

УДК 620.179

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА БЕЗКОНТАКТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ СТІНКИ ГАЗОПРОВОДІВ У ПРОЦЕСІ ВНУТРІШНЬОТРУБНОЇ ДІАГНОСТИКИ

*Т. Т. Котурбаши, М. О. Карнаш, І. В. Рибіцький*

*Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська 15, м. Івано–Франківськ, 76019, тел: (03422) 4–20–02,  
e–mail: koturbash@nung.edu.ua*

*Наведено результати експериментального дослідження щодо підтвердження можливості здійснення безконтактного ультразвукового методу контролю товщини стінки газопроводів у процесі внутрішньотрубної діагностики. Дослідження проводилось за умов, що близькі до реальних робочих умов запуску снаряду для внутрішньотрубної діагностики (газ азот за тиску 5,0 МПа). В ході експерименту було використано звичайний комерційно доступний п'єзоелектричний перетворювач з робочою частотою 2,5 МГц. Підвищення тиску середовища та застосування погоджувальних елементів дозволило зменшити втрати енергії ультразвукового імпульсу на 18 дБ на границях розділу п'єзоелектричний перетворювач / середовище. Завдяки обробці отриманого сигналу в середовищі MATLAB процедурами згладжування та фільтрування вдалось детектувати серію донних луно–імпульсів та визначити товщину досліджуваних зразків з похибкою, що не перевищувала 5%.*

*Ключові слова: внутрішньотрубна діагностика, луно–імпульс, контроль, ультразвуковий метод, п'єзоелектричний перетворювач.*

*Приведены результаты экспериментального исследования по подтверждению возможности осуществления бесконтактного ультразвукового метода контроля толщины стенки газопроводов в процессе внутритрубной диагностики. Исследование проводилось в условиях, близких к реальным рабочим условиям запуска снаряда для внутритрубной диагностики (газ азот при давлении 5,0 МПа). В ходе эксперимента были использованы обычный коммерчески доступный пьезоэлектрический преобразователь с рабочей частотой 2,5 МГц. Повышение давления среды и применение согласительных элементов позволило уменьшить потери энергии ультразвукового импульса на 18 дБ на границах раздела пьезоэлектрический преобразователь / среда. Благодаря обработке полученного сигнала в среде MATLAB процедурами сглаживания и фильтрации удалось детектировать серию донных эхо–импульсов и определить толщину исследуемых образцов с погрешностью, что не превышала 5%.*

*Ключевые слова: внутритрубная диагностика, эхо–импульс, контроль, ультразвуковой метод, пьезоэлектрический преобразователь.*

*The article contains results of experimental studies to confirm the possibility of non–contact ultrasonic method of controlling the wall thickness of pipelines in the inner–pipe diagnosis. The study was conducted under conditions that are close to actual operating conditions for running pigd for inner–pipe diagnosis (nitrogen gas under pressure 5,0 MPa). During the experiment, we used conventional commercially available piezoelectric transducer at operating frequency of 2.5 MHz. Increasing pressure environment and the use of matching elements reduced the energy loss of ultrasonic pulse by 18 dB at the border section piezoelectric transducer / environment. Due to the received signal processing in MATLAB environment procedures, smoothing and filtering, we could detect a series of bottom–echo pulse and determine the thickness of samples with an error not exceeding 5%.*

*Key words: internaltube diagnostic, echo–impulse control, ultrasonic method, piezoelectric transducer.*

Транспортування природного газу у вітчизняному нафтогазовому комплексі здійснюється за допомогою складної розгалуженої системи трубопроводів високого, середнього та низького тиску. Значна частина

трубопроводів у вітчизняній газотранспортній системі відпрацювала свій нормативний ресурс та підлягає заміні [1]. Проте заміна та модернізація трубопроводів, в тому числі, магістральних, здійснюється значно нижчими

темпами, ніж це необхідно для безпечної експлуатації газотранспортних систем в силу значного об'єму та вартості робіт. Крім того, безпечна експлуатація трубопроводів неможлива без періодичного контролю їх технічного стану на предмет виявлення короїзії та короїзійних пошкоджень, тріщин та інших дефектів стінок. Переважна частина трубопроводів мають підземне розташування, тому найбільш придатним способом контролю технічного стану є використання інтелектуальних автономних снарядів товщиномірів/дефектоскопів, що рухаються у внутрішній порожнині трубопроводу з продуктом що транспортується [2].

Найбільш поширеним та комерційно доступним методом внутрішньотрубної діагностики є використання інтелектуальних поршнів з магнітними перетворювачами, що реалізують дефектоскопію методом реєстрації розсіяння магнітного потоку (РМП). Одним з суттєвих недоліків названого методу та пристроїв, що його реалізують, є низка точність визначення залишкової товщини стінки трубопроводу, на рівні 10% від її товщини з довірчим рівнем 80% (за нормативного значення бракувального критерію 12,5% від товщини [3]), та складність інтерпретації отриманих результатів, особливо за умов відсутності дійсних значень товщини стінок трубопроводу на всьому інтервалі проведеного вимірювання [4]. При цьому пристрої, що реалізують згаданий метод, потребують попереднього калібрування на конкретному об'єкті контролю, оскільки їхні покази залежать від матеріалу, з якого виготовлений об'єкт контролю, та анізотропії його магнітних властивостей.

Вказаних недоліків позбавлений ультразвуковий метод неруйнівного контролю товщини стінки трубопроводу. Проте використання ультразвукового методу, незважаючи на його значно вищу точність, можливість виявлення дефектів, глибини їх залягання та інші суттєві переваги (незалежність від матеріалу контролю, можливість контролю неметалічних трубопроводів), має обмеження для газопроводів через необхідність створення акустичного контакту між перетворювачем та стінкою трубопроводу за експлуатаційних умов, що, як правило, зводиться до утворення так званої «контактної пробки», що можливо тільки на коротких прямих ділянках газопроводу [5].

Найкращим вирішенням проблеми забезпечення акустичного контакту було б використання природного газу, що вже знаходиться в трубопроводі. Проте проблема полягає в значному неспівпаданні акустичних

імпедансів контактного середовища (природного газу), об'єкту контролю та п'єзоелектричного перетворювача. Співвідношення акустичного імпедансу газу та сталі, яке становить 1,13·10<sup>5</sup>:1, приводить до значної втрати енергії ультразвукового імпульсу при проходженні границі розділу цих середовищ. Проблема також ускладнюється тим фактом, що при проведенні контролю ультразвуковий імпульс долає чотири границі розділу середовищ: перетворювач–контактне середовище, контактне середовище–об'єкт контролю у прямому і у зворотному напрямках.

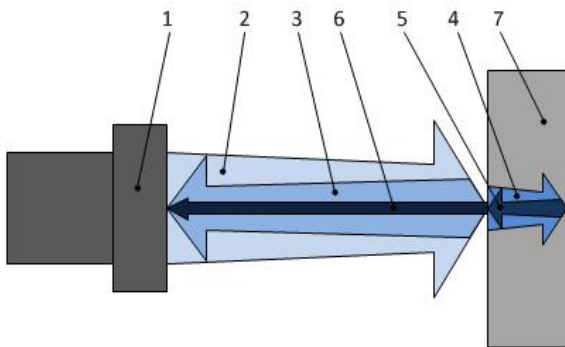
В попередніх дослідженнях [6] авторами було показано, що використання природного газу під тиском 4÷5 МПа як контактного середовища (робочий тиск для запуску інтелектуальних поршнів) дозволяє зменшити втрати енергії ультразвуку на всьому шляху його проходження в 1,6 раз порівняно з нормальними умовами (середовище природний газ, тиск атмосферний). Першим кроком на шляху реалізації запропонованого ультразвукового контролю в умовах внутрішньотрубної діагностики газопроводів є експериментальне підтвердження можливості здійснення запропонованого безконтактного ультразвукового контролю стінок трубопроводу в середовищі природного газу під високим тиском в лабораторних умовах.

Для цього було розроблено відповідну методику експериментальних досліджень, що передбачала підтвердження можливості здійснення безконтактного ультразвукового контролю зразка стінки трубопроводу при умовах, близьких до умов внутрішньотрубної діагностики газопроводів. В ході реалізації експерименту було передбачено вирішення двох завдань: апаратного – забезпечення введення ультразвукових хвиль в тіло об'єкта контролю та отримання відбиття від зовнішньої та донної поверхонь шляхом зменшення втрат енергії ультразвуку на границях переходу, та програмного – виділення корисного сигналу відбиття від донної поверхні об'єкта контролю на фоні завад та багатократних реверберацій в протекторі перетворювача.

Найбільшою складністю при використанні ультразвукового контролю в газовому середовищі є введення ультразвукової хвилі в тіло об'єкту контролю та детектування імпульсу відбиття від його донної поверхні (рис. 1). Неспівпадіння акустичних імпедансів п'єзоелектричного перетворювача та природного газу на першій границі розділу середовищ та у зворотному напрямку спричинює падіння амплітуди ультразвукового

імпульсу при його проходженні в одному напрямку на 43 дБ за нормальних умов, та на 26 дБ за умов тиску середовища рівному 5,0 МПа [6]. Використання погоджувальних елементів в конструкції п'єзоелектричного перетворювача дозволить додатково зменшити втрати енергії ультразвукового сигналу при проходженні названої границі розділу [7]. Проблема неспівпадіння акустичних імпедансів на границі розділу середовище–об'єкт контролю та у зворотному випадку, що спричиняє зменшення амплітуди ультразвукового сигналу на 46 дБ за нормальних умов, частково вирішується за рахунок збільшеного тиску середовища в умовах проведення внутрішньотрубною діагностики, при цьому втрати амплітуди сигналу зменшуються до 28 дБ за умов тиску середовища, рівному 5,0 МПа (за рахунок збільшення акустичного імпедансу середовища) [6].

Для реалізації експерименту було розроблено дослідну установку (рис. 2), що складається з камери високого тиску, ультразвукового дефектоскопа, попереднього підсилювача, осцилографа та персонального комп'ютера. У камері високого тиску розміщувались ультразвуковий перетворювач та дослідна модель стінки трубопроводу. Як газове середовище, з міркувань безпеки, було використано азот. Швидкість поширення звуку в



1 – п'єзоелектричний перетворювач; 2 – падаюча хвиля що пройшла границю розділу п'єзоелектричний перетворювач–середовище; 3 – хвиля відбита від зовнішньої поверхні об'єкта контролю; 4 – пройшовши в тіло труби хвиля; 5 – хвиля відбита від внутрішньої поверхні стінки труби, 6 – хвиля відбита від внутрішньої поверхні стінки труби та пройшовши границю розділу об'єкт контролю–середовище; 7 – об'єкт контролю

Рисунок 1 – Фізична модель ультразвукового безконтактного методу контролю

азоті дещо нижча (334 м/с), ніж у природному гаїзі (430 м/с), проте густина азоту є близькою ( $0,808 \text{ кг/м}^3$ ) із природним газом ( $0,68\text{--}0,85 \text{ кг/м}^3$ ). Акустичний імпеданс природного газу в реальних умовах проведення внутрішньотрубною діагностики (тиск 4÷5 МПа, температура –  $15\text{..}+50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) буде дещо вищий, ніж азоту за тих же умов, що в результаті ще додатково зменшить втрати енергії ультразвуку під час контролю. Подача азоту здійснювалась за допомогою балону високого тиску з редуктором та з'єднувальною трубкою. Балон заправлявся азотом в заправній лабораторії ПАТ Львівський хімічний завод. Тиск газу в експериментальній установці визначався за допомогою деформаційного стрілкового манометра з класом точності 0,25. Стравлювання тиску з експериментальної установки здійснювалось за допомогою спускного клапана–редуктора. Після досягнення робочого тиску в експериментальній установці, вона герметизувалась запірними клапанами.

За допомогою дефектоскопа DIO–562LC (S/N 04–118) здійснювалось збудження перетворювача піковою амплітудою 200 В одиничним імпульсом тривалістю 69 нс. Перетворювач розміщувався таким чином, щоб його акустична вісь буда перпендикулярна до поверхні об'єкта контролю на відстані 30 мм (рис. 2) – таким чином реалізовувався луно–імпульсний метод контролю з кутом вводу ультразвукових хвиль рівним  $90^\circ$ . Як об'єкти контролю використовувались сталі пластини діаметром 60 мм трьох значень товщини 10, 15 та 20 мм. Підсилений попереднім підсилювачем на 40 дБ та оцифрований осцилографом RIGOL DS1000E луно–імпульс в подальшому зберігався та опрацьовувався в програмному середовищі MATLAB R14.

В експерименті було використано комерційний прямий перетворювач П111–2,5 –

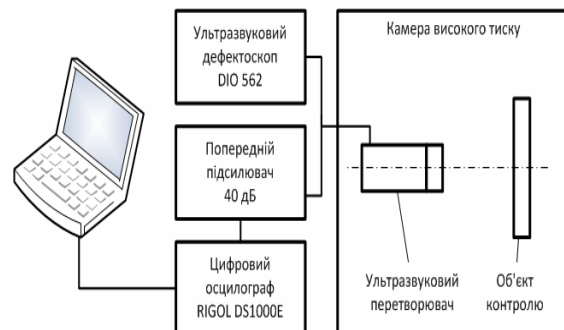


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки

K12–003 «ЛуЧ» з погоджувальним елементом власної конструкції на основі досвіду попередніх досліджень [8]. Узгодження акустичного імпедансу перетворювача було виконано шляхом використання погоджувального елемента, виготовленого із силікону, акустичний імпеданс  $1.2 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$  товщиною 0,085 мм. Це дозволило зменшити втрати енергії відбитого від зовнішньої поверхні об'єкта контролю луно-імпульсу на 18 дБ за тиску в камері рівному 5,0 МПа.

Отриманий необроблений, підсилений попереднім підсилювачем та оцифрований осцилографом сигнал з п'єзоелектричного перетворювача наведено на рис. 3. Співвідношення амплітуд сигналів від поверхневого та донного луно-імпульсів становить величину третього порядку, при цьому, як видно з рис. 3, відбиття від зовнішньої поверхні певним чином підсилюється попереднім підсилювачем тому, що амплітуда сигналу луно-імпульсу відбитого від зовнішньої поверхні об'єкта контролю значно перевищує динамічний діапазон попереднього підсилювача, що приводить до обрізання сигналу по амплітуді. Після поверхневого луно-імпульсу на рис. 3 явно не спостерігається серії донних імпульсів, тому що вони маскуються поверхневим луно-імпульсом та фоновими завадами перетворювача.

Проте серія загасаючих донних імпульсів може бути розрізнена на фоні сигналу після його фільтрування смуговим фільтром на  $1,5 \div 2,5 \text{ МГц}$  та застосування процедури

згладжування [9] (рис. 4). Після поверхневого імпульсу має місце серія донних сигналів, розташованих на однаковій відстані один від одного. Донні імпульси за амплітудою незначно перевищують власні завади перетворювача, спричинені внутрішніми відбиттями в протекторі та п'єзокерамічному елементі, та після третього донного імпульсу маскуються власними завадами перетворювача. На рис. 4 також показано отриманий часовий інтервал між послідовними третім та четвертим донними імпульсами, що рівний 3,39 мкс. Даний часовий інтервал з похибкою 1,3% відповідає товщині досліджуваного зразка 10 мм – 3,35 мкс (швидкість поширення ультразвуку в матеріалі зразка 5957 м/с, вимірювання за допомогою традиційного ультразвукового контактного методу з використанням того ж самого пезоперетворювача за нормальних умов).

На рис. 5 наведено отримані луно-імпульси для різної товщини візця. Відбиття від зовнішньої поверхні є занадто великим для підсилення без спотворення і тому спотворюється і після оброблення сигналу. За відбитим від зовнішньої поверхні сигналом є серія загасаючих донних імпульсів, розташованих один від одного на відповідних відстанях для вимірюваної товщини досліджуваного візця. Відстані між піковими значеннями донних імпульсів відповідають часу проходження ультразвуком товщини відповідного візця з похибкою, що не перевищує 5%.

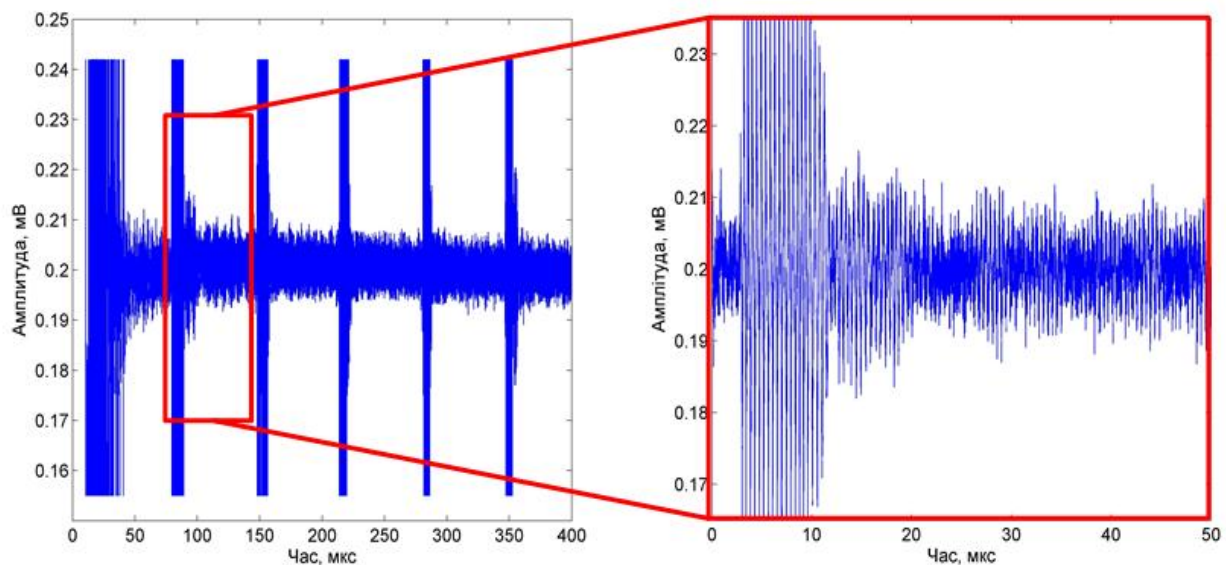
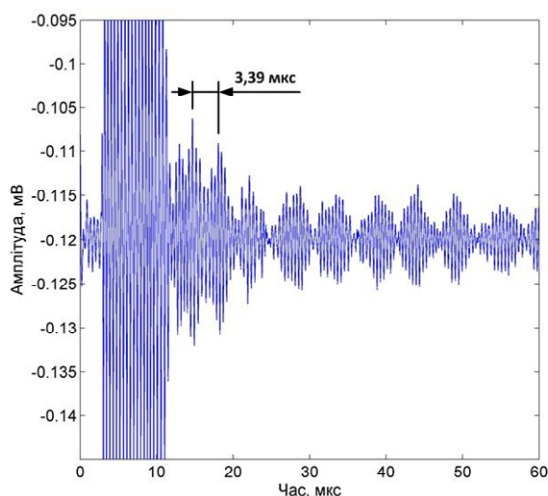
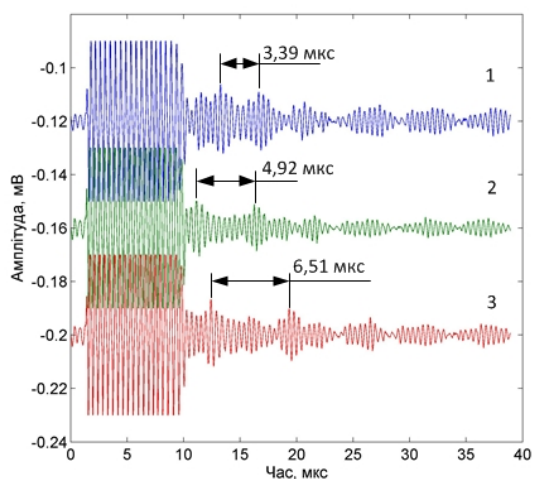


Рисунок 3 – Луно-імпульс



**Рисунок 4 – Очищений та згладжений сигнал з показаною відстанню між сусідніми донними луно-імпульсами**



*1 – для товщини 10мм; 2 – для товщини 15 мм;  
3 – для товщини 20 мм*

**Рисунок 5 – Отримані для різної товщини візря луно імпульси**

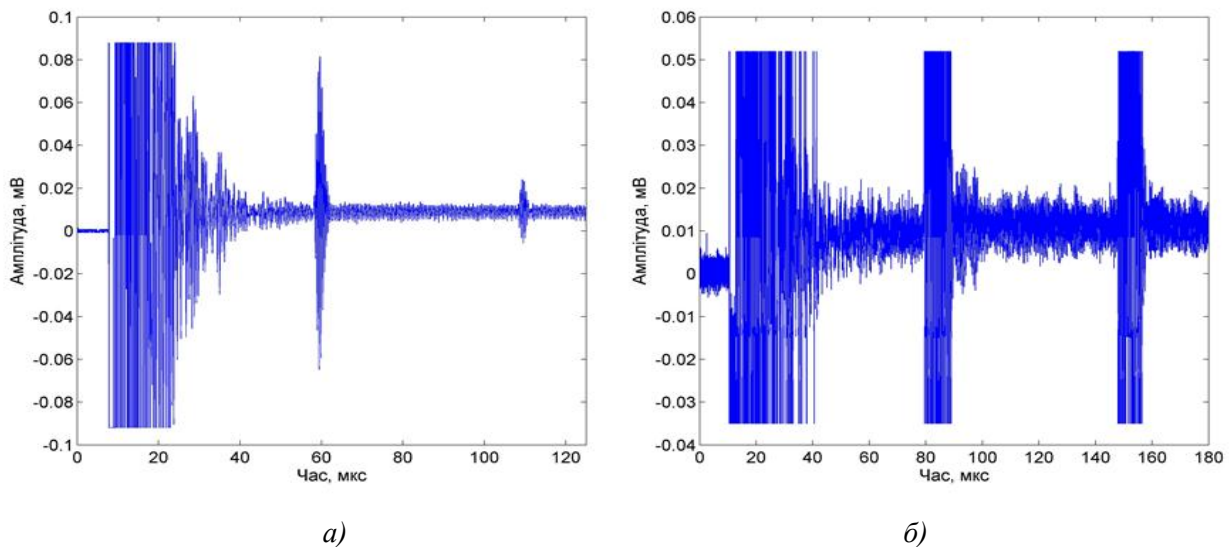
На рис. 6, а показано отриманий в ході експерименту сигнал, що складається з зондувального та першого і другого відбитих від зовнішньої поверхні об'єкта контролю луно-імпульсів при значенні надлишкового тиску середовища в камері рівному 0 МПа. Наслідком значної втрати енергії ультразвукового сигналу на границях розділу середовищ є те, що луно-імпульс від донної поверхні неможливо виділити на фоні завад перетворювача. Підвищення тиску зменшує відношення

імпедансів середовища та об'єкта контролю, та середовища і п'єзоелектричного перетворювача, що приводить до зменшення втрат енергії ультразвукового сигналу. Це дозволяє здійснити введення ультразвукового імпульсу достатньої потужності в тіло об'єкта контролю, щоб отримати відбиття від донної поверхні, за умови використання процедур обробки сигналу, рис. 6, б.

Співвідношення амплітуд сигналів луно-імпульсів від зовнішньої та донної поверхні за умов тиску 5,0 МПа склало 32 дБ. Враховуючи факт використання недосконалого технічного забезпечення (попередній підсилювач на транзисторній схемотехніці з вузьким динамічним діапазоном підсилення та перетворювача з невисокою чутливістю та низьким рівнем демпфування), в ході експерименту не вдалось отримати чітко ідентифіковані донні імпульси за значень тиску середовища нижче 5,0 МПа.

Результати проведених експериментальних досліджень узгоджуються з результатами, отриманими в попередніх досліджень, виконаних за умови використання генератора з піковою напругою 360 В та попереднього підсилювача з коефіцієнтом підсилення 54 дБ [10].

Значну проблему для такого варіанту луно-імпульсного методу контролю створюють багатократні відбиття ультразвукового сигналу між поверхнею перетворювача та поверхнею об'єкта контролю та внутрішні відбиття в стінці об'єкта контролю, що зумовлюють високий рівень завад. Згадані багатократні відбиття приводять до накладання луно-імпульсів та потребують значного інтервалу часу для їх загасання та усунення негативного ефекту накладання тривалістю у кілька мілісекунд. Це привело до вимушеного зменшення частоти слідування зондувальних імпульсів в ході експерименту до  $20 \div 30$  Гц, що недостатньо для проведення повноцінного внутрішньотрубного контролю. Уникнути явища накладання можна шляхом використання системи перетворювачів, яка складатиметься з генеруючого та приймаючого, останній слід розташовувати таким чином, щоб він не приймав відбитий від зовнішньої поверхні об'єкта контролю імпульс. В такому випадку частоту зондувальних імпульсів можна збільшити до необхідної для проведення ультразвукового контролю за умов руху снаряду-дефектоскопу під напором продукту в середині трубопроводу.



а) тиск в камері 0 МПа; б) тиск в камері 5,0 МПа

Рисунок 6 – Сигнал отриманий для різних значень тиску середовища в камері

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеного експериментального дослідження вдалось підтвердити можливість здійснення безконтактного ультразвукового методу контролю товщини стінки газопроводів у процесі внутрішньотрубної діагностики. Зокрема було обгрунтовано можливість здійснення такого контролю за умов, що близькі до реальних робочих умов запуску снаряду для внутрішньотрубної діагностики (тиск середовища 5,0 МПа). В ході експерименту було використано звичайний комерційно доступний п'єзоперетворювач з робочою частотою 2,5 МГц. Підвищення тиску середовища та застосування погоджувальних елементів дозволило зменшити втрати енергії ультразвукового імпульсу на границях розділу середовищ, чітко детектувати, завдяки обробці отриманого сигналу в середовищі MATLAB процедурами згладжування та фільтрування, серію донних луно-імпульсів та визначити товщину досліджуваних зразків.

В подальшому планується удосконалити еспериментальну установку з метою позбавлення недоліків, виявлених в ході проведення експерименту (спотворення сигналу луно імпульсу відбитого від зовнішньої поверхні, низька чутливість та демпфування пезоперетворювача). З цією метою планується використати часозалежне попереднє підсилення, а також декілька п'єзоелектричних перетворювачів від кількох виробників різних діапазонів резонансних частот та первинний

перетворювач власної конструкції з інтегрованим погоджувальним елементом, розрахованим на відповідний тиск та властивості середовища.

1. Остап О. П. Технічна діагностика і ресурс конструкцій після довготривалої експлуатації / О. П. Остап, В. М. Учанін, 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. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1104 с. 3. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов: РД 12–411–01 : 2001. – М.: – Федеральний горний и промышленный надзор России (Госгортехнадзор России), 2002. – 49 с. 4. Albert Teitsma. Technology assessment for delivery reliability for natural gas – inspection technologies – Technical report, DOE No. DE–FC26–02NT41647, Pipeline Inspection Technology, Gas Technology Institute Des Plaines, IL, 2004. – 270p. 5. Данилин К. А. Новые технологические схемы проведения внутритрубної діагностики газонефтепродуктопроводов. / К. А. Данилин, В. А. Пилуй, В. Н. Дегтярьов // Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно–практической конференции. Том II. Отв. редактор В. В. Живаева. – Самара: Самар. гос. техн. ун–т, 2010. – 284 с. 6. Карпаш М. О.

Оцінка втрат енергії акустичних коливань за ультразвукового контролю в середовищі природного газу / М. О. Карпаш, Т. Т. Котурбаши // Фізико-хімічна механіка матеріалів, – 2011. – №6. – С. 122–128. 7. Subash Jayaraman. Progress in air-coupled ultrasound / Subash Jayaraman, Dominik Pellkofer, Ian Lucas, Michal Bezdek, Bernhard Tittmann // Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security. – 2007. – Vol. 6531. – P. 234–249. 8. Карпаш О. М. Експериментальна установка для безконтактного акустичного контролю елементів металокопструкції після корозійного пошкодження / О. М. Карпаш, Т. Т. Котурбаши, І. В. Рибіцький, М. О. Карпаш, А. В.

Яворський. // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т., Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». – №8. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2010 – Т. 2. – С. 531–535. 9. Signal Processing Toolbox. Users Guide. MathWorks Version 5.1. – 2001. – 324 p. 10. Shuttleworth P. Gas Coupled Ultrasonic Measurement of Pipeline Wall Thickness / P. Shuttleworth, J. Maupin, A. Teitsma // Transactions of the ASME, – 2005. – Vol. 127. – P. 290–294.

**Поступила в редакцію 03.05.2012 р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук., проф. Карпаш О. М.**