини стінки трубопроводу для природного газу заданого складу під тиском. За результатами оцінки зроблено висновок, що під час використання узгоджувальних шарів, підібраних з врахуванням параметрів середовища, та сучасних алгоритмів обробки вимірювальної інформації, з'являється можливість проведення дефектоскопії та контролю товщини стінки магістрального газопроводу в середовищі природного газу під робочим тиском.

Ключові слова: *ультразвуковий контроль, природний газ, загасання ультразвуку.*

Питання забезпечення надійності та безпеки постачання природного газу магістральними трубопроводами набуває дедалі більшої актуальності через значний ступінь зношеності та старіння устаткування вітчизняного нафтогазового комплексу. Близько 60% магістральних трубопроводів експлуатуються понад 30 років [1]. Замінують та модернізують ці металоконструкції значно нижчими темпами, ніж це необхідно для їх безпечного використання. Основна причина виходу з ладу магістральних трубопроводів (28,9%) (для порівняння у Європейському Союзі – 15%) – внутрішні та зовнішні корозійні пошкодження [2]. Щоб визначити фактичний технічний стан трубопроводів та прогнозувати його зміну, слід періодично проводити технічну діагностику. Однією з задач технічного діагностування трубопроводів є встановлення фактичної товщини стінки трубопроводу. Як правило, бракувальним критерієм є зменшення товщини стінки труби понад 12,5% від номінального значення.

На сьогодні найпоширенішим методом визначення поточного стану магістральних газових трубопроводів є внутрішньотрубна діагностика з використанням автономних снарядів-дефектоскопів (поршнів) з магнетними давачами, що рухаються всередині труби під напором транспортованого продукту [3]. Проте згадані пристрої характеризуються низкою суттєвих недоліків, а саме: точність визначення розмірів дефектів та геометричних параметрів тіла труби не перевищує 75%; серйозні труднощі із виявленням поздовжніх дефектів, розшарувань; висока вартість та трудомісткість обстежень, складність інтерпретації та низька повторюваність результатів тощо. Окрім того, на результати вимірювання мають вплив і неоднорідні магнетні характеристики металу.

Перспективним також є електромагнетноакустичний контроль [4]. Проте поршні для цього виду контролю знаходяться на етапі впровадження в промисловість, мають високу вартість і низку технологічних обмежень.

Контактна особа: Т. Т. КОТУРБАШ, e-mail: koturbash@nung.edu.ua

Таких недоліків позбавлений метод ультразвукового контролю, що дає змогу достатньо точно визначати товщину стінок труби. Його застосовують для внутрішньотрубної діагностики під час контролю нафтопроводів, де транспортована нафта служить контактним середовищем (КС) [3, 5]. У газопроводах як КС іноді використовують водяний корок, проте це можливо тільки на відносно коротких ділянках трубопроводів. Основними проблемами застосування ультразвукового контролю під час внутрішньотрубної діагностики є значна втрата ультразвукової енергії на межі поділу середовищ [6, 7] і, як наслідок, низьке співвідношення корисний сигнал/шум. Для їх подолання необхідно врахувати особливості середовища та правильно підібрати узгоджувальні шари перетворювача, призначеного для безконтактного контролю [8, 9].

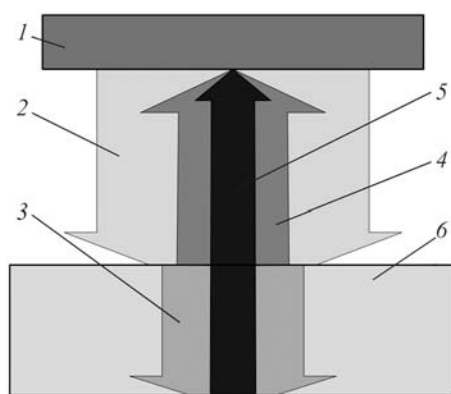
Припускають [3, 9], що використання ультразвукового контролю для внутрішньотрубною діагностування стінок трубопроводів є цілком здійсненою задачею, але для цього необхідно вдосконалити конструкції п'єзоперетворювачів та методику проведення.

Мета роботи – розробити спосіб оцінки втрат енергії ультразвукового сигналу під час внутрішньотрубною ультразвукового контролю товщини стінки трубопроводу в середовищі природного газу з урахуванням фізичних параметрів середовища, об'єкта контролю (ОК) та п'єзоперетворювача. Основна ідея – як КС під час ультразвукового контролю виступатиме природний газ під робочим тиском, який може досягати 8 МПа. Зокрема, запропоновано використати те, що природний газ під тиском має більший акустичний імпеданс та менший коефіцієнт зникання звукових хвиль [10], що може значно зменшити втрати енергії ультразвукового сигналу під час його поширення через КС та на межах поділу середовищ [11–13]. Оцінка рівня втрат сигналу в акустичному тракті під час ультразвукового контролю з урахуванням згаданих властивостей КС (природного газу під тиском) дасть можливість правильно підібрати матеріали для виготовлення узгоджувальних шарів п'єзоперетворювача та розрахувати їхні геометричні розміри, визначити необхідну потужність зондувального ультразвукового сигналу.

Під час контролю стінок труби за одностороннього доступу до внутрішньої поверхні сталевому трубопроводу в КС (рис. 1) ультразвуковий сигнал зазнає значних втрат на межах поділу середовищ п'єзоелемент/контактне середовище (ПЕ/КС), КС/ОК та внаслідок зникання під час поширення в КС у прямому та зворотному напрямках.

Рис. 1. Схема проходження ультразвукової хвилі: 1 – п'єзоелектрична пластина; 2 – падаюча хвиля; 3 – хвиля, що пройшла в тіло труби; 4, 5 – хвиля відбита від внутрішньої та зовнішньої поверхонь стінки труби, відповідно; 6 – стінка труби.

Fig. 1. Ultrasound oscillation propagation scheme: 1 – piezo electric plate; 2 – falling wave; 3 – transmitted wave in the in pipe body; 4 – ultrasound wave reflected from the inner surface of pipe wall; 5 – ultrasound wave reflected from the outer surface of pipe wall; 6 – pipe wall.



Враховуючи те, що одне із середовищ газове, а напрямок поширення хвилі перпендикулярний до межі поділу середовищ, розглядали тільки однонаправлені плоскі повздовжні хвилі [6, 14]. Вважатимемо, що поперечні хвилі в достатньому наближенні не виникатимуть, і тому скористаємось спрощеними моделями для

розрахунку коефіцієнта проходження та відбиття ультразвукових коливань на межі поділу двох середовищ [15], що часто використовують для вирішення задач безконтактного ультразвукового контролю [6–8].

Втрати енергії ультразвукової хвилі під час контролю можна записати так:
– для акустичних коливань, відбитих від внутрішньої поверхні стінки труби (dB):

$$N_1 = T_{11} + A_1 + R_1 + A_1 + T_{12}, \quad (1)$$

де T_{11} – втрати енергії ультразвукової хвилі на межі поділу ПЕ/КС; A_1 – зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в КС; R_1 – втрати енергії відбитої хвилі на межі КС/ОК (внутрішня поверхня стінки труби); T_{12} – втрати енергії ультразвукової хвилі на межі поділу КС/ПЕ;

– для акустичних коливань, відбитих від зовнішньої поверхні стінки труби (dB):

$$N_2 = T_{11} + A_1 + T_{21} + A_2 + R_2 + A_2 + T_{22} + A_1 + T_{12}, \quad (2)$$

де T_{21} – втрати енергії хвилі на межі КС/ОК (внутрішня поверхня стінки труби); A_2 – зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в ОК; R_2 – втрати енергії відбитої хвилі на межі ОК (зовнішня поверхня стінки труби)/зовнішнє середовище (повітря); T_{22} – втрати енергії хвилі на межі ОК/КС (внутрішня поверхня стінки труби).

Тому втрати енергії хвилі, що пройшла на межі поділу двох середовищ (ПЕ/КС, КС/ОК), за енергетичним коефіцієнтом проникнення [14] обчислюють за формулою

$$T_{1,2} = 10 \lg \frac{4\xi}{(1+\xi)^2}, \quad (3)$$

де ξ – відношення акустичного імпедансу 2-го середовища до акустичного імпедансу 1-го.

Втрати енергії відбитої хвилі на межі поділу двох середовищ (КС/ОК та ОК/зовнішнє середовище) за коефіцієнтом відбиття за енергією [14] можна визначити так:

$$R_{1,2} = 10 \lg \left(\frac{1-\xi}{1+\xi} \right)^2. \quad (4)$$

Втрати енергії хвилі в матеріалі ОК та газоподібному середовищі встановлюють за формулою [16]

$$A_1 = -8,686 \cdot \delta \cdot h, \quad (5)$$

де δ – коефіцієнт загасання ультразвуку в матеріалі або середовищі (1/m), що залежить від частоти ультразвукових коливань; h – відстань поширення ультразвуку.

Коефіцієнт поглинання ультразвуку в газах визначають сумою коефіцієнтів поглинання, зумовлених різними чинниками [6, 10, 13]:

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_l + \alpha_{st}, \quad (6)$$

де α_r і α_l – поглинання ультразвуку, викликане в'язкими властивостями та теплопровідністю середовища, відповідно; α_{st} – коефіцієнт загасання, зумовлений поглинанням тепла, який настільки малий, що ним можна знехтувати порівняно з іншими [6].

Сумарний коефіцієнт поглинання ультразвуку у в'язкому та теплопровідному середовищі визначають за формулою Стокса–Кірхгофа [6, 10]:

$$\alpha = \alpha_l + \alpha_r = \frac{\pi^2 \cdot f^2}{2 \cdot \bar{c}^3 \cdot \rho} \left(\frac{4 \cdot \eta}{3} + \frac{\chi - 1}{C_p} \cdot K \right), \quad (7)$$

де f – частота звуку; \bar{c} – швидкість звуку; η – коефіцієнт в'язкості; ρ – густина середовища; K – коефіцієнт теплопровідності; χ – відношення питомих теплоємностей; C_p – питома теплоємність при $P = \text{const}$.

Враховуючи формули (3)–(5), можна отримати такі залежності для оцінки втрат енергії ультразвукових коливань відбитих від внутрішньої та зовнішньої поверхонь ОК, відповідно:

$$N_1 = 10 \lg \frac{4\xi_{11}}{(1+\xi_{11})^2} + 10 \lg \frac{4\xi_{12}}{(1+\xi_{12})^2} - 2 \cdot 8,686 \cdot \alpha \cdot d + 10 \lg \left(\frac{1-\xi_{21}}{1+\xi_{21}} \right)^2, \quad (8)$$

$$N_2 = 10 \lg \frac{4\xi_{11}}{(1+\xi_{11})^2} + 10 \lg \frac{4\xi_{12}}{(1+\xi_{12})^2} - 2 \cdot 8,686 \cdot \alpha \cdot d + 10 \lg \frac{4\xi_{21}}{(1+\xi_{21})^2} + 10 \lg \frac{4\xi_{22}}{(1+\xi_{22})^2} - 2 \cdot 8,686 \cdot \delta \cdot h + 10 \lg \left(\frac{1-\xi_{31}}{1+\xi_{31}} \right)^2, \quad (9)$$

де ξ_{11} і ξ_{12} – відношення акустичних імпедансів ПЕ/КС і КС/ПЕ, відповідно; ξ_{21} і ξ_{22} – відношення акустичних імпедансів КС/ОК і ОК/КС, відповідно; ξ_{31} – відношення акустичних імпедансів ОК/зовнішнього середовища (повітря); d – відстань поширення ультразвуку в КС.

Акустичний імпеданс середовища можна знайти за формулою [12]

$$Z = \rho \cdot \bar{c}. \quad (10)$$

Величини, що входять у формули (9) та (10), характеризують стан газу, залежать від його складу, тиску та температури, і їх визначають за відомими фізичними залежностями [17]. Наведені [17] експериментальні та статистичні відомості стосовно вуглеводнів є найновіші в цій області та дають змогу розраховувати фізичні параметри природного газу залежно від його складу.

Оцінити втрати енергії ультразвукових хвиль, згідно з наведеними формулами, вирішили для повітря та природного газу з типовим складом за частоти зондувального ультразвукового сигналу $f = 1$ МГц. Моделювали за умов збільшення тиску КС від стандартного до 8 МПа; контактне середовище – природний газ; склад: метан – 93,42%, етан – 0,05%, діоксид вуглецю – 2,292%, азот – 1,79%; робоча температура – 20°C. Акустичний імпеданс матеріалу ПЕ $25 \cdot 10^6$ kg/(m²·s). Об'єкт контролю – пластина зі сталі 17Г1С завтовшки $h = 10$ мм; коефіцієнт загасання ультразвукових хвиль частотою 1 МГц $\delta = 0,46$ м⁻¹; акустичний імпеданс $46,2 \cdot 10^6$ kg/(m²·s). Відстань поширення ультразвуку в КС – 50 мм.

Необхідні для розрахунку акустичного опору середовища та коефіцієнта загасання ультразвуку фізичні характеристики газу знайшли за допомогою відповідного програмного забезпечення (Worksheet: Properties of Hydrocarbon based Gas Mixtures using the GPSA Engineering Data Book – 11 Edition) [18]. Це безкоштовне програмне забезпечення дає змогу розраховувати основні фізичні параметри природного газу, зазначені у формулах (7)–(8), для заданого хімічного складу та робочих умов, згідно з основними фізичними залежностями, наведеними в праці [17].

За результатами моделювання наведено (рис. 2) сумісну залежність втрат ультразвуку внаслідок загасання в КС від частоти ультразвукових коливань та тиску КС. Як бачимо, зі збільшенням

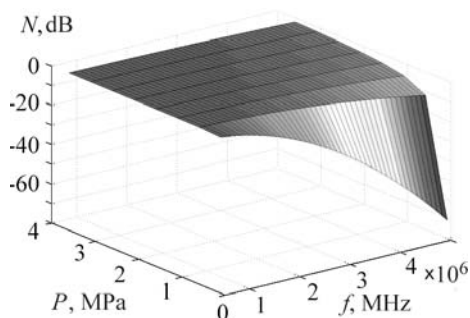


Рис. 2. Поверхня втрат енергії ультразвуку під час загасання в КС залежно від тиску КС та частоти ультразвукових променів.

Fig. 2. Surface of ultrasound oscillation energy losses due to its attenuation in propagation medium in relation to medium pressure and ultrasound frequency.

тиску КС втрати через загасання ультразвуку значно зменшуються. За значень тиску КС понад 3 МПа втрати енергії в результаті загасання в КС незначні (~ 2 dB), а їх значення несуттєво залежать від частоти ультразвуку. Врахувавши спрощення, що частота ультразвукових коливань не впливає на втрати енергії ультразвуку під час проходження меж поділу середовищ, можна стверджувати, що під час ультразвукового контролю за збільшеного тиску КС (понад 3 МПа) можна вибирати частоту ультразвукових коливань, згідно з вимогами до матеріалу ОК, без урахування фізичних властивостей КС.

Наведено (рис. 3) втрати енергії ультразвуку під час проходження межі поділу ПЕ/КС та КС/ОК через тиск контактної середовища за частоти 1 МГц, а також (рис. 4) сумарну залежність втрат енергії ультразвуку під час поширення в середовищі від тиску цього середовища для ультразвукової хвилі, відбитої від внутрішньої та зовнішньої стінок труби, відповідно.

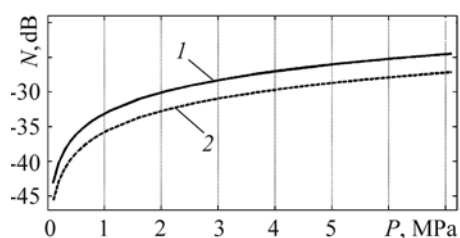


Рис. 3. Fig. 3.

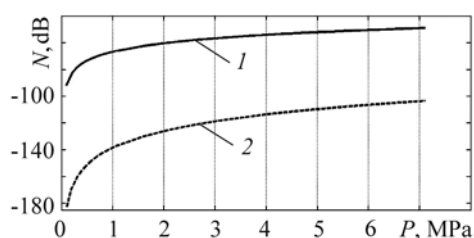


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 3. Втрати енергії ультразвуку під час проходження межі поділу середовищ залежно від тиску середовища поширення (для природного газу): 1 – ПЕ/КС; 2 – КС/ОК.

Fig. 3. Ultrasound oscillation energy loss when passing the medium interfaces in relation to propagation medium pressure (natural gas): 1 – piezo electric element/propagation medium; 2 – propagation medium/control object.

Рис. 4. Втрати енергії ультразвуку залежно від тиску КС: 1 – для ультразвукових коливань, відбитих від поверхні внутрішньої стінки труби; 2 – зовнішньої стінки труби.

Fig. 4. Ultrasound oscillation energy loss in relation to propagation medium pressure (natural gas): 1 – ultrasound wave reflected from the inner surface of the object; 2 – ultrasound wave reflected from the outer surface of the object.

Як бачимо з отриманих графічних залежностей, зі збільшенням тиску середовища поширення ультразвуку суттєво зменшуються втрати енергії ультразвукової хвилі під час проходження межі поділу середовищ. Це відбувається через збільшення акустичного імпедансу КС зі зростанням тиску і, відповідно, кращого узгодження акустичних імпедансів середовищ, що контактують. Внаслідок цього, а також за рахунок зменшення коефіцієнта загасання ультразвуку в КС зі збільшенням тиску, отримуємо суттєве зменшення втрат енергії ультразвукових коливань під час ультразвукового контролю.

Виконані розрахунки втрати енергії ультразвукових коливань для п'єзоперетворювача, що працює в КС за нормальних умов, становлять $N_{1,0} = -91,89$ dB та $N_{2,0} = -183,53$ dB. Тиск, за якого відбувається внутрішньотрубна діагностика за допомогою поршневого снарядів, зазвичай становить 70... 80% від робочого, тобто 4...5 МПа. Втрати енергії ультразвукових коливань для п'єзоперетворювача без узгоджувального шару, що працює в КС під тиском 4 МПа, менші майже у 1,65 рази і становлять $N_{1,4} = -53,98$ dB та $N_{2,4} = -113,21$ dB, відповідно.

Попередні дослідження [8, 19] безконтактного способу ультразвукового контролю товщини металоконструкцій за двостороннього доступу дають змогу стверджувати, що підбір відповідного узгоджувального шару з врахуванням акустичного імпедансу середовища поширення ультразвуку і матеріалу ПЕ та від-

повідних умов середовища додатково зменшить втрати енергії ультразвукової хвилі на межі поділу ПЕ/середовище. Раніше [19] на практиці вдалось досягнути зменшення втрат енергії ультразвукового імпульсу на 32 дВ для межі поділу ПЕ/КС та повітря за нормальних умов шляхом врахування особливостей КС та використання узгоджувальних шарів.

Запропонований метод оцінки втрат енергії (врахування параметрів КС, ПЕ, ОК для зменшення втрат енергії) разом зі сучасними алгоритмами обробки сигналу [20] з низьким відношенням сигнал/шум (менше одиниці), які можуть обробляти сигнали з високим рівнем загасання, дадуть можливість чітко детектувати відбиті імпульси та здійснювати дефектоскопію та/або товщинометрію стінок трубопроводу. Розроблений метод оброблення вимірювальної дефектоскопічної інформації на базі штучних нейронних мереж [21] дає змогу чітко виявляти відбиті луно-імпульси в зашумленому сигналі за співвідношення сигнал/шум менше 1 [19].

ВИСНОВКИ

Запропонований спосіб оцінки втрат енергії ультразвукового сигналу можна використовувати для різних середовищ поширення та матеріалів об'єкта контролю. Він враховує фізичні характеристики контактного середовища та матеріалу об'єкта контролю, геометричні параметри середовища поширення та об'єкта контролю (відстань поширення ультразвуку, товщину). Використовуючи цей спосіб, можна здійснювати вибір параметрів п'єзоперетворювача та узгоджувальних шарів, проводити попередню оцінку впливу характеристик середовища поширення на втрати енергії під час контролю.

Цей спосіб оцінки втрат реалізували в програмному середовищі Matlab, що дає змогу вносити необхідні зміни в модель, для врахування конкретних особливостей узгоджувального шару, середовища поширення ультразвуку та об'єкта контролю. Він дає можливість розраховувати втрати для будь-якого середовища поширення (з відповідними розрахунками фізичних параметрів конкретного середовища) залежно від чинників впливу (тиск, температура, хімічний склад середовища поширення, відстань до об'єкта контролю, його матеріал та товщина тощо) оптимальні конфігурації цих параметрів.

Отриманий результат оцінки втрат енергії ультразвукових коливань з підвищенням тиску контактного середовища (природного газу) до значень робочих тисків під час внутрішньотрубно́ї діагностики дає змогу зробити висновок, що зростання тиску позитивно впливає на зменшення втрат ультразвукових сигналів. Відповідно реалізація поршнів з п'єзоелектричними перетворювачами, які використовуватимуть природний газ як контактне середовище, суттєво спростить вимоги щодо зниження робочого тиску магістральних газопроводів для внутрішньотрубно́ї діагностики до максимально можливого, згідно з вимогами безпеки, і підвищить точність контролю товщини та ймовірність виявлення дефектів порівняно з магнетними методами контролю.

РЕЗЮМЕ. Предложено способ оценки потерь ультразвуковых колебаний при бесконтактном ультразвуковом контроле, который учитывает физические и геометрические параметры среды распространения ультразвука и объекта контроля для выбора материала пьезопреобразователя и согласующих слоев. Он позволяет оценить влияние физических параметров среды и объекта контроля (температура, давление, состав, материал, толщина) на потери ультразвукового сигнала для выбора их оптимального значения. Произведено оценку потерь ультразвуковых колебаний при одностороннем контроле толщины для природного газа заданного состава под давлением. По результатам оценки сделано вывод, что при использовании согласующих слоев, подобранных с учетом параметров среды, и современных алгоритмов обработки измерительной информации, появляется возможность проведения дефектоскопии и контроля толщины стенки магистрального газопровода в среде природного газа под рабочим давлением.

SUMMARY. A method of estimating the loss of ultrasonic oscillations in the non-contact ultrasonic inspection, which takes into account the physical and geometrical parameters of the medium of propagation of ultrasound and testing object to select the transducer material and the matching layers, is proposed. It allows us to evaluate the influence of physical parameters of the medium and the tested object (temperature, pressure, composition, material, thickness) on the ultrasonic signal losses to select their optimal value. The losses of ultrasonic oscillations in unilateral testing of the thickness in the natural gas with specified composition under pressure were estimated. The evaluation result suggests that the combined use of the matching layers, chosen within the medium parameters, and advanced algorithms for processing measurement data, allows us to conduct the defect detection and wall thickness inspection of the gas pipeline in the medium of natural gas under the working pressure.

1. *Технічна діагностика і ресурс конструкції після довготривалої експлуатації* / О. П. Остап, В. М. Учанин, І. М. Андрейко, І. Р. Маковійчук // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 1999. – Вип. 4. – С. 3–8.
2. *Мазур І. І., Іванцов О. М.* Безопасность трубопроводных систем. – М.: ИЦ “ЕЛИМА”, 2004. – 1104 с.
3. *Teitsma A.* Technical Assessment Report Technology Assessment For Delivery Reliability For Natural Gas. – Gas Technology Institute, 2004.
4. *Канайкин В. А., Чабуркин В. Ф., Пахомов В. П.* Опыт и перспективы мониторинга и технического состояния МГ на основе внутритрубной диагностики // Газовая промышленность. – 2006. – № 10. – С. 18–21.
5. *Teitsma A.* Gas Coupled Ultrasonic Pipeline Inspection. – GRI-03/0158. – 2003.
6. *Stoessel R.* Air-Coupled Ultrasound Inspection as a New Non-Destructive Testing Tool for Quality Assurance. – University of Stuttgart, 2004.
7. *Wright W. M. D. and Hutchins D. A.* Air-coupled ultrasonic testing of metals using broadband pulses in through-transmission // Ultrasonics. – 1999. – 37 (1). – P. 19–22.
8. *Рибіцький І. В.* Математична модель узгоджуючого шару п’езоперетворювача та розрахунок втрат енергії акустичних коливань при безконтактному способі вимірювання товщини // Методи та прилади контролю якості. – 2007. – № 18. – С. 40–45.
9. *Gas-Coupled, Pulse-Echo Ultrasonic Crack Detection and Thickness Gaging* / C. M. Fortunko, R. E. Schramm, C. M. Teller et al. // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (July–August 31–4, 1994). – USA: Snowmass Village, 1994. – 14. – P. 951–958.
10. *Daniel R. Raichel.* The science and applications of acoustics. – Springer Science + Business Media, 2006.
11. *Chimentii D. E. and Fortunko C. M.* Characterization of Composite Prepreg with Gas-Coupled Ultrasonics // Ultrasonics. – 1994. – 32 (4). – P. 261–264.
12. *Wickramasinghe H. K. and Petts C. R.* Acoustic Microscopy in High-Pressure Gasses // Ultrasonics Symposium (November 5–7, 1980). – USA: Boston, 1980. – P. 668–672.
13. *Benny G., Hayward G., and Chapman R.* Beam profile measurements and simulations for ultrasonic transducers operating in air // Acoustical Society of America. – 2000. – 107, № 4. – P. 2089–2100.
14. *Грінченко В. Т., Вовк І. В., Маціпура В. Т.* Основы акустики: навч. пос. – К.: Наук. думка, 2007. – 640 с.
15. *Krautkramer J. and Krautkramer H.* Ultrasonics Testing of Materials // 4th fully revised edition. – Berlin: Springer-Verlag, 1990.
16. *Агранат Б. А., Дубровин М. Н., Хавский Н. Н.* Основы физики и техники ультразвука. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
17. *GPSA Engineering databook: Edition 12.* – Gas Processors Suppliers Association, 2004. – Vol. 1,2.
18. *Worksheet to calculate Properties of Hydrocarbon based Gas Mixtures using the GPSA Engineering Data Book (Edition 11),* Dennis Kirk Engineering. – 1998.
19. *Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О.* Експериментальна перевірка можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для підвищення чутливості безконтактного ультразвукового способу контролю товщини матеріалів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2008. – Вип. 13. – С. 152–160.
20. *Котурбаши Т. Т., Карпаш М. О.* Аналіз методів підвищення чутливості безконтактного акустичного методу контролю матеріалів та виробів // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 25. – С. 21–27.
21. *Патент на винахід UA 87910.* Спосіб детектування сигналів із високими значеннями шуму / М. О. Карпаш, О. М. Карпаш. – Опубл. 25.08.2009; Бюл. № 16.

Одержано 14.03.2011