

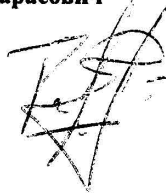
УДК 620.179.1 (043)

К 73

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Котурбаш Тарас Тарасович**



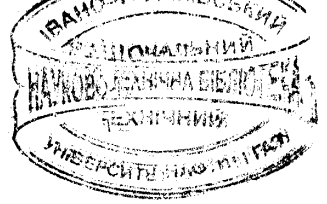
УДК 620.179

**УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ  
ВНУТРІШНЬОТРУБНОЇ ДІАГНОСТИКИ МАГІСТРАЛЬНИХ  
ТРУБОПРОВІДІВ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2013



Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Технічної діагностики та моніторингу» в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Карпаш Максим Олегович**  
Івано-Франківський національний технічний університет,  
директор Науково-дослідного інституту нафтогазової  
енергетики та екології

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Яцун Михайло Андрійович**  
Національний університет „Львівська політехніка”,  
професор кафедри електричних машин і апаратів

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Учанін Валентин Миколайович**  
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,  
старший науковий співробітник

Захист відбудеться 22 лютого 2013р. о 10<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 20.052.03 при Івано-Франківському національному технічному  
університеті нафти і газу за адресою:  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З рукописом дисертаційної роботи можна ознайомитись у бібліотеці Івано-  
Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-  
Франківськ, вул. Карпатська, 15)

Автореферат розісланий 18.01 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, професор

Дранчук М.М.

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Питання забезпечення надійності та безпеки постачання природного газу магістральними трубопроводами набуває дедалі більшої актуальності через значний ступінь зношеності та старіння устаткування вітчизняного нафтогазового комплексу. Потреба в нових технологіях для моніторингу технічного стану трубопроводів спричинена як ризиком виникнення аварійних ситуацій, так і необхідністю забезпечення цілісності трубопроводу з метою надійного постачання енергоносіїв.

Проведення внутрішньотрубної технічної діагностики включено в один з двох обов'язкових основних кваліфікаційних процесів Системи керування цілісності трубопроводу (PIMS), що є основою міждержавного стандарту ГОСТ СЕН/ТС 15173. Проте відсутність нормативного забезпечення щодо проведення внутрішньотрубної діагностики в Україні призводить до неоднозначності щодо вимог проведення регулярного технічного обстеження існуючих трубопроводів, створює значні труднощі щодо розроблення методик проведення внутрішньотрубної діагностики та оцінки її результатів.

Основною задачею технічного діагностування трубопроводів є встановлення фактичної товщини стінки трубопроводу та виявлення дефектів типу порушення суцільності. Найбільш ефективним для проведення робіт з технічного діагностування за всією довжиною трубопроводу та з мінімальними простоями в роботі трубопроводу, є здійснення внутрішньо-трубної діагностики із використання інтелектуальних поршнів, що рухаються під напором транспортованого продукту. Проте існуючі інтелектуальні магнітні поршні мають низьку точність ( $\pm 10\%$ ) та достовірність контролю (80%), а поршні, що реалізують акустичні методи контролю, практично непридатні для застосування в газопроводах, оскільки потребують наявності контактної середовища між перетворювачем та стінкою трубопроводу. У зв'язку з цим, можна зробити висновок, що внутрішньо-трубна діагностика з використанням поршнів, потребує удосконалення, для забезпечення вищої достовірності та точності контролю.

Аналіз існуючих методів та засобів контролю показав, що найбільш придатним з точки зору необхідних контрольованих параметрів та достовірності контролю є акустичний ультразвуковий метод контролю, котрий потребує удосконалення, для забезпечення можливості його використання у газопроводах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася у рамках ДЗ/467-2009 «Розроблення нового методу безконтактного акустичного контролю геометричних характеристик металоконструкцій» Міносвіти та науки № 0109U006324, Д-11-11-П «Розроблення новітніх неруйнівних методів діагностики та моніторингу деградації матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації» Міносвіти та науки №0111U002999, ГМ-9/2010 «Розроблення національних стандартів, гармонізованих з міжнародними стандартами серії ISO 13628 (Проектування та експлуатування систем підводного видобутку вуглеводнів)» Мінпаливенерго №0110U006983, 44/2011 «Розроблення стандарту організації України (COU) "Магістральні нафтопроводи. Підводні

переходи. Правила технічного експлуатування"» ПАТ "Укртрансффта" №0111U004874.

**Мета роботи** полягає у вирішенні актуальної науково-практичної задачі в галузі приладів та методів неруйнівного контролю – удосконалення ультразвукового методу внутрішньотрубно́ї діагностики магістральних трубопроводів, шляхом проведення теоретичних та експериментальних досліджень, розроблення шляхів реалізації внутрішньотрубно́го ультразвукового контролю товщини та відповідного нормативного забезпечення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі методів та засобів неруйнівного контролю магістральних трубопроводів;
- провести теоретичні дослідження можливості та ефективності врахування та використання параметрів середовища, що транспортується трубопроводом для проведення контролю;
- розробити аналітичну модель визначення оптимальних з точки зору мінімізації втрат енергії, акустичних та конструктивних параметрів п'єзоелектричного перетворювача;
- проведення експериментальних досліджень та промислової апробації удосконаленого ультразвукового методу внутрішньотрубно́ї діагностики магістральних трубопроводів в статичному режимі за умов близьких до штатних технологічних умов проведення внутрішньотрубно́ї діагностики.

**Об'єктом дослідження** є процес контролю технічного стану магістральних трубопроводів.

**Предметом дослідження** є методи і засоби акустичного контролю магістральних трубопроводів в штатних технологічних умовах проведення внутрішньотрубно́ї діагностики, без припинення його експлуатації.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених в роботі задач використовувались методи неруйнівного контролю та математичного моделювання. Методи планування експерименту використовувались у ході виконання експериментальних досліджень. Для розроблення експериментального технічного засобу використовувались методи схемотехніки.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

- удосконалено ультразвуковий метод контролю товщини стінки трубопроводу, який полягає у використанні властивостей природного газу, що транспортується трубопроводом за штатних технологічних умов, як середовища для створення акустичного контакту між перетворювачем та об'єктом контролю (стінка трубопроводу), що дає змогу здійснювати внутрішньотрубно́й контроль поверхні та тіла стінки трубопроводу ультразвуковим методом без використання контактних рідин;
- удосконалено методологію оцінки втрат по всьому акустичному тракту, шляхом врахування параметрів середовища, його хімічного складу, тиску та температури, а також конструктивних параметрів ультразвукового перетворювача та умов контролю. Отримані результати оцінки, зменшення втрати енергії ультразвукового сигналу, дозволили обґрунтувати можливість здійснення

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Питання забезпечення надійності та безпеки постачання природного газу магістральними трубопроводами набуває дедалі більшої актуальності через значний ступінь зношеності та старіння устаткування вітчизняного нафтогазового комплексу. Потреба в нових технологіях для моніторингу технічного стану трубопроводів спричинена як ризиком виникнення аварійних ситуацій, так і необхідністю забезпечення цілісності трубопроводу з метою надійного постачання енергоносіїв.

Проведення внутрішньотрубної технічної діагностики включено в один з двох обов'язкових основних кваліфікаційних процесів Системи керування цілісністю трубопроводу (PIMS), що є основою міждержавного стандарту ГОСТ CEN/TC 15173. Проте відсутність нормативного забезпечення щодо проведення внутрішньотрубної діагностики в Україні призводить до неоднозначності щодо вимог проведення регулярного технічного обстеження існуючих трубопроводів, створює значні труднощі щодо розроблення методик проведення внутрішньотрубної діагностики та оцінки її результатів.

Основною задачею технічного діагностування трубопроводів є встановлення фактичної товщини стінки трубопроводу та виявлення дефектів типу порушення суцільності. Найбільш ефективним для проведення робіт з технічного діагностування за всією довжиною трубопроводу та з мінімальними простоями в роботі трубопроводу, є здійснення внутрішньо-трубної діагностики з використання інтелектуальних поршнів, що рухаються під напором транспортованого продукту. Проте існуючі інтелектуальні магнітні поршні мають низьку точність ( $\pm 10\%$ ) та достовірність контролю (80%), а поршні, що реалізують акустичні методи контролю, практично непридатні для застосування в газопроводах, оскільки потребують наявності контактної середовища між перетворювачем та стінкою трубопроводу. У зв'язку з цим, можна зробити висновок, що внутрішньо-трубна діагностика з використанням поршнів, потребує удосконалення, для забезпечення вищої достовірності та точності контролю.

Аналіз існуючих методів та засобів контролю показав, що найбільш придатним з точки зору необхідних контрольованих параметрів та достовірності контролю є акустичний ультразвуковий метод контролю, котрий потребує удосконалення, для забезпечення можливості його використання у газопроводах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася у рамках ДЗ/467-2009 «Розроблення нового методу безконтактного акустичного контролю геометричних характеристик металоконструкцій» Міносвіти та науки № 0109U006324, Д-11-11-П «Розроблення новітніх неруйнівних методів діагностики та моніторингу деградації матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації» Міносвіти та науки №0111U002999, ГМ-9/2010 «Розроблення національних стандартів, гармонізованих з міжнародними стандартами серії ISO 13628 (Проектування та експлуатування систем підводного видобутку вуглеводнів)» Мінпаливенерго №0110U006983, 44/2011 «Розроблення стандарту організації України (COU) "Магістральні нафтопроводи. Підводні

переходи. Правила технічного експлуатування"» ПАТ "Укртрансффта" №0111U004874.

**Мета роботи** полягає у вирішенні актуальної науково-практичної задачі в галузі приладів та методів неруйнівного контролю – удосконалення ультразвукового методу внутрішньотрубної діагностики магістральних трубопроводів, шляхом проведення теоретичних та експериментальних досліджень, розроблення шляхів реалізації внутрішньотрубного ультразвукового контролю товщини та відповідного нормативного забезпечення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі методів та засобів неруйнівного контролю магістральних трубопроводів;
- провести теоретичні дослідження можливості та ефективності врахування та використання параметрів середовища, що транспортується трубопроводом для проведення контролю;
- розробити аналітичну модель визначення оптимальних з точки зору мінімізації втрат енергії, акустичних та конструктивних параметрів п'єзоелектричного перетворювача;
- проведення експериментальних досліджень та промислової апробації удосконаленого ультразвукового методу внутрішньотрубної діагностики магістральних трубопроводів в статичному режимі за умов близьких до штатних технологічних умов проведення внутрішньотрубної діагностики.

**Об'єктом дослідження** є процес контролю технічного стану магістральних трубопроводів.

**Предметом дослідження** є методи і засоби акустичного контролю магістральних трубопроводів в штатних технологічних умовах проведення внутрішньотрубної діагностики, без припинення його експлуатації.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених в роботі задач використовувались методи неруйнівного контролю та математичного моделювання. Методи планування експерименту використовувались у ході виконання експериментальних досліджень. Для розроблення експериментального технічного засобу використовувались методи схемотехніки.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

- удосконалено ультразвуковий метод контролю товщини стінки трубопроводу, який полягає у використанні властивостей природного газу, що транспортується трубопроводом за штатних технологічних умов, як середовища для створення акустичного контакту між перетворювачем та об'єктом контролю (стінка трубопроводу), що дає змогу здійснювати внутрішньотрубний контроль поверхні та тіла стінки трубопроводу ультразвуковим методом без використання контактних рідин;
- удосконалено методологію оцінки втрат по всьому акустичному тракту, шляхом врахування параметрів середовища, його хімічного складу, тиску та температури, а також конструктивних параметрів ультразвукового перетворювача та умов контролю. Отримані результати оцінки, зменшення втрати енергії ультразвукового сигналу, дозволили обґрунтувати можливість здійснення

безконтактного ультразвукового контролю з одностороннім доступом до об'єкта контролю за штатних технологічних умов внутрішньотрубної діагностики, та визначити необхідні характеристики технічних засобів та допоміжної апаратури для його реалізації;

- вперше запропоновано методологію оцінки співвідношень рівнів поверхневого та донного луно-імпульсів при безконтактному ультразвуковому контролі в газоподібному середовищі;
- запропоновано аналітичну модель для визначення оптимальних з точки зору мінімізації втрат енергії, акустичних та конструктивних параметрів п'єзоелектричного перетворювача в залежності від характеристик середовища та параметрів контролю, що дало змогу здійснити вибір оптимальних матеріалу та конфігурації погоджувальних шарів та зменшити втрати енергії акустичних коливань на 40 дБ.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у розробленні технічних засад для реалізації засобів та нормативної документації, що дадуть змогу здійснювати ультразвуковий контроль трубопроводів за штатних технологічних умов, з використанням властивостей середовища, що транспортується, для створення акустичного контакту між ультразвуковими перетворювачами та об'єктом контролю, з метою зменшення втрат енергії генерованих ультразвукових коливань. Розроблений метод контролю дає можливість отримати інформацію про товщину стінки, наявність та глибину залягання дефектів, а також профіль внутрішньої поверхні трубопроводу. Розроблено програмне забезпечення, що дає можливість оцінювати втрат енергії та співвідношення рівнів ультразвукових коливань підчас контролю в газоподібному середовищі.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих у співавторстві роботах, автором особисто:

- запропоновано новий підхід щодо врахування та використання властивостей середовища, що транспортується трубопроводом для зменшення втрат енергії ультразвукової хвилі при проведенні ультразвукового контролю за робочих умов внутрішньотрубної діагностики [1, 4, 5, 8, 11, 13, 14];
- запропоновано спосіб безконтактного контролю глибини корозійного пошкодження та профілю поверхні об'єкту контролю [2, 3, 9, 12, 16];
- розроблено методику та проведено комплекс експериментальних досліджень з метою перевірки безконтактного ультразвукового методу контролю товщини стінки газопроводів за умов проведення внутрішньотрубної діагностики [6, 15];
- запропоновано шляхи технічної реалізації та проект нормативного забезпечення розробленого методу безконтактного ультразвукового контролю при внутрішньотрубній діагностиці трубопроводів [2, 7, 10].

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 16-й та 17-й міжнародних конференціях «Дефектоскопія'11» (м. Созополь, Болгарія), на 19-й міжнародній конференції «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (м. Гурзуф, 2011р.), на 16-й та 17-й міжнародних конференціях «Електромагнітні та акустичні методи

неруйнівного контролю матеріалів та виробів «Леотест-2011» та «Леотест-2012» (м. Славське, Львівська обл.), на 10-ій міжнародній конференції виставці «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів «Корозія-2010» (м. Львів, 2010р.), на 5-му міжнародному симпозіумі Вуглеводнів та хімічного складу «ISHC5» (Ішді Фредж, Алжир, 2010р.), на міжнародній науково-технічній конференції і виставці «Нафтогазова енергетика – 2011» (м. Івано-Франківськ, 2011р.), на міжнародній науково-технічній конференції, Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу (м. Івано-Франківськ, 2012р.), на науково-практичній конференції «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 2009р.), на 6-ій міжнародній науково-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазпромислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 2011р.), та на семінарах кафедр «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції» та «Технічної діагностики та моніторингу» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу у 2009-2012 рр.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 друкованих праць, з них 6 – статей у фахових наукових виданнях, затверджених ВАК України, а також 1 у реферованому іноземному виданні, 7 тез та матеріалів доповідей на конференціях, у тому числі 3 закордонні конференції, 1 патент на винахід та 1 монографія у співавторстві.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 134 сторінках. Крім того робота проілюстрована 47 рисунками, включає 8 таблиць, список використаних джерел із 114 найменувань та 13 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику дисертаційної роботи. Розкрито суть та стан науково-технічної задачі проведення внутрішньотрубною діагностики магістральних трубопроводів. Обґрунтовано актуальність теми, що дозволило сформулювати мету та основні задачі досліджень. Розкрито наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію положень дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено детальний аналіз методів та засобів внутрішньотрубною діагностики магістральних трубопроводів. Наведено переваги та недоліки кожного з розглянутих методів та обмеження їх застосування. Дослідження щодо розроблення методів та засобів внутрішньотрубною проводили багато зарубіжних та вітчизняних вчених –Crouch A.E., Willems H., Barbian O.A., Willems H.N., Lei H., Bubenik T.A., Schmidt T.R., Fisher J.L., Fortunko C.M., Clapham L., Teitsma A., Stoker G., Єгоров Н.Н., Ключев Ф.Р., Соснин В.Н, Мирошніченко Б. И., Лухвич А. А., Сялюков В.В., Хорошин А.В., Мужижкий В.Ф., Карпаш О.М., Маєвський С.М., Криничний П.Я. та інші. Однак вони зосереджувались на удосконаленні засобів, що реалізують магнітні та традиційні ультразвукові методи контролю, або розробці електромагнітно-акустичних методів, що мають складні технологічні вимоги та потребують значних доопрацювань.



Аналіз існуючих методів та засобів внутрішньотрубної діагностики показав, що на даний час для визначення технічного стану в основному використовується інтелектуальні снаряди з магнітними давачами, що рухаються під напором транспортованого продукту та реалізують дефектоскопію методом реєстрації розсіяння магнітного потоку. Одними з суттєвих недоліків названого методу та пристроїв, що його реалізують, є низка точність визначення залишкової товщини стінки трубопроводу, на рівні  $\pm 10\%$  від товщини стінки трубопроводу з довірчим рівнем 80% (за нормативного значення бракувального критерію 12,5% від товщини), неможливість виявлення місця знаходження дефекту відносно поверхонь трубопроводу (внутрішньої чи зовнішньої) та складність інтерпретації отриманих результатів, особливо за умов відсутності вихідних значень товщини стінок трубопроводу на всьому інтервалі проведеного вимірювання. Існуючі інтелектуальні поршні, що реалізують ультразвукові методи контролю, практично непридатні для застосування в газопроводах, оскільки потребують наявності контактного середовища між перетворювачем та стінкою трубопроводу. Перспективний метод контролю з застосуванням електромагнітних акустичних перетворювачів не потребує наявності контактного середовища, проте має значні технологічні труднощі при реалізації технічних засобів та демонструє значний відсоток помилкових результатів.

Доведено необхідність удосконалення існуючих засобів внутрішньотрубної діагностики та розроблення нових наукових та технологічних підходів для реалізації засобів внутрішньотрубної діагностики, з метою підвищення точності та достовірності контролю. Запропоновано використати ультразвуковий безконтактний метод контролю. Сформульовано завдання, що потребують вирішення та обрано напрямки подальших досліджень.

У **другому розділі** наведено результати теоретичних досліджень щодо нових підходів реалізації ультразвукового контролю в умовах внутрішньотрубної діагностики газопроводів. Основною задачею дослідження було визначення можливості використання природного газу, що транспортується трубопроводом, для створення необхідного акустичного контакту між ультразвуковим перетворювачем та об'єктом контролю. Зокрема, було запропоновано використати той факт, що природний газ під надлишковим тиском має більший акустичний імпеданс та менший коефіцієнт затухання звукових хвиль, ніж за стандартних умов, що може значно зменшити втрати енергії ультразвукового сигналу під час його поширення через контактне середовище (природний газ) та на межах поділу середовищ.

Для аналізу можливості застосування акустичних методів контролю для випадку внутрішньотрубної діагностики було проаналізовано фізичну модель процесу ультразвукового контролю в умовах внутрішньотрубної діагностики з метою вибору та обґрунтування напрямків удосконалення ультразвукового методу контролю та подальших досліджень (рис. 1).

Основною проблемою під час проведення ультразвукового контролю є необхідність забезпечення акустичного контакту між ультразвуковим перетворювачем та об'єктом контролю (стінкою трубопроводу), для введення ультразвукових хвиль в об'єкт контролю та отримання відбиття від поверхні, донної поверхні та дефектів у ньому. Проведення такого роду ультразвукового контролю без наявності відповідного акустичного контакту є неможливим через значні втрати

енергії ультразвукових коливань (УЗК) на проходженні границь розділу середовищ УП/ГС що транспортується, під час поширення у середовищі, на границі розділу ГС/ОК та у зворотному напрямку.

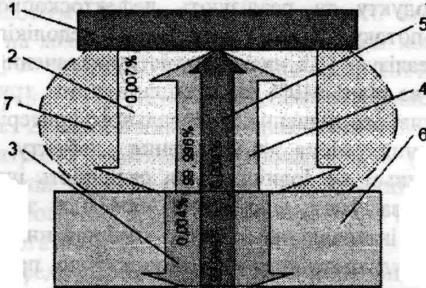


Рисунок 1. Фізична модель поширення ультразвукових променів при контролі.

1 – ультразвуковий перетворювач (УП), 2 – падаюча хвиля, 3 – пройшовши в тіло об'єкта контролю (ОК) хвиля, 4 – хвиля відбита від внутрішньої поверхні ОК, 5 – хвиля відбита від зовнішньої поверхні ОК, 6 – ОК, 7 – газоподібне середовище (ГС). (у відсотка вказані значення енергії променів, що пройшли та відбилися на границі розділу середовищ)

Для вирішення проблеми значної втрати енергії УЗК було вирішено здійснити аналіз впливу фізичних та хімічних параметрів середовища, що транспортується магістральним трубопроводом (природний газ), на процес контролю, з метою визначення втрат енергії при контролі та встановлення оптимальних параметрів контролю (рис.2).



Рисунок 2. Вплив фізико-хімічних параметрів газоподібного середовища на процес ультразвукового контролю

Під час здійснення ультразвукового контролю в ГС, ультразвукові промені зазнають значних втрат при поширенні в ГС та проходженні границь розділу середовищ, що унеможливило здійснення контролю за нормальних умов. Відповідно до сформованих задач дослідження, було розглянуто вплив фізико-хімічних параметрів середовища на поширення УЗК у ньому в процесі ультразвукового контролю за умов внутрішньотрубно́ї діагностики.

Сумарний коефіцієнт загасання ультразвукових коливань описує втрати енергії УЗК під час поширення в ГС. Він зумовлюється в'язкими та теплопровідними властивостями середовища, та залежить від сукупності фізико-хімічних параметрів, що в свою чергу визначаються хімічним складом газоподібного середовища та його станом (тиском та температурою). Коефіцієнт загасання в газоподібному середовищі визначається формулою Стокса-Кіргофа:

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

де  $f$  – частота звуку;  $c$  – швидкість звуку;  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості;  $\rho$  – густина середовища;  $K$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\chi$  – відношення питомих теплоємностей;  $C_p$  – питома теплоємність при  $P = const$ .

Результати проведеного моделювання для вибраних вихідних умов, близьких до умов проведення внутрішньотрубної діагностики, наведені на рисунку 4. Основні фізичні параметри природного газу для заданих значень тиску та температури були отримані за допомогою відповідного програмного забезпечення та довідникових даних. Аналіз отриманої залежності дозволяє стверджувати про значне зменшення втрат енергії УЗК при підвищенні тиску газоподібного середовища понад 2-3 МПа, в межах 0,3-2 дБ. При цьому втрати енергії УЗК не значно залежать від їх частоти. Це дозволить вибирати частоти ультразвукових коливань для цілей контролю близькими до стандартних частот неруйнівного ультразвукового контролю сталевих виробів, і не обмежуватись типовими для безконтактного ультразвукового контролю частотами 100-500 КГц, що в результаті дасть можливість підвищити точність та роздільну здатність контролю.

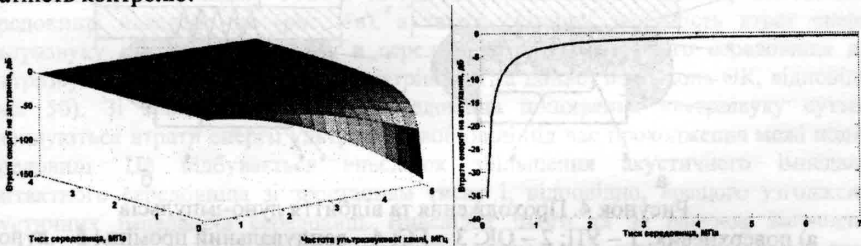


Рисунок 3. Поверхня втрат енергії ультразвуку під час загасання в КС залежно від тиску КС та частоти ультразвукових променів та зріз поверхні для частоти 2,5 МГц.

При проведенні контролю в ГС ультразвуковий імпульс долає чотири границі розділу середовищ: УП/ГС, ГС/ОК та у зворотному напрямку (рис. 4). При цьому, ультразвуковий імпульс зазнає значного затухання при проходженні кожної границі розділу середовищ та підчас розповсюдження вже власне у ГС та ОК. Проте внаслідок значного коефіцієнту відбиття від кожної з границь розділу, в процесі контролю виникають багатократні відбиття луно-імпульсів від зовнішньої та донної поверхонь об'єкта контролю (рис. 4а поз.6 та рис. 4б поз.8).

Для аналізу втрат енергії УЗК підчас проведення контролю в газоподібному середовищі було удосконалено модель оцінки втрат енергії ультразвукових коливань в процесі контролю, шляхом врахування параметрів середовища контролю та

введенням в модель додаткової складової, для оцінки втрати серій луно-імпульсів, що виникають в процесі контролю.

Втрати енергії ультразвукової хвилі під час контролю знаходяться (рис. 3):

– для акустичних коливань, відбитих від внутрішньої поверхні стінки труби:

$$N_1 = T_{11} + A_1 + R_1 + A_1 + T_{12} + (n_1 - 1) \cdot (2 \cdot A_1 + R_1 + R_{10}), (2)$$

де  $T_{11}$  – втрати енергії ультразвукової хвилі на межі поділу УП/КС;  $A_1$  – зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в ГС;  $R_1$  – втрати енергії відбитої хвилі на межі КС/ОК (внутрішня поверхня стінки труби);  $T_{12}$  – втрати енергії ультразвукової хвилі на межі поділу КС/УП;  $R_{10}$  – втрати енергії відбитої хвилі на межі ГС/УП;  $n_1$  – порядковий номер шуканого поверхневого луно-імпульсу в серії (рис. 3а поз.6);

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

$$N_2 = T_{11} + A_1 + T_{21} + A_2 + R_2 + (n_2 - 1) \cdot (2 \cdot A_2 + R_2 + R_{12}) + A_2 + T_{22} + A_1 + T_{12}, (3)$$

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, обшивка);  $T_{22}$  – втрати енергії хвилі на межі ОК/ГС (внутрішня поверхня стінки труби); де  $R_{12}$  – втрати енергії відбитої хвилі на межі ОК (зовнішня поверхня)/ГС з внутрішньої сторони;  $n_2$  – порядковий номер шуканого донного луно-імпульсу в серії (рис. 3б поз.8).

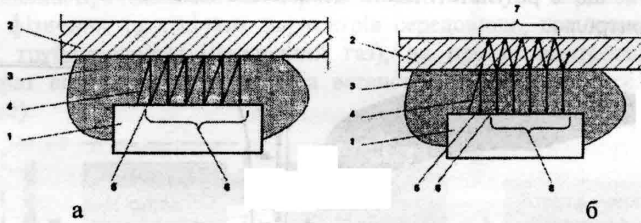


Рисунок 4. Проходження та відбиття луно-імпульсів

а) поверхневих: 1 – УП; 2 – ОК; 3 – ГС; 4 – зондувальний промінь; 5 – луно-імпульс відбитий від зовнішньої поверхні ОК; 6 – серія відбитих від зовнішньої поверхні ОК луно-імпульсів

б) донних: 1 – УП; 2 – ОК; 3 – ГС; 4 – зондувальний промінь; 5 – луно-імпульс відбитий від зовнішньої поверхні ОК; 6 – луно-імпульс відбитий від донної поверхні ОК; 7 – серія луно-імпульсів таких, що пройшли в ОК та відбилися від його поверхні з внутрішньої сторони; 8 – серія донних луно-імпульсів

Враховуючи те, що одне із середовищ газове, а напрямок поширення хвилі перпендикулярний до межі поділу середовищ, розглядали тільки одно-направлені плоскі повздовжні хвилі. 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 за енергетичним коефіцієнтами проникнення та відбиття на границі розділу середовищ.

В результаті було отримано наступні залежності для оцінки втрат енергії УЗК для випадку перших луно-імпульсів з серій коливань відбитих від зовнішньої (рис.4а поз.5) та донної (рис.4б поз.6) поверхонь ОК, відповідно:

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

$$N_2 = 10 \log \frac{4\xi_{11}}{(1+\xi_{11})^2} + 10 \log \frac{4\xi_{12}}{(1+\xi_{12})^2} - 2 \cdot 8,686 \cdot \alpha \cdot d + 10 \log \frac{4\xi_{21}}{(1+\xi_{21})^2} + 10 \log \frac{4\xi_{22}}{(1+\xi_{22})^2} - 2 \cdot 8,686 \cdot \delta \cdot h + 10 \log \left( \frac{1-\xi_{31}}{1+\xi_{31}} \right)^2, (5)$$

де  $\xi_{11}$  і  $\xi_{12}$  – відношення акустичних імпедансів УП/КС і КС/УП, відповідно;  $\xi_{21}$  і  $\xi_{22}$  – відношення акустичних імпедансів КС/ОК і ОК/КС, відповідно;  $\xi_{31}$  – відношення акустичних імпедансів ОК/зовнішнього середовища;  $d$  – відстань поширення ультразвуку в ГС,  $\alpha$  – сумарний коефіцієнт поглинання ультразвуку.

Оцінка втрат енергії УЗК, згідно з наведеними формулами, було здійснено для частоти зондувального ультразвукового сигналу 2,5 МГц. Моделювали за умов збільшення тиску ГС від стандартного до 8 МПа; ГС – природний газ типового складу: метан – 93,42%, етан – 0,05%, діоксид вуглецю – 2,292%, азот – 1,79%; діапазон зміни температури ГС – 10-60°C. Акустичний імпеданс матеріалу УП PZT-5A  $35 \times 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с). ОК – пластина зі сталі 17Г1С завтовшки  $h = 10$  мм; коефіцієнт загасання ультразвукових хвиль частотою 1 МГц –  $0,46$  м<sup>-1</sup>; акустичний імпеданс  $46,2 \times 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Відстань поширення ультразвуку до об'єкта контролю – 50 мм.

Отримані результати моделювання втрати енергії ультразвуку під час проходження межі поділу УП/ГС та ГС/ОК в залежності від тиску контактного середовища наведено на (рис. 5а), а також сумарну залежність втрат енергії ультразвуку під час поширення в середовищі від тиску цього середовища для ультразвукової хвилі, відбитої від внутрішньої та донної поверхонь ОК, відповідно (рис. 5б). Зі збільшенням тиску середовища поширення ультразвуку суттєво зменшуються втрати енергії ультразвукової хвилі під час проходження межі поділу середовищ. Це відбувається внаслідок збільшення акустичного імпедансу контактного середовища зі зростанням тиску і, відповідно, кращого узгодження акустичних імпедансів середовищ. Внаслідок цього та за рахунок зменшення коефіцієнта загасання зі збільшенням тиску, отримуємо суттєве зменшення втрат енергії ультразвукових коливань під час ультразвукового контролю.

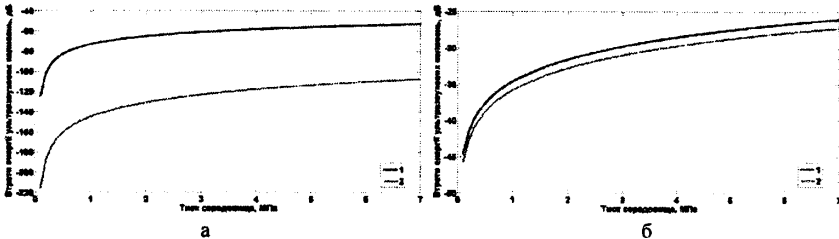


Рисунок 5. Втрати енергії ультразвукових коливань залежно від тиску ГС: а) проходження межі поділу середовищ: 1 – ПЕ/КС; 2 – КС/ОК. б) для акустичного тракту: 1 – для ультразвукових коливань, відбитих від поверхні ОК; 2 – для ультразвукових коливань, донної поверхні ОК.

Здійснено розрахунок втрат енергії акустичних коливань при їх поширенні в середовищі природного газу під тиском, на границях розділу середовищ та по всьому акустичному тракту в залежності від тиску, температури та за умов врахування хімічного складу середовища що транспортується, що дало змогу обґрунтувати можливість здійснення такого контролю при внутрішньотрубній діагностиці за штатних технологічних умов. Втрати енергії ультразвукового сигналу для умов тиску середовища рівному 4 МПа зменшились у 1,65 рази, у порівнянні з стандартними умовами (-91,89 дБ та -183,53 дБ), та склали відбитих від зовнішньої та донної поверхонь об'єкта контролю склали -53,98 дБ та -113,21 дБ відповідно, для умов тиску середовища рівному 4 МПа.

Розроблена узагальнена методологію та аналітичну модель оцінки втрат та співвідношень рівнів амплітуд луно-імпульсів, що дозволяє здійснити прогнозування шуканих рівнів амплітуд донних луно-імпульсів в процесі ультразвукового контролю з урахуванням параметрів та хімічного складу середовища:

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{\frac{N_1 - N_2}{10}} \quad (6)$$

Аналітична модель дозволяє визначати втрати та співвідношення рівнів енергії серій поверхневих та донних луно-імпульсів при безконтактному ультразвуковому контролі. Методологію та аналітичну модель можна використовувати для різних середовищ проведення контролю та матеріалів об'єкта контролю, вона дозволяє врахувати фізичні характеристики та параметри контактного середовища та матеріалу об'єкта контролю, а також геометричні параметри процесу контролю (відстань поширення ультразвуку, товщину об'єкта контролю).

На рис. 6 наведено розраховане для умов моделювання співвідношення рівнів поверхневого та донного луно-імпульсів. Співвідношення рівнів амплітуд поверхневого та донного луно-імпульсів спадає з збільшенням тиску контактного середовища. Аналіз цього співвідношення дозволяє зробити висновок, що для виявлення донних луно-імпульсів в процесі контролю слід використовувати підсилення сигналу, що містить донні луно-імпульси не менше ніж на 50 дБ відносно поверхневих луноімпульсів.

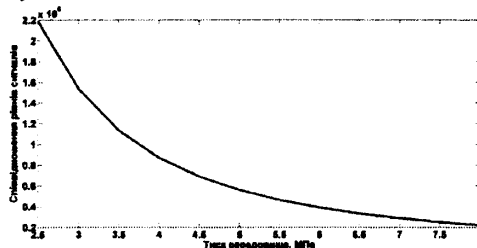


Рисунок 6. Співвідношення рівнів поверхневого та донного луно-імпульсів

Запропоновано методику вибору оптимальних конструктивних параметрів ультразвукових перетворювачів з одношаровим погоджувальним елементом за критерієм забезпечення мінімальних втрат енергії ультразвукових коливань за умов внутрішньотрубної діагностики. Розраховано значення оптимального акустичного

імпедансу погоджувального елемента для штатних технологічних умов здійснення внутрішньотрубної діагностики, що склало  $(1,5-2,5) \cdot 10^5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  та втрати енергії ультразвукових луно-імпульсів при його використанні в конструкції УП (рис. 7). Для цілей виготовлення погоджувального елемента обрано матеріал що володіє найближчим до розрахованого значення, акустичним імпедансом – аерогель, що дозволяє додатково зменшити втрати енергії ультразвукових коливань при здійсненні контролю в штатних технологічних умовах проведення внутрішньотрубної діагностики на 40 дБ.

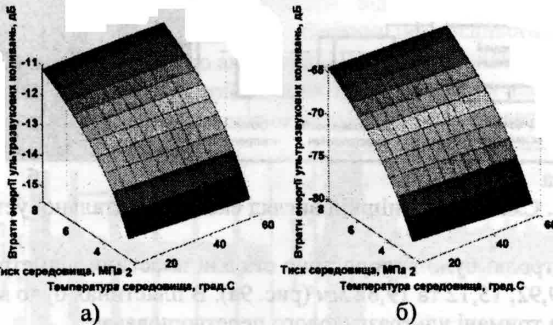


Рисунок 7. Втрати енергії ультразвукових коливань при використанні погоджувального елемента з оптимальним акустичним імпедансом

а) для луно-імпульсів відбитих від зовнішньої поверхні об'єкта контролю, б) для луно-імпульсів відбитих від донної поверхні об'єкта контролю

У третьому розділі наведено методику та результати проведених експериментальних досліджень, щодо перевірки можливості здійснення удосконаленого безконтактного ультразвукового методу контролю товщини стінки газопроводів у процесі внутрішньотрубної діагностики.

Для цього було розроблено відповідну методику експериментальних досліджень, що передбачала підтвердження можливості здійснення безконтактного ультразвукового контролю зразка стінки трубопроводу в умовах близьких до робочих умов здійснення внутрішньотрубної діагностики газопроводів в статичних умовах.

Для реалізації експерименту було розроблено дослідну установку (рис. 8), 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 ГС, з міркувань безпеки, було використано азот. Швидкість поширення звуку в азоті дещо нижча ( $334 \text{ м}/\text{с}$ ), ніж у природному газі ( $430 \text{ м}/\text{с}$ ), проте густина азоту є схожою ( $0,808 \text{ кг}/\text{м}^3$ ) із природнім газом ( $0,68-0,85 \text{ кг}/\text{м}^3$ ). Акустичний імпеданс природного газу в реальних умовах проведення внутрішньотрубної діагностики (тиск 4-5 МПа, температура  $-15..+50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) буде дещо вищий, ніж азоту за тих же умов, що в результаті ще додатково зменшить втрати енергії ультразвуку підчас контролю. Подача азоту здійснювалась за допомогою балону високого тиску з редуктором та з'єднувальної трубки. Балон заправлявся азотом в заправній

лабораторії ПАТ Львівський хімічний завод. Тиск газу в експериментальній установці визначався за допомогою деформаційного стрілкового манометра. Стравлювання тиску з експериментальної установки здійснювалось за допомогою спускового клапана-редуктора. Після досягнення робочого тиску в експериментальній установці, вона герметизувалась запірними клапанами.



Рисунок 8. Схема та зовнішній вигляд експериментальної установки

Об'єкти контролю було використано сталі пластини діаметром 60 мм трьох значень товщини 9,92, 15,12 та 19,82 мм (рис. 9а). В пластинах було виконано отвори для закріплення на тримачі ультразвукового перетворювача.

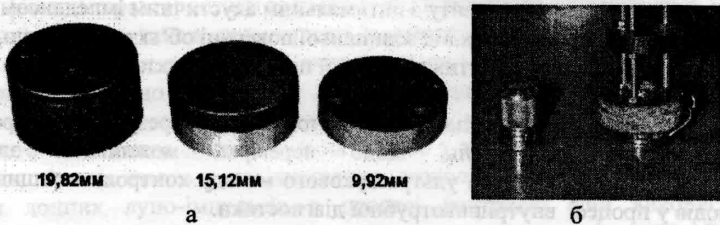


Рисунок 9. Взірці для експериментальних досліджень та тримач УП

За допомогою дефектоскопа DIO-562LC (S/N 04-118) здійснювалось збудження перетворювача піковою амплітудою 200 В, 1 імпульсом тривалістю 69 нс. Перетворювач розміщувався таким чином, щоб його акустична вісь буда перпендикулярна до поверхні об'єкта контролю на відстані 30 мм (рис. 9б) - таким чином реалізовувався луно-імпульсний метод контролю з кутом вводу ультразвукових хвиль рівним 90°. Підсилений попереднім підсилювачем на 56 дБ та оцифрований осцилографом RIGOL DS1000E луно-імпульс в подальшому зберігались та опрацьовувались в програмному середовищі MATLAB R14.

В експерименті було використано комерційний прямий перетворювач П111-2,5-К12-003 «Луч» з погоджувальним елементом власної конструкції на основі досвіду попередніх досліджень. Узгодження акустичного імпедансу перетворювача було виконано шляхом використання погоджувального елемента, виготовленого з одного шару з полікарбонату, акустичний імпеданс  $(2,57..2,92) \times 10^9 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ . Товщина погоджувального елемента рівна чверті довжини ультразвукової хвилі на робочій



частоті в матеріалі його виготовлення, та склала 1,08 мм. Це отримати зменшення втрати енергії відбитого від зовнішньої поверхні об'єкта контролю луно-імпульсу на 18 дБ за тиску в камері рівному 50 МПа, в порівнянні з використанням ультразвукового перетворювача без погоджувального елемента.

Отриманий необроблений, підсилений попереднім підсилювачем та оцифрований осцилографом сигнал з п'єзоелектричного перетворювача наведено на рис. 10а. Співвідношення амплітуд сигналів від поверхневого та донного луно-імпульсів становить величину третього порядку, при цьому, як видно з рис. 3, амплітуда сигналу луно-імпульсу відбитого від зовнішньої поверхні об'єкта контролю значно перевищує динамічний діапазон попереднього підсилювача, що призводить до обрізання сигналу по амплітуді. Після поверхневого луно-імпульсу на рис.10б явно не спостерігається серії донних імпульсів, тому що вони маскуються поверхневим луно-імпульсом та фоновими шумами перетворювача.

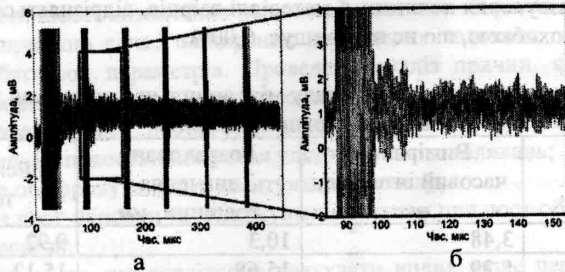


Рисунок 10. Знятий луно-імпульс

В подальшому здійснювалась обробка отриманих даних в програмному середовищі MATLAB R14 за допомогою функції *filter* цифровим смуговим фільтром Баттерворта 5-го порядку з полоєю пропускання 1,5 – 2,5 МГц. Наступним кроком було згладжування отриманого сигналу за допомогою функції *smooth*. Після фільтрування та згладжування сигналу стає можливим помітити серію затухаючих донних імпульсів фоні сигналу (рис. 11).

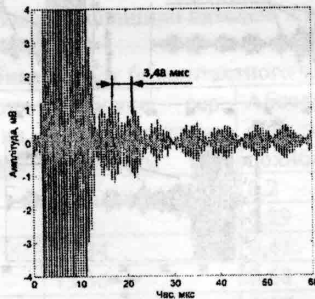


Рисунок 11. Відфільтрований від шумів та згладжений сигнал з показаною відстанню між сусідніми донними луно-імпульсами

Після поверхневого імпульсу слідує серія донних сигналів, розташованих на однаковій відстані один від одного. Донні імпульси за амплітудою незначно перевищують власні шуми перетворювача, спричинені внутрішніми відбиттями в протекторі та п'єзокерамічному елементі, та після четвертого донного імпульсу маскуються власними шумами та ревербераціями в протекторі перетворювача. На рис. 11 також показано отриманий часовий інтервал між послідовними третім та четвертим донними імпульсами, що рівний 3,48 мкс. Даний часовий інтервал з похибкою 3,97% та відповідає товщині досліджуваного зразка 9,92 мм – 3,347 мкс (швидкість поширення ультразвуку в матеріалі взірця 5927 м/с).

Отримані в ході проведеної серії експериментів усередненні вимірювальні дані часового інтервалу між першими чітко відділюваними після поверхневого імпульсу, сусідніми донними луно-імпульсами наведені в таблиці 1. Розраховане значення товщини досліджуваних взірців, з урахуванням попередньо визначеної швидкості поширення ультразвукових коливань в матеріалі взірців, відрізняється від реального з максимальною похибкою, що не перевищує 6,00%.

Таблиця 1

Результати вимірювань часового інтервалу між донними імпульсами та розраховані значення товщини взірців

Взірець	Вимірний часовий інтервал, мкс	Розраховане значення товщини, мм	Дійсне значення товщини
№1	3,48	10,3	9,92
№2	5,29	15,68	15,12
№3	7,09	21,01	19,82

На рис. 12 наведено отримані луно імпульси для різної товщини взірця. Відбиття від зовнішньої поверхні є занадто великим для підсилення без спотворення і тому спотворюється і після оброблення сигналу. Слідом за відбиттям від зовнішньої поверхні слідує серія затухаючих донних імпульсів, розташованих на відповідних для вимірюваної товщини досліджуваного взірця відстанях один від одного.

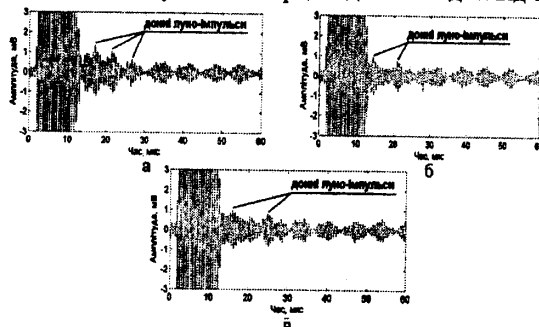


Рисунок 12. Отримані для різної товщини взірця луно-імпульси  
а – для товщини 9,92 мм, б – для товщини 15,12 мм, в - для товщини 19,82 мм

В результаті проведеного експериментального дослідження вдалось підтвердити можливість здійснення безконтактного ультразвукового методу контролю товщини стінки газопроводів у процесі внутрішньотрубної діагностики, зокрема було - показано можливість здійснення такого контролю за умов, що близькі до реальних робочих умов запуску снаряду для внутрішньотрубної діагностики (тиск ГС 50 МПа). Підвищення тиску середовища та застосування погоджувальних елементів дозволило додатково зменшити втрати енергії ультразвукового імпульсу на границях розділу середовищ та підвищити амплітуду шуканих донних луно-імпульсів.

Необхідною умовою впровадження методів та засобів неруйнівного контролю в промисловість є їх метрологічне забезпечення. При вимірюванні товщини безконтактним ультразвуковим луно-імпульсним методом, як і при будь-яких непрямих вимірюваннях, завжди виникають похибки результату вимірювання, які залежать від неточності визначення первинної величини. В нашому випадку такою первинною величиною є час поширення акустичних коливань, що в свою чергу залежить від багатьох параметрів. Проведемо аналіз причин, які впливають на точність вимірювання товщини запропонованим методом:

- зміна параметрів ГС під час руху поршня в трубопроводі (тиску, густини), що спричинює зміну швидкості поширення ультразвукових коливань;
- похибка оцифрування та квантування сигналу;
- похибка пост-обробки та згладжування сигналу при пост-обробці;
- інші причини.

Зважаючи на те, що аналітично врахувати вплив вище перелічених причин виникнення похибок на результат вимірювання практично не можливо, тому для оцінки достовірності вимірювання товщини було вирішено провести експериментальну оцінку методу безконтактного ультразвукового контролю за результатами вимірювань товщини зрізів за допомогою розробленої експериментальної установки в ході багатократних спостережень на 5 зрізях.

Згідно з розробленою методикою експериментальних досліджень, на кожному з 5 зрізів було проведено по 10 вимірювань та здійснено метрологічну оцінку результатів багатократних вимірювань товщини зрізів на експериментальній установці. Результати метрологічної оцінки наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Метрологічна оцінка методу безконтактного ультразвукового контролю

№	Реальна товщина зрізця (мікрометр МК25-2 кл. точн. 2, діап. 0-25мм), мм	Виміряне сер. знач. товщини зрізця, мм	Абсолютна випадкова похибка, мм	Відносна похибка вимірювань, %
1	5,45	5,43	0,2	3,67
2	7,58	7,61	0,29	3,83
3	9,92	10,34	0,41	4,00
4	15,12	15,36	0,68	4,43
5	19,82	20,15	1,07	5,32

Для діапазону товщини зрізів від 5,45 мм до 19,82 мм максимальна похибка склала 5,32%, максимальне значення абсолютної похибки склало 1,07 мм.

У **четвертому розділі** наведено шляхи реалізації розробленого удосконаленого ультразвукового методу внутрішньотрубної діагностики магістральних трубопроводів.

Внутрішньо-трубна діагностика з використанням поршнів, котрі реалізують метод вимірювання розсіяння магнітного потоку потребує удосконалення, для забезпечення вищої достовірності контролю. Зокрема, для вирішення проблеми відсутності опорної точки для вимірювання залишкової товщини стінки трубопроводу при внутрішньо-трубній діагностиці методом вимірювання розсіяння магнітних потоків, пропонується використати запропонований авторами безконтактний ультразвуковий луно-імпульсний метод контролю залишкової товщини стінки металоконструкцій.

Як відомо, ультразвуковий луно-імпульсний метод контролю дозволяє визначати саме товщину об'єкту контролю, шляхом вимірювання часової затримки повернення луно-імпульсу, введеного в тіло об'єкту контролю. При цьому виникає можливість отримання відомостей як про товщину об'єкту контролю, так і про профіль його поверхні (рис. 13).

Реальні робочі умови запуску інтелектуальних поршнів з безконтактним ультразвуковим модулем відрізнятимуться від змодельованих в експерименті і похибка можливо перевищить визначене в ході експериментальних досліджень значення. Проте метод безконтактного контролю в ході експериментальних досліджень показав є значний потенціал по підвищенню чутливості шляхом виготовлення та налаштування погоджувальних елементів для узгодження акустичного імпедансу УП та ГС (природного газу).

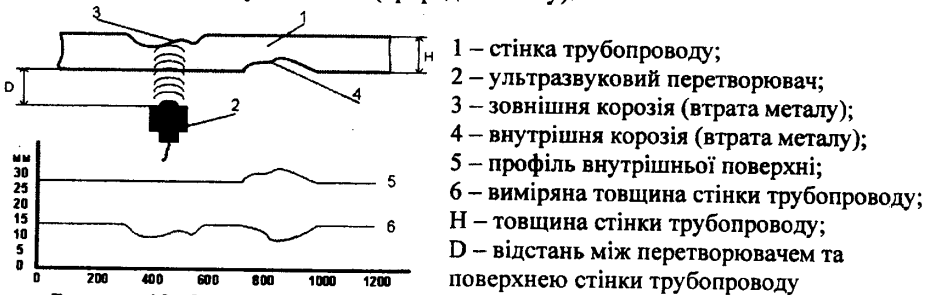


Рисунок 13. Схема реалізації безконтактного ультразвукового контролю при внутрішньотрубній діагностиці газопроводів

Реалізацію запропонованого методу безконтактного ультразвукового контролю для потреб внутрішньотрубної діагностики пропонується здійснювати у вигляді окремого модуля (рис. 14), що приєднується до існуючого інтелектуального поршня з магнітними перетворювачами. Ультразвуковий блок має форму поршня, що підтримується юбками виготовленими з еластомеру. Юбки забезпечують рух поршня в трубопроводі під напором середовища. Тіло поршня складається з блоку безконтактних перетворювачів та блоку електронного забезпечення та акумуляторів. Блок безконтактних перетворювачів містить набір п'єзоелектричних перетворювачів, виготовлених у формі пістонів, закручують у відповідний посадковий отвір. Кожний

перетворювач складається з корпусу в якому знаходяться: п'єзопластина, демпфер, узгоджувачий коливальний контур, з'єднувальні провідники та погоджувальний елемент. Погоджувальний елемент та узгоджувачий коливальний контур кожного перетворювача попередньо налаштовані таким чином, щоб забезпечити максимальну передачу енергії електричного імпульсу генератора в контактне середовище для умов проведення контролю.

Розшифрування записаних в процесі контролю вимірювальних даних проводиться за допомогою програмного забезпечення та за участю оператора. Програмне забезпечення виконуватиме необхідну пост обробку (після пропускання поршня) сигналів для виділення донних імпульсів, відбитих від стінок трубопроводу. За наявних поверхневого та донного імпульсу програмне забезпечення дозволить отримати профіль поверхні та донної поверхні стінки трубопроводу з прив'язкою до координат проходження інтелектуального поршня (рис. 4.1) у автоматичному режимі, що неможливо для звичайних систем. В поєднанні з даними, отриманими з магнітних перетворювачів можна сформувати повну картину наявних дефектів та поточного технічного стану трубопроводу.

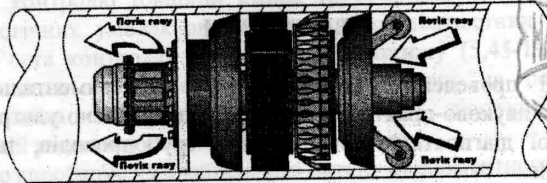


Рисунок 14. Конструкція інтелектуального поршня для проведення внутрішньотрубної діагностики магістральних газопроводів з блоком безконтактних ультразвукових перетворювачів та системою регулювання швидкості руху

Відсутність нормативного забезпечення внутрішньотрубної діагностики в Україні призводить до проблем з розробленням методик проведення внутрішньотрубної діагностики, її проведенням та оцінці її результатів. Запропоновані основні підходи для розроблення таких документів у відповідності до вимог безпеки в нафтогазовому комплексі, вимог Системи керування цілісністю трубопроводу (PIMS) та ГОСТ CEN/TS 15173. Розроблено проєкт нормативного документу СОУ «Магістральні газопроводи. Внутрішньотрубна діагностика методом безконтактного ультразвукового контролю». Даний проєкт стандарту встановлює вимоги щодо проведення внутрішньотрубної діагностики лінійних частин магістральних газопроводів з використанням внутрішньотрубних засобів, що реалізують метод безконтактного ультразвукового контролю, в штатних технологічних умовах проведення внутрішньотрубного обстеження.

Для вирішення питань розроблення нормативних документів, що регламентували б порядок застосування розробленої технології безконтактного акустичного внутрішньотрубною діагностування газопроводів було прийнято участь у розробленні наступних нормативних документи:

1) Тимчасовий технологічний регламент «Контроль якості кільцевих зварних з'єднань трубопроводів під час укладання підводного газопроводу БК-1 Одеського ГР-МСП-4 Голіциньського ГРК з трубоукладальної баржі».

2) ДСТУ ISO 10405:2010 Нафтова і газова промисловість. Обслуговування та використання обсадних і насосно-компресорних труб

3) СОУ 60.3-31570412-\_\_\_\_:2012 Магістральні нафтопроводи. Підводні переходи. Правила технічного експлуатування.

Апробація розробленого удосконаленого ультразвукового методу здійснювалась на взірцях магістральних трубопроводів отриманих в лабораторії Науково-виробничої фірми «Зонд» (м. Івано-Франківськ). Результати випробувань дозволяють стверджувати про повторюваність вимірювань товщини взірців за допомогою удосконаленого методу безконтактного ультразвукового контролю товщини взірців в умовах близьких до умов проведення внутрішньотрубної діагностики, реалізованого на базі експериментальної установки. Невідповідність показів дійсним значенням може бути зумовлена випадковою та методичною похибкою вимірювань, яка була не більше 6,2%.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-практична задача – удосконалено ультразвуковий метод внутрішньотрубної діагностики магістральних трубопроводів, та одержано такі основні результати:

1. Проведений аналіз відомих методів та засобів внутрішньотрубної діагностики магістральних трубопроводів показав, що на даний час найбільш поширеним є метод внутрішньотрубної діагностики з використанням інтелектуальних поршнів з магнітними давачами, недоліком якого є низька точність та достовірність результатів контролю. Існуючі ультразвукові методи внутрішньотрубної діагностики, незважаючи на вищу точність контролю та достовірність контролю, малоприматні для застосування в умовах газопроводів. Обґрунтовано необхідність удосконалення існуючих методів ультразвукового контролю для здійснення безконтактної внутрішньотрубної діагностики магістральних трубопроводів в штатних технологічних умовах внутрішньотрубної діагностики.

2. Запропоновано врахування та використання параметрів середовища, що транспортується трубопроводом для узгодження акустичних імпедансів ультразвукового перетворювача та об'єкта контролю. Удосконалено методологію оцінки втрат по всьому акустичному тракту шляхом врахування параметрів середовища, його хімічного складу, тиску та температури. Розроблено узагальнену методологію оцінки рівня втрат та співвідношень поверхневого та донного луноімпульсів при безконтактному ультразвуковому контролі в газоподібному середовищі. Методологію можна використовувати для різних середовищ проведення контролю та матеріалів об'єкта контролю з врахування їхніх фізичних характеристик, а також геометричні параметри процесу контролю (відстань поширення ультразвуку, товщину об'єкта контролю).

Отримані результати оцінки, зменшення втрати енергії ультразвукового сигналу відбитого від зовнішньої поверхні на 38 дБ та від донної поверхні 70 дБ для тиску газоподібного середовища 4 МПа, дозволили обґрунтувати можливість здійснення безконтактного ультразвукового контролю з одностороннім доступом до об'єкта контролю за штатних технологічних умов внутрішньотрубно́ї діагностики, та визначити необхідні характеристики технічних засобів та допоміжної апаратури для його реалізації.

3. Запропоновано методологію визначення оптимальних з точки зору мінімізації втрат енергії, акустичних та конструктивних параметрів п'єзоелектричного перетворювача в залежності від характеристик середовища та параметрів контролю, що дало змогу здійснити вибір оптимального матеріалу (аерогель) та конфігурації погоджувальних шарів та зменшити сумарні втрати енергії ультразвукових коливань при здійсненні ультразвукового контролю в штатних технологічних умовах проведення внутрішньотрубно́ї діагностики на 40 дБ.

4. За результатами експериментальних досліджень на розробленій дослідній установці, було підтверджено можливість здійснення безконтактного ультразвукового контролю товщини стінок трубопроводу в умовах близьких до штатних технологічних умов внутрішньотрубно́ї діагностики з одностороннім доступом до об'єкта контролю. Оцінено для діапазону (5,45-19,82 мм) похибка вимірювань товщини на експериментальній установці не перевищує 5,32%. Абсолютна похибка вимірювань у вказаному діапазоні товщини на експериментальній установці склала 1,07 мм.

5. Проведено апробацію удосконаленого методу безконтактного ультразвукового контролю в умовах внутрішньотрубно́ї діагностики на базі розробленої експериментальної установки в умовах НВФ «Зонд» згідно методики експериментальних досліджень. Запропоновано шляхи реалізації розробленого ультразвукового методу внутрішньотрубно́ї діагностики на технічному та нормативному рівнях. Розроблено проект нормативного документу що регламентує вимоги щодо проведення внутрішньотрубно́ї діагностики лінійних частин магістральних газопроводів з використанням внутрішньотрубно́их засобів що реалізують розроблений удосконалений метод безконтактного ультразвукового контролю. Положення та результати отримані в ході проведених досліджень було використано при розробленні ряду нормативних документів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Карпаш М.О., Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі: монографія / М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький, Т.Т. Котурбаш, О.Г. Бондаренко, О.М. Карпаш // Видавництво: ІФНТУНГ. – 2012. – 420 с.
2. Карпаш О.М. Розроблення методу безконтактного акустичного контролю геометричних параметрів зварних з'єднань / О. М. Карпаш, Т.Т. Котурбаш, М. О. Карпаш, І. В. Рибіцький, Я.І. Коман // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 24. – С.9–12.

3. Карпаш О. М. Експериментальна установка для безконтактного акустичного контролю елементів металоконструкцій після корозійного пошкодження / О. М. Карпаш, Т.Т. Котурбаш, 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. – 2010. – №8, Т. 2. – С.531–535.
4. Карпаш М.О. Аналіз методів підвищення чутливості безконтактного акустичного методу контролю матеріалів та виробів / Т.Т. Котурбаш, М.О. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 25. – С.21–27.
5. Карпаш М.О. Оцінка втрат енергії акустичних коливань за ультразвукового контролю в середовищі природного газу / М.О. Карпаш, Т.Т. Котурбаш // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – Том 47, №6. – С.122–128.
6. Котурбаш Т.Т. Експериментальна перевірка безконтактного ультразвукового методу контролю товщини стінки газопроводів у процесі внутрішньотрубної діагностики / Т.Т. Котурбаш, М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький // Методи та прилади контролю якості. – 2012. – №1(28) – С.26–32.
7. Котурбаш Т.Т. Шляхи практичної реалізації розробленого методу безконтактного ультразвукового контролю товщини стінки газопроводів у процесі внутрішньотрубної діагностики газопроводів / Т.Т. Котурбаш, М.О. Карпаш // Нафтогазова енергетика. – 2012. – №1(17) – С.83–91.
8. Karpash M. Estimation of the losses of energy of acoustic vibrations in the course of ultrasonic testing in the atmosphere of natural gas / M. Karpash, T. Koturbash // Materials Science. – 2012. – Vol. 47, No.6. – P.856–862.
9. Рибіцький І.В. Експериментальна установка для безконтактного акустичного контролю глибини корозійного пошкодження елементів металоконструкцій / І.В. Рибіцький, Т.Т. Котурбаш, М.О. Карпаш, А.В. Яворський // Матеріали науково-практичної конференції «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», 25-26 листопада 2009р. –Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Україна, 2009. – С.123–127.
10. Karpash O. Experimental assembly for air-coupled ultrasonic hardware thickness control / O. Karpash, M. Karpash, I. Rybitsky, T. Koturbash // Proceedings of «5th International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry» (ISHC5), May 23-25, 2010. – Sidi Fredj, Algeria, 2010. – P.115.
11. Карпаш М. Теоретична оцінка втрат енергії акустичних коливань при безконтактному ультразвуковому контролі / М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький, Т.Т. Котурбаш // Матеріали 16-тої міжнародна науково-технічна конференцію Леотест 2011. – Славське. Україна. 2011 – С.113–115.
12. Karpash O. Experimental setup for air coupled ultrasonic hardware thickness control / O.M. Karpash, I.V. Rybitsky, M.O. Karpash, T.T. Koturbash // Матеріали XXVI



- Международной конференции “Дефектоскопия’11 – Дни на безразрушительния контрол 2011”. – Созополь, Болгария, 2011. – С.102–108.
13. Котурбаш Т.Т. Теоретичне оцінювання втрат енергії акустичних коливань у процесі ультразвукового контролю в середовищі природного газу // Т.Т. Котурбаш, М.О. Карпаш // Міжнародна науково-технічна конференція і виставка Нафтогазова енергетика-2011, 10-14 жовтня 2011р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Україна, 2011. – С.89–92.
14. Котурбаш Т.Т. Теоретичне оцінювання втрат енергії акустичних коливань у процесі ультразвукового контролю в середовищі природного газу / Т.Т. Котурбаш Т.Т., М.О. Карпаш // Матеріали Дев'ятнадцятої міжнародної конференції «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» 3–7 октября 2011г. – г. Гурзуф, Украина, 2012. – С.67–73.
15. Котурбаш Т.Т. Експериментальна перевірка безконтактного ультразвукового контролю товщини стінки газопроводів при внутрішньотрубній діагностиці / Т.Т. Котурбаш, М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу», 14-18 травня 2012р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Україна, 2012. – С.143–147.
16. Патент на винахід UA №90007. Акустичний спосіб безконтактного контролю глибини корозійного пошкодження трубопроводів / Карпаш О.М., Карпаш М.О., Рибіцький І.В., Котурбаш Т.Т., (Україна). – Опубл. 25.03.2010, Бюл. №6, 2010 р.

## АНОТАЦІЯ

**Котурбаш Т.Т. Удосконалення ультразвукового методу внутрішньотрубної діагностики магістральних трубопроводів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м.Івано-Франківськ, 2012.

Дисертація присвячена питанню безконтактного внутрішньотрубного ультразвукового контролю трубопроводів в технологічних умовах експлуатації.

Запропоновано врахування та використання параметрів середовища, що транспортується трубопроводом для узгодження акустичних імпедансів ультразвукового перетворювача та об'єкта контролю. Удосконалено методологію оцінки втрат по всьому акустичному тракту шляхом врахування параметрів середовища, його хімічного складу, тиску та температури. Розроблено узагальнену методологію оцінки рівня втрат та співвідношень поверхневого та донного луноімульсів при безконтактному ультразвуковому контролі в газоподібному середовищі. Отримані результати оцінки дозволили обґрунтувати можливість здійснення

безконтактного ультразвукового контролю з одностороннім доступом до об'єкта контролю за штатних технологічних умов внутрішньотрубної діагностики.

За результатами експериментальних досліджень на розробленій дослідній установці, було підтверджено можливість здійснення безконтактного ультразвукового контролю товщини стінок трубопроводу в умовах близьких до штатних технологічних умов внутрішньотрубної діагностики з одностороннім доступом до об'єкта контролю.

Проведено апробацію удосконаленого методу безконтактного ультразвукового контролю в умовах внутрішньотрубної діагностики на базі розробленої експериментальної установки в умовах НВФ "Зонд" згідно методики експериментальних досліджень. Запропоновано шляхи реалізації розробленого ультразвукового методу внутрішньотрубної діагностики на технічному та нормативному рівнях. Розроблено проект нормативного документу що регламентує вимоги щодо проведення внутрішньотрубної діагностики лінійних частин магістральних газопроводів з використанням внутрішньотрубних засобів що реалізують розроблений удосконалений метод безконтактного ультразвукового контролю.

**Ключові слова:** ультразвуковий контроль, внутрішньотрубна діагностика, безконтактний перетворювач, погоджувальний елемент, акустичний імпеданс

## АННОТАЦИЯ

**Котурбаш Т.Т. Усовершенствование ультразвукового метода внутритрубной диагностики магистральных трубопроводов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г.Ивано-Франковск, 2012.

Диссертация посвящена вопросу безконтактного внутритрубного ультразвукового контроля трубопроводов в технологических условиях эксплуатации.

В первом разделе проведен анализ известных методов и средств внутритрубной диагностики магистральных трубопроводов. Было показано, что в настоящее время наиболее распространенным является метод внутритрубной диагностики с использованием интеллектуальных поршней с магнитными датчиками, недостатком которого является низкая точность и достоверность результатов контроля. Существующие ультразвуковые методы внутритрубной диагностики, несмотря на высокую точность контроля и достоверность контроля, малоприменимы для применения в условиях газопроводов.

Во втором разделе, посвященном теоретическим исследованиям путей усовершенствования ультразвукового метода внутритрубной диагностики для его применения при контроле газопроводов, предложено учесть и использование параметров транспортируемой трубопроводом среды для согласования акустических импедансов ультразвукового преобразователя и объекта контроля. Усовершенствована методология оценки потерь по всему акустическому тракту, путем учета параметров среды, ее химического состава, давления и температуры.

Разработано обобщенную методологию оценки уровня потерь и соотношений поверхностного и донного эхоимпульсов при бесконтактном ультразвуковом контроле в газообразной среде. Методологию можно использовать для разных сред проведения контроля и материалов объекта контроля, с учетом их физических характеристик, а также геометрических параметров процесса контроля (расстояние распространения ультразвука, толщина объекта контролю).

Полученные результаты оценки, уменьшение потери энергии ультразвукового сигнала отраженного от внешней поверхности на 38 дБ и от донной поверхности 70 дБ при давлении газообразной среды 4 МПа, позволили обосновать возможность осуществления бесконтактного ультразвукового контроля с односторонним доступом к объекту контроля при штатных технологических условиях проведения внутритрубной диагностики. Разработанную методологию можно использовать для различных сред проведения контроля и материалов объекта контроля с учета их физических характеристик, а также геометрические параметры процесса контроля (расстояние распространения ультразвука, толщину объекта контроля).

Также предложено методологию определения оптимальных, с точки зрения минимизации потерь энергии, акустических и конструктивных параметров пьезоэлектрического преобразователя в зависимости от характеристик среды контроля и параметров процесса контроля. Она дает возможность выбора оптимального материала (аэрогель) и конфигурации согласительных слоев и уменьшения суммарных потерь энергии ультразвуковых колебаний при осуществлении ультразвукового контроля в штатных технологических условиях проведения внутритрубной диагностики на 40 дБ.

В третьем разделе приведено методику и результаты экспериментальных исследований усовершенствованного метода. Результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью разработанной опытной установки, подтвердили возможность проведения бесконтактного ультразвукового контроля толщины стенок трубопровода, в условиях близких к штатным технологическим условиям проведения внутритрубной диагностики с односторонним доступом к элементу контроля. Повышение давление среды и использование согласующий элементов позволяет дополнительно снизить потери энергии ультразвукового импульса на границах раздела сред и соответственно увеличить амплитуду искомым донных эхоимпульсов. После применения процедур фильтрации и сглаживания удалось четко отделить от помех серию донных эхоимпульсов. Измеренное расстояние между соседними донными эхоимпульсами кратное толщине объекта контроля. Оцененная для диапазона толщин (5,45-9,92 мм) погрешность измерений толщины стенки трубопровода на экспериментальной установке не превышает 5,32 %. Абсолютная погрешность измерений в указанном диапазоне толщин на экспериментальной установке составила 1,07 мм.

В четвертом разделе приведено результаты апробация усовершенствованного метода бесконтактного ультразвукового контроля на базе разработанной экспериментальной установки в условиях НПФ «Зонд», согласно разработанной методики экспериментальных исследований. Также предложено пути реализации усовершенствованного метода ультразвуковой внутритрубной диагностики, на техническом и нормативном уровнях. Разработан проект нормативного документа

регламентирующего требования к проведению внутритрубной диагностики линейных частей магистральных газопроводов, с использованием внутритрубных средств реализующих разработанный усовершенствованный метод бесконтактного ультразвукового контроля. Положения и результаты, полученные в ходе проведенных исследований, были использованы при разработке ряда нормативных документов.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, внутритрубная диагностика, бесконтактный преобразователь, согласующий элемент, акустический импеданс

## ABSTRACT

**Koturbash T.T. Improving of ultrasonic method of internal main pipeline technical diagnosis. – Manuscript.**

Dissertation for the scientific degree of candidate of engineering sciences at specialty 05.11.13 – Instruments and methods of control and determination of composition of the matter. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2012.

This thesis is devoted to the problem of internal pipeline contactless ultrasonic inspection of main pipelines in technological conditions.

It was proposed to take into account and use of environmental conditions of transported through the pipeline medium, to match the acoustic impedance of ultrasonic transducer and control object. The methodology of losses estimation across the acoustic path was improved by the means of considering of parameters of the medium, its chemical composition, pressure and temperature. The generalized methodology for evaluation of ratio of surface and bottom echo-pulse during non-contact ultrasonic testing in a gaseous environment was developed. The results obtained allowed assessment to justify the possibility of non-contact ultrasonic testing with one-way access to the object under operational technological conditions.

According to experimental results on the developed experimental setup, it was confirmed the possibility of noncontact ultrasonic testing of pipeline wall thickness under conditions close to the technological conditions of internal pipeline diagnostic.

An improved method of developed method of contactless ultrasonic testing under conditions of internal main pipeline technical diagnosis on basis of developed experimental setup was validated at RPC "Zond" according to experimental test procedure. Technological and standard development trends of the method of contactless internal pipeline ultrasonic testing were proposed. A draft regulatory document that governs the requirements for conducting of internal pipeline technical diagnostics of linear parts of gas main pipelines using means that implement developed improved method of contactless ultrasonic testing.

**Keywords:** ultrasonic testing, internal pipeline diagnosis, non-contact transducer, matching element, acoustic impedance

Разработано обобщенную методологию оценки уровня потерь и соотношений поверхностного и донного эхоимпульсов при бесконтактном ультразвуковом контроле в газообразной среде. Методологию можно использовать для разных сред проведения контроля и материалов объекта контроля, с учетом их физических характеристик, а также геометрических параметров процесса контроля (расстояние распространения ультразвука, толщина объекта контролю).

Полученные результаты оценки, уменьшение потери энергии ультразвукового сигнала отраженного от внешней поверхности на 38 дБ и от донной поверхности 70 дБ при давлении газообразной среды 4 МПа, позволили обосновать возможность осуществления бесконтактного ультразвукового контроля с односторонним доступом к объекту контроля при штатных технологических условиях проведения внутритрубной диагностики. Разработанную методологию можно использовать для различных сред проведения контроля и материалов объекта контроля с учета их физических характеристик, а также геометрические параметры процесса контроля (расстояние распространения ультразвука, толщину объекта контроля).

Также предложено методологию определения оптимальных, с точки зрения минимизации потерь энергии, акустических и конструктивных параметров пьезоэлектрического преобразователя в зависимости от характеристик среды контроля и параметров процесса контроля. Она дает возможность выбора оптимального материала (аэрогель) и конфигурации согласительных слоев и уменьшения суммарных потерь энергии ультразвуковых колебаний при осуществлении ультразвукового контроля в штатных технологических условиях проведения внутритрубной диагностики на 40 дБ.

В третьем разделе приведено методику и результаты экспериментальных исследований усовершенствованного метода. Результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью разработанной опытной установки, подтвердили возможность проведения бесконтактного ультразвукового контроля толщины стенок трубопровода, в условиях близких к штатным технологическим условиям проведения внутритрубной диагностики и односторонним доступом к объекту контроля. Повышение давление среды и использование согласующий элементов позволяет дополнительно снизить потери энергии ультразвукового импульса на границах раздела сред и соответственно увеличить амплитуду искомых донных эхоимпульсов. После применения процедур фильтрования и сглаживания удалось четко отделить от помех серию донных эхоимпульсов. Измеренное расстояние между соседними донными эхоимпульсами кратное толщине объекта контроля. Оцененная для диапазона толщин (5,45-9,92 мм) погрешность измерений толщины стенки трубопровода на экспериментальной установке не превышает 5,32 %. Абсолютная погрешность измерений в указанном диапазоне толщин на экспериментальной установке составила 1,07 мм.

В четвертом разделе приведено результаты апробация усовершенствованного метода бесконтактного ультразвукового контроля на базе разработанной экспериментальной установки в условиях НПФ «Зонд», согласно разработанной методики экспериментальных исследований. Также предложено пути реализации усовершенствованного метода ультразвуковой внутритрубной диагностики, на техническом и нормативном уровнях. Разработан проект нормативного документа

регламентирующего требования к проведению внутритрубной диагностики линейных частей магистральных газопроводов, с использованием внутритрубных средств реализующих разработанный усовершенствованный метод бесконтактного ультразвукового контроля. Положения и результаты, полученные в ходе проведенных исследований, были использованы при разработке ряда нормативных документов.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, внутритрубная диагностика, бесконтактный преобразователь, согласующий элемент, акустический импеданс

## ABSTRACT

**Koturbash T.T. Improving of ultrasonic method of internal main pipeline technical diagnosis. – Manuscript.**

Dissertation for the scientific degree of candidate of engineering sciences at specialty 05.11.13 – Instruments and methods of control and determination of composition of the matter. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2012.

Thesis is devoted to the problem of internal pipeline contactless ultrasonic inspection of main pipelines in technological conditions.

It was proposed to take into account and use of environmental conditions of transported through the pipeline medium, to match the acoustic impedance of ultrasonic transducer and control object. The methodology of losses estimation across the acoustic path was improved by the means of considering of parameters of the medium, its chemical composition, pressure and temperature. The generalized methodology for evaluation of ratio of surface and bottom echo-pulse during non-contact ultrasonic testing in a gaseous environment was developed. The results obtained allowed assessment to justify the possibility of non-contact ultrasonic testing with one-way access to the object under operational technological conditions.

According to experimental results on the developed experimental setup, it was confirmed the possibility of noncontact ultrasonic testing of pipeline wall thickness under conditions close to the technological conditions of internal pipeline diagnostic.

An improved method of developed method of contactless ultrasonic testing under conditions of internal main pipeline technical diagnosis on basis of developed experimental setup was validated at RPC "Zond" according to experimental test procedure. Technological and standard development trends of the method of contactless internal pipeline ultrasonic testing were proposed. A draft regulatory document that governs the requirements for conducting of internal pipeline technical diagnostics of linear parts of gas main pipelines using means that implement developed improved method of contactless ultrasonic testing.

**Keywords:** ultrasonic testing, internal pipeline diagnosis, non-contact transducer, matching element, acoustic impedance