

620.179  
Л 96

Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу

Лютак Ігор Зіновійович



620.179.1+ (043)  
УДК 622.691.4.002.5  
Л96

**КОНТРОЛЬ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
МЕТАЛУ СТІНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ  
АКУСТИЧНИМИ МЕТОДАМИ**

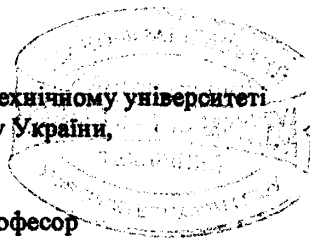
05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

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

Івано-Франківськ – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Івано-Франківськ.



Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор  
**Кісіль Ігор Степанович**,  
завідувач кафедри "Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції" Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
**Дідковський Віталій Семенович**,  
завідувач кафедри "Акустика та акустоелектроніка" національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", м. Київ;

доктор технічних наук, професор  
**Сучков Григорій Михайлович**,  
завідувач кафедри "Прилади і методи неруйнівного контролю" національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків;

доктор технічних наук, професор  
**Заміховський Леонід Михайлович**,  
завідувач кафедри "Комп'ютерні технології і системи управління" Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ.

Захист відбудеться "20" травня 2011 р. 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 дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15)

Автореферат розісланий "19" квітня 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, професор

Дранчук М. М.



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Магістральні трубопроводи становлять значну частку в економічному, соціальному, політичному вимірах життя України. Забезпечення високої надійності їх експлуатації є однією з важливих науково-практичних проблем. У сучасних умовах більша частина магістральних трубопроводів експлуатується понад нормативний термін. В Україні та світі не має чітко визначених правил, нормативних документів, що можуть однозначно дати відповідь про безпечне подовження терміну експлуатації магістральних трубопроводів без попереднього контролю пружних властивостей металу їх стінок з огляду на експлуатацію магістральних трубопроводів в різних кліматичних, геологічних зонах, наявності ділянок трубопроводів, що були піддані значним зовнішнім зусиллям внаслідок повеней, зсувів ґрунту, землетрусів, результатів діяльності людини тощо. Для визначення залишкового ресурсу їх роботи необхідно проводити детальний контроль технічного стану, що складно, а іноді неможливо здійснити існуючими методами з огляду на значну їх довжину, обмежений доступ до всієї поверхні. Частково ця проблема вирішується за допомогою застосування діагностичних поршнів, що поширюються на значні відстані всередині магістральних трубопроводів, проте результати їх контролю не є достатньо достовірними і вимагають перевірки іншими методами, не є достатньо повними, оскільки не дають інформації про напружено-деформований стан стінок трубопроводу та значення пружних констант металу цих стінок. В небезпечних місцях магістрального трубопроводу (повітряні переходи, технологічні коліна, малі товщини стінок) внаслідок значної ваги та швидкості руху діагностичні поршні самі можуть бути джерелом небезпеки, створюючи критичні навантаження.

В Україні значний вклад в розвиток неруйнівного контролю трубопроводів внесли Крижанівський Є. І., Карпаш О. М., Грудз В. Я., Заміховський Л. М., Шлапак Л. С., Грінченко В. Т., Скальський В. Р., Кошовий В. В., Куриляк Д. Б., Осадчук В. А., Білокур І. П., Бондаренко А. І., Гузь А. Н., Вікторов І. А., та зарубіжні науковці П. Коулі, Дж. Роуз, М. Лоуве, Т. Кунду, Дж. Ахенбах, Г. Колский та ін.

Складність визначення всіх деструктивних факторів, що діють на магістральні трубопроводи є причиною відмов їх роботи та аварій. Тільки в Євросоюзі реєструється біля 1000 аварій металевих трубопроводів на рік, які пов'язані з важкими травмами і навіть людськими жертвами. В Україні з 2005 р. по 2007 р. мали місце чотири аварії на магістральних газопроводах в результаті чого було припинено газопостачання до багатьох населених пунктів України, значного пошкодження було нанесено навколишньому середовищу, економіці та міжнародній репутації України.

Це свідчить про недосконалість існуючих методів неруйнівного контролю фізико-механічних параметрів стінок магістральних трубопроводів. Основним недоліком акустичних методів контролю фізико-механічних параметрів стінок магістральних трубопроводів є їх точковість, що дозволяє отримувати інформації про об'єкт лише в незначному за розмірами околі місця прикладання первинного

an 2175 - an 2176

перетворювача до поверхні труби. Забезпечення неперервного контролю лише одного параметру (товщини стінки) можливе лише в спеціальних центрах і не може бути застосоване в натурних умовах експлуатації магістрального трубопроводу.

Причиною недосконалості акустичних методів неруйнівного контролю є недостатній розвиток теоретичних засад про поширення пружних коливань в стінках трубопроводів, що не дає можливості застосовувати на практиці в методах та пристроях неруйнівного контролю ультразвукові спрямовані кільцеві хвилі.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що завдання розвитку теорії, методів та засобів акустичного контролю фізико-механічних параметрів магістральних трубопроводів є актуальним, а їхнє вирішення розв'язує важливу науково-прикладну проблему.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі методів та приладів контролю якості та сертифікації продукції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу відповідно до плану науково-дослідних робіт в межах госпдоговірних, держбюджетних тем та грантів, в яких здобувач був науковим керівником чи відповідальним виконавцем:

- госпдоговірна тема № 16/2008 "Визначення ступеня овальності в окремих перерізах магістральних трубопроводів на КС "Кременчук" для забезпечення "Регламенту проведення паспортизації технологічних трубопроводів обв'язок обладнання компресорних станцій". Номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0108U003020;

- госпдоговірна тема № 267/2004 "Контроль напружено-деформованого стану магістральних газопроводів на підприємствах ДК "Укртрансгаз". Номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0105U004995;

- грант Президента України "Розробка нового методу контролю технічного стану нафтогазопроводів та визначення залишкового ресурсу їх роботи" (GP/F13/0134). Номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0107U004645;

- грант Президента України "Розроблення нового методу неруйнівного контролю ранніх стадій корозії металевих конструкцій" (GP/F27/0150). Номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0110U002628;

- грант фонду фундаментальних досліджень України "Розроблення теорії взаємодії потужного акустичного поля із неоднорідностями в металах для нового неруйнівного термоакустичного методу контролю" (№ держреєстрації 0107U009501);

- грант фонду фундаментальних досліджень України "Дослідження та моделювання взаємодії потужного акустичного поля із неоднорідностями в металах" (№ держреєстрації 0108U006619);

- держбюджетна науково-дослідна робота кафедри методів та приладів контролю якості і сертифікації продукції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу "Наукові основи розробки методів, систем і нормативної бази для вимірювання витрат та контролю обладнання і технологічних параметрів в нафтогазовій галузі" (розділ 2. Контроль технічного

стану трубопроводів. Виконавець). Номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0109U008878;

- держбюджетна тема по кафедрі програмного забезпечення автоматизованих систем (протокол № 9/34 від 21 травня 2008 р.) 2009-2012 рр. "Розробка теоретичних та прикладних концепцій застосування сучасних інформаційних технологій в нафтогазовій галузі" (Виконавець).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення точності та достовірності контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів шляхом розвитку теорії методів та засобів акустичного контролю.

Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі:

- проаналізувати практичні проблеми підвищення безпечної експлуатації магістральних трубопроводів та обґрунтувати підходи для розвитку теорії методів та засобів акустичного контролю пружних властивостей металу їх стінок для забезпечення достовірності та точності результатів контролю з урахуванням умов їх роботи;

- розробити математичні моделі опису поширення горизонтально-поляризованих та мод типу Лемба ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль, відповідне програмне забезпечення їх обчислення та на цій основі визначити дисперсні властивості фазової та групової швидкостей поширення мод цих хвиль в стінці магістральних трубопроводів; розвинути математичну модель опису поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в частотній області, програмне забезпечення її обчислення;

- розробити математичну модель ультразвукового тракту пристрою контролю ультразвуковими спрямованими хвилями пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів;

- розробити метод неруйнівного контролю дефектів у стінках магістральних трубопроводів модами ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль;

- розробити математичну модель залежності швидкості поширення мод ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль від величини напружено-деформованого стану металу трубопроводів та відповідне програмне забезпечення для її застосування;

- розробити методи контролю величини напружено-деформованого стану металу трубопроводів модами ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль;

- розробити метод контролю величини пружних констант металу магістральних трубопроводів модами ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль;

- розробити пристрій генерування та реєстрації ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в умовах експлуатації магістральних трубопроводів, що реалізує методи контролю пружних властивостей металу їх стінок ;

- розробити метод та пристрій неперервного контролю товщини стінок магістральних трубопроводів в натурних умовах їх експлуатації об'ємними ультразвуковими хвилями і математичну модель опису параметрів ультразвукового поля, утвореного переходом однорідної хвилі через нерівну геометричну форму границі розділу рідина-стінка труби, розробити програмне

забезпечення обчислення параметрів луно-імпульсу за висотою акустичного контакту та його хвильовими параметрами;

– провести аналіз процесів утворення, розвитку термоакустичного явища в стінці магістрального трубопроводу та запропонувати методологію оцінювання концентрації теплового поля в околі дефекту із врахуванням фізико-механічних параметрів сталі та величини потужності акустичного поля;

– розробити нові методи та програмне забезпечення обробки сигналів ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль та об'ємних хвиль для підвищення точності обробки інформативної складової сигналу; метрологічну атестацію пристрою, що реалізує методи неруйнівного контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів, технологію проведення контролю розробленими методами, провести аналіз похибок; провести лабораторні та натурні дослідження розробленими методами та засобами.

**Об'єктом досліджень** є процеси деградації пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів.

**Предметом досліджень** є методи та засоби акустичного неруйнівного контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів.

**Методи дослідження.** При вирішенні задач контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів застосовано методи математичного моделювання фізичних процесів в твердих та рідких середовищах, методи скінченних елементів, методи теорії технічної механіки, методи теорії фізики теплових процесів, методи розв'язування диференціальних рівнянь, методи теорії акустики, методи інформаційних технологій розробки програмного забезпечення. При вирішенні задач розроблення засобів акустичного неруйнівного контролю застосовано методи теорії обробки сигналів, методи схемотехніки та конструювання, методи теорії математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основний науковий результат дисертації полягає у підвищенні точності та достовірності контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів шляхом впровадження нових методів ультразвукового контролю в натурних умовах їх роботи з раціональним використанням залучених ресурсів.

Наукова новизна визначається наступними положеннями:

1. Вперше розроблено математичну модель явища акустопружності ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль, що полягає у застосуванні теорії пружності третього порядку Мурнагана. Ця модель дає змогу розраховувати зміну швидкості мод в залежності від величини напружено-деформованого стану металу стінок магістральних трубопроводів.

2. Вперше розроблено метод контролю дійсної величини напружено-деформованого стану металу магістральних трубопроводів за зміною швидкості поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль і дає можливість проводити контроль ділянки труби за одне вимірювання та в складнодоступних місцях для поширення ультразвукових методів. Подальшого розвитку набули методи контролю перерозподілу величини напружено-деформованого стану по околу та по довжині магістрального трубопроводу, що базуються на явищі акустопружності мод ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль, що дають

можливість проводити контроль без даних про швидкість поширення цих мод у ненапруженому металі.

3. Вперше розроблено метод контролю пружних констант металу стінок магістральних трубопроводів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями, який полягає у визначенні зміни часу поширення кільцевих хвиль в стінці труби в залежності від значень пружних констант, що дає змогу збільшити достовірність визначення опору металу магістрального трубопроводу до деформацій при прикладених до нього зовнішніх зусиллях.

4. Вперше розроблено метод неперервного контролю товщини стінок магістральних трубопроводів із нерівномірною поверхнею в умовах їх експлуатації об'ємними ультразвуковими хвилями, який полягає у забезпеченні постійного акустичного контакту на його ділянці, що дає змогу проводити контроль як основного металу, так і зварних з'єднань. Для підвищення точності контролю запропонованим методом розроблено математичну модель опису параметрів ультразвукового поля утвореного переходом однорідної хвилі через нерівну геометричну форму границі розділу рідина-стінка труби.

5. Вперше побудована математична модель ультразвукового тракту пристрою контролю ультразвуковими спрямованими хвилями пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів, що враховує параметри коливань первинного перетворювача. Ця модель становить теоретичну основу для створення процедур обробки експериментальних сигналів з метою виключення з результатів вимірювання швидкості поширення ультразвукових спрямованих хвиль систематичних похибок, які вносяться первинними перетворювачами.

6. Подальшого розвитку набули метод неруйнівного контролю дефектів у стінках магістральних трубопроводів та математичні моделі опису поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в часовій та частотній областях, що дає змогу виявляти як поверхневі так і донні дефекти на певній ділянці за одне вимірювання та проводити контроль в складнодоступних місцях для поширених методів ультразвукового контролю.

7. Подальшого розвитку набули теоретичні основи і методологія оцінювання та прогнозування параметрів термоакустичного явища на основі досліджень концентрації теплової енергії в околі дефекту при існуванні потужного акустичного поля, що дає змогу розробляти нові методи контролю дефектів в стінках магістральних трубопроводів.

### **Практичне значення одержаних результатів**

– розроблено та виготовлено систему КТУ-1 (контроль труб ультразвуковий), розроблено і затверджено в установленому порядку “Технологію проведення неруйнівного контролю нафтогазопроводів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями” цією системою;

– розроблено та виготовлено пристрій УНКТ-1 неперервного контролю товщини стінок магістрального трубопроводу в умовах експлуатації ультразвуковими об'ємними хвилями, програмне забезпечення розрахунку ультразвукового поля утвореного переходом однорідної хвилі через нерівну

геометричну форму границі розділу рідина-стінка труби та розрахунку параметрів луно-імпульсу при контролю товщини стінки труби;

- розроблено програмне забезпечення в пакеті математичного числення Matlab, що дозволяє отримувати дисперсні властивості групової та фазової швидкостей поширення горизонтально-поляризованих та мод типу Лемба ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в стінках магістральних трубопроводів;

- розроблено програму в пакеті прикладних програм Ansys, що дозволяє проводити аналіз дисперсних властивостей ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль засобами скінченних елементів із застосуванням модального підходу, розроблено програму в пакеті прикладних програм Comsol, що дозволяє розраховувати розподіл поля ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі в стінці труби в частотній області;

- розроблено програму розрахунку частоти сигналу ультразвукової хвилі в реальному часі в середовищі Matlab, модель обробки аналогового сигналу реалізованого в середовищі Simulink;

- розроблено і затверджено в установленому порядку “Методику метрологічної атестації системи ультразвукового контролю труб КТУ-1”, що дозволяє проводити метрологічну атестацію системи контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями;

- розроблено алгоритми обробки сигналів об’ємних та спрямованих кільцевих хвиль, які полягають у виокремленні інформаційних складових із загального сигналу з завадами, визначенні частоти сигналу в реальному часі, визначенні часу приходження вибраного періоду луно-імпульсу, що дає змогу на відміну від існуючих методів підвищити точність обробки сигналів при реалізації методів ультразвукового неруйнівного контролю стінок магістральних трубопроводів.

Проведені лабораторні дослідження контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями, які підтверджують ефективність розроблених методів і засобів.

На державному підприємстві “Придніпровські магістральні нафтопроводи” ВАТ “Укртрансгаз” впроваджені методи контролю пружних властивостей металу стінок магістральних нафтопроводів (контроль величини напружено-деформованого стану, наявності дефектів в стінках трубопроводів, контроль значення пружних констант: модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона) ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями, що дозволить підвищити безпеку їх експлуатації.

На державному підприємстві Науково-виробничий центр “Техдіагаз” дочірньої компанії “Укртрансгаз” впроваджені методи контролю параметрів технічного стану магістральних газопроводів (контроль величини напружено-деформованого стану, наявності дефектів в стінках трубопроводів, контроль значення пружних констант: модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона) ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями. Здійснено контроль



повітряних переходів магістральних трубопроводів розробленою системою КТУ-1 згідно "Технології проведення неруйнівного контролю нафтогазопроводів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями". Виявлено перевищення допустимих напружень в повітряному переході магістрального газопроводу "Союз" 2439-й км. через р. Саджавка розташованого в с. Глибівка, Богородчанського р-н., Івано-Франківської обл. Результати впровадження дозволять підвищити надійність та безпеку експлуатації магістральних газопроводів.

На державному виробничо-ремонтному технічному підприємстві "Укргазенергосервіс" впроваджено та передано систему КТУ-1 та методи контролю параметрів технічного стану магістральних газопроводів (контроль величини напружено-деформованого стану, наявності дефектів в стінках трубопроводів, контроль значення пружних констант: модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона) ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями. Здійснено контроль наявності дефектів, пружних констант, величини напружено-деформованого стану на магістральних газопроводах компресорних станцій в м. Богородчани Івано-Франківської обл. та м. Бар Вінницької обл.

На державному виробничо-ремонтному технічному підприємстві "Укргазенергосервіс" впроваджено та передано пристрій УНКТ-1 неперервного контролю товщини стінок магістрального трубопроводу. Проведено перевірку пристрою УНКТ-1 на газопроводах компресорної станції в м. Богородчани Івано-Франківської обл., що показала необхідну точність та ефективність застосування пристрою.

На підприємстві "Подільський експертно-технічний центр" впроваджено та передано пристрій УНКТ-1 неперервного контролю товщини стінок магістрального трубопроводу. Проведено перевірку методики та пристрою УНКТ-1 на зразках та елементах паропроводу IV-ї категорії ТЕЦ Красилівського цукрового заводу. Встановлено достовірність результатів контролю пристроєм УНКТ-1.

Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів напрямку приладобудування та приладів і систем неруйнівного контролю в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно: розвиток теорії, методів та засобів акустичного контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів, розроблення математичних моделей: поширення горизонтально-поляризованих та мод типу Лемба ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в часовій та частотній областях, модель ультразвукового поля, утвореного переходом однорідної хвилі через нерівну геометричну форму границі розділу рідина-стінка труби, модель опису процесу генерування ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі чутливим елементом із застосуванням імерсійного акустичного контакту; розроблення методів та пристрою контролю напружено-деформованого стану, величини пружних констант та наявності дефектів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями, методу та пристрою неперервного контролю

товщини стінок магістральних трубопроводів об'ємними ультразвуковими хвилями.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: розроблення підходу реалізації термоакустичного методу неруйнівного контролю технічного стану металевих конструкцій, обґрунтування хвильового аспекту та застосування теорії механіки руйнування в термоакустичному методі [17]; концепція та методологія застосування Р-снейк алгоритму для знаходження дефектів в металевих виробках на основі термоакустичного методу контролю [18]; математичний опис і спосіб збудження окремої моди ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі в стінці трубопроводу, підхід виокремлення інформативної складової із групи мод з використанням декількох ультразвукових первинних перетворювачів [19]; ідея та обґрунтування напрямку, постановка задачі досліджень взаємодії неоднорідності в металі із ультразвуковою хвилею, розроблення моделі тертя при контакті твердих тіл [20]; метод визначення параметрів загасання хвиль Лемба в ізотропному пружному середовищі, математичний опис процесу загасання ультразвукової хвилі [21]; методи проектування та тестування, реалізація програмного забезпечення, підхід моделювання клієнт-серверної частини програми з використанням універсальної мови моделювання [22]; розроблення методу обробки ультразвукового сигналу в частотній області, побудова адаптивного алгоритму та програмного забезпечення [23]; математична модель поширення ультразвуку в металах в залежності від величини навантажень [24]; концепція дослідження модальних параметрів повітряних переходів магістральних газопроводів, метод обробки експериментальних результатів [25]; підхід для моделювання скінченими елементами поширення ультразвукової поверхневої хвилі в металевій пластині при змінених фізико-механічних властивостях поверхневого шару [26]; алгоритм оброблення сигналів ультразвукових поверхневих хвиль, що базується на теорії вейвлет перетворення [27]; ідея та обґрунтування напрямків досліджень, дослідження фізичних процесів в магістральних трубопроводах [28]; модель поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль, проведення лабораторних досліджень генерування та аналізу сигналів [29]; ідеї та технічні рішення нових принципів і конструкторських вдосконалень ультразвукових пристроїв [32, 33]; метод обчислення поширення ультразвукової хвилі в металі [35]; математична модель поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль [38].

**Апробація роботи.** Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: VI International Conference "Strategy of Quality in Industry and Education", Varna, Bulgaria, 2008, 2010; Міжнародній науково-технічній конференції "Електромагнітні і акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів і виробів ЛЕОТЕСТ", Славське Львівської обл., 2009, 2010; Відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України "Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи", Львів, 2009; 6-а Національно-технічній конференції і виставці "Неруйнівний контроль та технічна діагностика", Київ, 2006, 2009;

Шестнадцятої міжнародної конференції "Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики", г. Ялта, 2008, 2009; IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Sofia, Bulgaria, 2005; The 8-th conference of computer aided science, industrial and transport "TransComp 2004", Zakopane, Poland, 2004; 8-й міжнародній науково-практичній конференції "Нафта і газ України - 2004", Судак, 2004; 3-й науково-технічній конференції "Приладобудування 2004 стан і перспективи", Київ, 2004, 2008; "Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія - 2008)", Харків, 2008; Міжнародної конференції "Научные основы внедрения новых технологий в эпоху Нового Возрождения", Туркменистан, 2009; Міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи", м. Івано-Франківськ, 2009; Міжнародній науково-технічній конференції "Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні" ІКТМ'2007", м. Харків, 2007; Міжнародній науково-технічній конференції "Ресурсозберігаючі технології у нафтогазовій енергетиці" ІФНТУНГ-40", м. Івано-Франківськ, 2007.

**Публікації.** Основні положення дисертації викладені у 45-и публікаціях, в тому числі в 1 монографії, 28 статтях (із них 15 одноосібних) у фахових наукових виданнях ВАК України, в 3-х одноосібних патентах України, 2-х патентах України на корисну модель та 11-ти публікаціях (із них 9 одноосібних) за матеріалами міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, висновку, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 433 сторінок, із них 288 сторінки основного тексту, що включає 57 рисунків і 7 таблиць. Список використаних джерел 243 найменування на 24 сторінках, 14 додатків на 120 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів дисертаційних досліджень, їх апробацію та публікації.

У першому розділі досліджено сучасний стан проблеми контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів та підвищення точності та достовірності контролю.

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що сучасний стан ультразвукових методів неруйнівного контролю має ряд недоліків, які не дозволяють застосовувати їх ефективно. До таких недоліків слід віднести:

- недостатній розвиток теорії поширення ультразвукових коливань, що не дозволяє в повній мірі застосовувати спрямовані хвилі для контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів;
- недостатня функціональність існуючих засобів для ультразвукового контролю спрямованими хвилями;

- наявність обмежень (щодо засобів генерування та прийому пружних коливань) у застосуванні об'ємних ультразвукових хвиль при неперервному контролі стінок магістральних трубопроводів в експлуатаційних умовах;

- недостатній розвиток методів обробки сигналів при використанні ультразвукових спрямованих хвиль.

На підставі викладеного сформовані основні завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі викладено теоретичні основи поширення пружних коливань в пластині, розроблено математичні моделі обчислення параметрів ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль (УСКХ) в стінці трубопроводу (горизонтально-поляризованих мод та мод типу Лемба); приведено теоретичні основи, що пояснюють спосіб утворення та поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінці труби; представлено способи селективного збудження мод УСКХ прямим первинним перетворювачем.

На основі математичних залежностей показано, що поздовжні та поперечні ультразвукові хвилі можуть поширюватись в будь-якому напрямку в пружному середовищі (при відсутності границь розділу середовищ), причому швидкість поширення таких хвиль не залежить від напрямку. При наявності границь розділу середовища хвильова енергія переноситься спрямованими ультразвуковими хвилями.

Приведені математичні описи поширення симетричної та антисиметричної мод ультразвукових спрямованих хвиль для пластини із границями розділу середовище пластини – повітря у формі прямої лінії. Показано, що для опису поширення спрямованих хвиль у пружному середовищі із криволінійними границями розділу необхідно взяти до уваги радіус кривизни.

Для опису поширення горизонтально-поляризованих мод УСКХ розроблено математичну модель:

$$DJ'(k_0, k_r, r_1)DY'(k_0, k_r, r_2) - DJ(k_0, k_r, r_2)DY(k_0, k_r, r_1) = 0, \quad (1)$$

де  $k_0$  - кутове хвильове число;  $DJ$  та  $DY$  - асимптотичні ряди Дебая;  $k_r$  - хвильове число об'ємної поперечної хвилі;  $r_1, r_2$  - відповідно внутрішній та зовнішній радіуси труби;  $r, \theta, z$  - осі циліндричної системи координат (вісь  $z$  співпадає із віссю трубопроводу).

Введення рядів Дебая дозволило вирішити задачу сходження математичної моделі опису поширення горизонтально-поляризованих мод УСКХ для магістральних трубопроводів з великими значеннями діаметрів та товщин стінки при частотах, що застосовуються в неруйнівному контролі (більше 1 МГц).

$$DJ(k_0, \text{sech } \alpha) = \frac{e^{k_0(\tanh \alpha - \alpha)}}{\sqrt{2\pi k_0 \tanh \alpha}} \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{s_k(\coth \alpha)}{k_0^k} \right), \quad (2)$$

$$DY(k_0, \text{sech } \alpha) = \frac{e^{k_0(\alpha - \tanh \alpha)}}{\sqrt{(1/2)\pi k_0 \tanh \alpha}} \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{s_k(\coth \alpha)}{k_0^k} \right),$$

де  $s_0(t) = 1$ ,  $s_1(t) = (3t - 5t^3) / 24$ ,  $s_2(t) = (81t^2 - 462t^4 + 385t^6) / 1152$ ,

$$s_3(t) = (30375t^3 - 369603t^5 + 765765t^7 - 425425t^9) / 414720,$$

$$s_4(t) = \left( 4465125t^4 - 94121676t^6 + 349922430t^8 - \right. \\ \left. 446185740t^{10} + 185910725t^{12} \right) / 39813120.$$

$\alpha$  - параметр, який розраховується із виразу  $kr = \nu \cdot \operatorname{sech} \alpha$ .

В роботі представлено формули для обчислення похідних функцій Дебая.

Для використання розв'язку необхідно визначити граничні умови на межі розділу середовищ поверхонь труби та зовнішнім і внутрішнім просторами. В загальному розглянуто такі випадки граничних умов: а) пружне середовище – повітря, б) пружне середовище – рідина. У випадку границь розділу пружне середовище – повітря тангенційні компоненти напружень дорівнюватимуть нулю, оскільки вся хвильова енергія буде відбиватись від цього розділу середовищ (для спрощення зроблено припущення, що передана в повітря хвильова енергія є дуже малою і не впливає на загальний розв'язок):

$$\sigma_{rr} = 0, \quad (3)$$

де  $\sigma$  - напруження в елементарному об'ємі пружного середовища.

У випадку границь розділу пружне середовище – рідина, прийнято, що рідина є ідеальною, тобто в ній відсутні зміщення в напрямку осі  $z$ :

$$u_z = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad (4)$$

де  $u$  - зміщення в елементарному об'ємі пружного середовища.

Додатково застосовано гармонійну граничну умову Неймана, яка є загальнопринятною умовою поширення гармонійних акустичних коливань:

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial r} \right|_{r=r_1, r=r_2} = 0 \quad (5)$$

Результати обчислення математичної моделі згідно з розробленою програмою в середовищі Matlab, (рис. 1) показує значну кількість мод.

Математична модель опису поширення мод типу Лемба УСКХ розроблена, враховуючи, що коливання елементарного об'єму такої хвилі є поляризованими в напрямках  $r$  та  $\theta$ . Тому опис поля механічних коливань елементарного об'єму середовища описуватиметься двома диференційними рівняннями для кожної об'ємної хвилі  $\Gamma_i$ , які формують УСКХ (рис. 2).

Як видно із рис. 2, компоненти напружень  $\sigma_{rr}$  та  $\sigma_{r\theta}$ , що описують параметри мод УСКХ, формуються чотирма об'ємними ультразвуковими хвилями, поздовжніми та поперечними.

Для знаходження невідомих амплітуд об'ємних хвиль необхідно розв'язати таке характеристичне рівняння:

$$\Lambda_y \times \Gamma_i = 0, \quad (6)$$

де  $\Lambda_y$  – члени характеристичної матриці, які визначаються частотою та хвильовим числом.

Елементи матриці  $\Lambda$  є такими:

$$\Lambda_{11} = M \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_m} DJ(k_\theta, k_r r_m) + \\ + k_i DJ'(k_\theta, k_r r_m) \end{bmatrix}, \quad \Lambda_{12} = M \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_m} DY(k_\theta, k_r r_m) + \\ + k_i DY'(k_\theta, k_r r_m) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\Lambda_{13} = \mu \begin{bmatrix} \frac{k_i}{r_m} DJ'(k_\theta, k_r r_m) - \\ - \frac{k_\theta^2}{r_m^2} DJ(k_\theta, k_r r_m) \end{bmatrix}, \quad \Lambda_{14} = \mu \begin{bmatrix} \frac{k_i}{r_m} DY'(k_\theta, k_r r_m) - \\ - \frac{k_\theta^2}{r_m^2} DY(k_\theta, k_r r_m) \end{bmatrix},$$

$$\Lambda_{21} = -\lambda k_i^2 DJ(k_\theta, k_r r_m), \quad \Lambda_{22} = -\lambda k_i^2 DY(k_\theta, k_r r_m), \quad \Lambda_{23} = -(1/r_m) M \cdot DJ(k_\theta, k_r r_m) +$$

$$+ M \cdot k_i DJ'(k_\theta, k_r r_m), \quad \Lambda_{24} = -(1/r_m) M \cdot DY(k_\theta, k_r r_m) + M \cdot k_i DY'(k_\theta, k_r r_m),$$

де  $m$  – індекс, що дорівнює 1 для перших двох рядків матриці  $\Lambda$  і дорівнює 2 для останніх двох рядків;  $M = 2\mu i k_\theta / r_m$  – змінна.

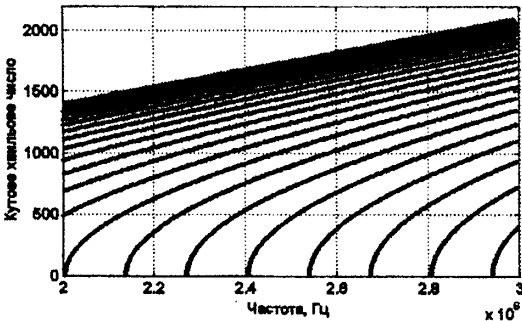


Рис. 1. Дисперсійна крива горизонтально – поляризованої моди УСКХ для труби  $\varnothing 720$  мм

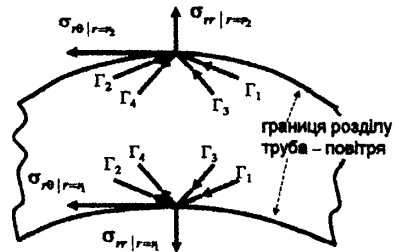


Рис. 2. Граничні умови математичної моделі при поширенні мод типу Лемба УСКХ

Останні два рядки мають такий самий вигляд, як перші за виключенням того, що використовується індекс  $m = 2$ .

Математична модель розв'язується числовим методом розробленою програмою (рис. 3).

Розроблені математичні моделі дають змогу поводити аналіз зміни хвильових параметрів мод в залежності від величини пружних властивостей стінок магистральних трубопроводів та здійснювати селективний вибір мод при їх генеруванні ультразвуковим первинним перетворювачем.

Приведено застосування модального підходу для обчислення параметрів УСКХ в стінці труби. Результати модального аналізу продемонстрували наявність в об'єкті дослідження власних форм коливань, які залежать від частоти.

Перевагами модального підходу є можливість знаходження дисперсних параметрів УСКХ труб, в яких існує овальність, що дозволяє значно розширити область використання таких хвиль в неруйнівному контролі. Їїм недоліком є складність обчислення параметрів УСКХ при селективному генеруванні та реестрації мод ультразвуковими первинними перетворювачами.

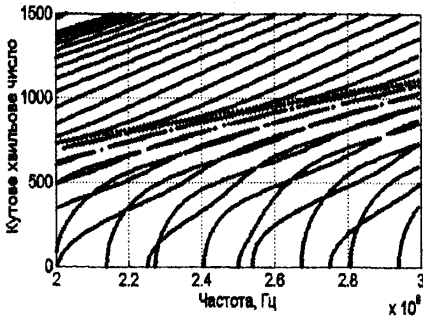


Рис. 3. Дисперсійна крива мод типу Лемба УСКХ для труби  $\varnothing 720$  мм

Проведено аналіз підходів збудження мод УСКХ. Детально розглянуто два основних способи генерування УСКХ. До першого належить спосіб, при якому розміщення первинного перетворювача є нормальним до поверхні труби. Другим способом є застосування нахиленого первинного перетворювача. Встановлено, що кожний із способів генерування УСКХ може бути застосований для неруйнівного контролю. В

кожному способі генерується власний набір мод, що дозволяє розширити можливості ультразвукового контролю за допомогою УСКХ.

В третьому розділі розроблено математичну модель типового ультразвукового тракту пристрою контролю пружних властивостей металу стінок магистральних трубопроводів, в якому реалізується контактний спосіб збудження і прийому (реєстрації) ультразвукових хвиль і який складається з двох п'єзоелектричних перетворювачів, які пов'язані між собою металевим хвилеводом; розроблено математичну модель поширення УСКХ в частотній області; представлено модель загасання амплітуди УСКХ при поширенні однієї та кількох мод одночасно; розроблено математичну модель генерування УСКХ в стінці труби первинним перетворювачем.

В розробленій математичній моделі типового ультразвукового тракту враховано, що енергія від генеруючого первинного перетворювача переноситься в хвилеводі кількома десятками симетричних та антисиметричних мод Лемба, що поширюються в радіальному напрямку. Кожна із мод Лемба має різні частотні залежності фазової і групової швидкостей. Сумування цих мод в точці спостереження (приймального первинного перетворювача) супроводжується додатковими часовими та фазовими зсувами імпульсу, що призводить до появи дисперсійної систематичної похибки визначення часу приходу ультразвукового сигналу.

Результати розрахунку параметрів симетричних та антисиметричних мод Лемба згідно розроблених математичних моделей представлено на рис. 4а і рис. 4б. У правій півплощині (рис. 4а і рис. 4б) показано початкову ділянку частотного спектру хвильових чисел симетричних і антисиметричних хвиль Лемба відповідно. Номери нормальних хвиль показані на рисунках курсивом. По осі абсцис у правій півплощині відкладається безрозмірне хвильове число  $\zeta = 2hk/\pi$ ; по осі ординат - безрозмірна частота  $\Omega = 2h\omega/(\pi v_s)$ , ( $v_s$  - швидкість хвиль зсуву в матеріалі хвилеводу). Тонкими штриховими лініями у правій півплощині показані залежності  $\zeta = \Omega$  (ця пряма виділена малою латинською літерою  $s$ ) і  $\zeta = \Omega\sqrt{\xi}$  (пряма виділена символом  $\ell$ ), де  $\xi = (1 - 2\nu)/[2(1 - \nu)]$ ;  $\nu$  -

коефіцієнт Пуасона. Прямі  $\ell$  і  $s$  визначають хвильові числа поздовжніх і зсувних хвиль, що не взаємодіють між собою. Хвильові числа симетричних хвиль Лемба показані штриховими кривими, на які накладено відрізки суцільних кривих. Ці криволінійні відрізки виділяють частотний діапазон, в межах якого групова швидкість відповідної нормальної хвилі має найбільше значення в порівнянні з іншими модами. Графіки групових швидкостей  $v_g/v_s$  ( $v_g$  – групова швидкість) показані в лівій півплощині рис 4а і рис. 4б суцільними кривими. Штриховими кривими в лівій півплощині показані графіки фазових швидкостей  $v_f/v_s$  ( $v_f$  – фазова швидкість). Групові швидкості антисиметричних хвиль Лемба мають найбільші значення, порівняно з іншими модами, не в одному, а в декількох частотних діапазонах (ліва півплощина на рис. 4б). Це є istotною їх відмінністю від симетричних хвиль Лемба, групові швидкості яких домінують в одному частотному діапазоні. З цієї причини у правій півплощині рис. 4б не зроблено виділення частотних діапазонів.

Виділені ділянки дисперсійних кривих на рис. 4а, досить щільно прилягають до прямої  $\ell$ , тобто хвильові числа  $\zeta$  в межах цих ділянок незначно відрізняються від хвильового числа поздовжньої хвилі. При  $\zeta = \Omega\sqrt{\xi}$  симетрична хвиля Лемба максимально відбирає енергію від джерела пружних збурень, якщо воно забезпечує поздовжні пульсації в області навантаження пластини зовнішніми силами. Таким чином, енергосмісткість і, отже, енергоперенесення, що забезпечується симетричною хвилею Лемба, яка збуджується джерелом поздовжніх зміщень, є максимальною у частотному діапазоні, де її групова швидкість стає найбільшою, порівняно з груповими швидкостями інших симетричних мод.

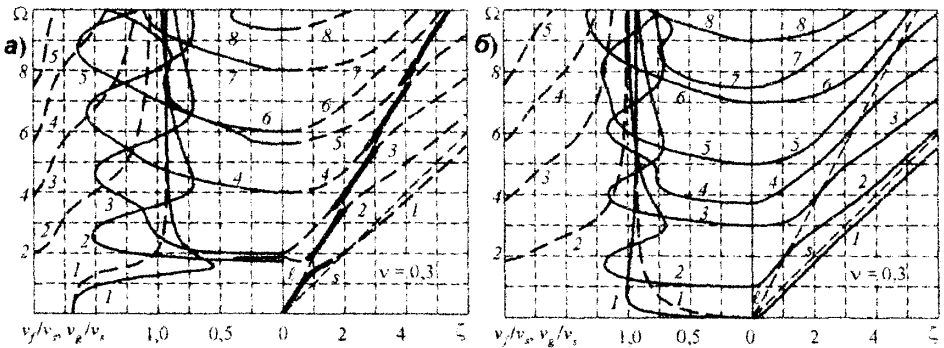


Рис. 4. Фазові (---), групові (—) швидкості (ліва півплощина) і частотний спектр хвильових чисел (права півплощина) а) симетричних б) антисиметричних хвиль Лемба

Розроблено математичну модель контактного п'єзоелектричного первинного перетворювача в режимі збудження хвиль Лемба, що враховує геометричні, електричні, механічні параметри його конструктивних елементів та геометричні, механічні параметри хвилеводу.



Розрахунки потоків потужності мод Лемба, що поширюються в напрямку від генеруючого первинного перетворювача в хвилеводі виконувалися для п'єзоелектричного перетворювача з кераміки ЦТС-19 (з товщиною чутливого елемента  $h_{\alpha}=10^{-3}$  м, радіусом  $2 \cdot 10^{-3}$  м, вихідним опором генератора 100 Ом), який знаходиться на поверхні сталевій пластині, півтовщина якої  $10^{-2}$  м. На виході генератора електричних сигналів підтримується різниця електричних потенціалів 1 В. По вертикальній осі на рис. 5 відлічуються абсолютні значення потоків потужності в мікроватах. Графік потоку потужності для кожної моди побудований на окремому вертикально розташованому перерізі, основа якого розташована на горизонтальній площині рисунка. Номери перерізів  $n$ , що відповідають номерам мод симетричних і антисиметричних хвиль Лемба, проставлені уздовж бічних сторін горизонтальних площин.

Чітко виражені сплески рівнів потужності спостерігаються в околі частоти  $\Omega \approx 8,2$ , що обумовлено першим радіальним резонансом п'єзокерамічного диска. На частотах  $\Omega > 8,2$  ефективність збудження хвиль Лемба різко падає. На частотах  $\Omega > 12$  статус домінуючих за рівнями переносної енергії набувають перші симетрична і антисиметрична моди Лемба.

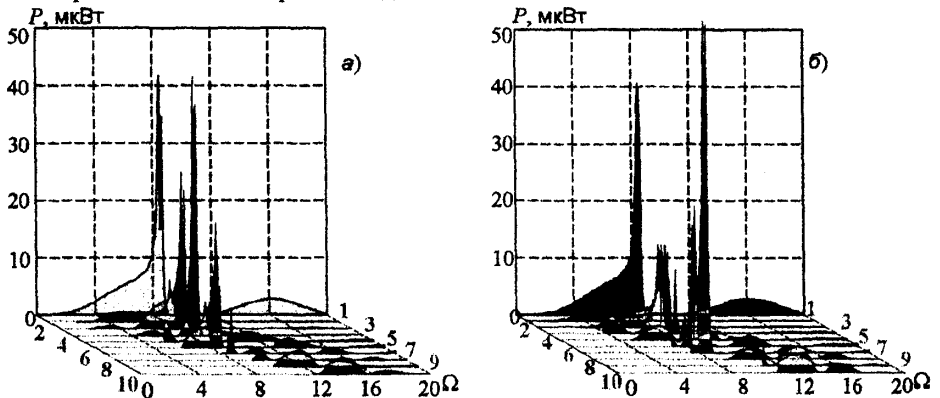


Рис. 5. Потоки потужності, що виносяться першими десятима а) симетричними, б) антисиметричними хвилями Лемба, що поширюються у радіальному напрямку вздовж хвилеводу від ультразвукового генеруючого первинного перетворювача

Розроблено математичну модель опису поширення УСКХ в частотній області. Рівняння, що описує поширення пружних коливань спрямованих хвиль в частотній області є таким:

$$\begin{aligned} -\rho \cdot \omega^2 \cdot \hat{u}_1 &= \hat{c}_{11} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1^2} + \hat{c}_{12} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_2^2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1 \partial x_2}, \\ -\rho \cdot \omega^2 \cdot \hat{u}_2 &= \hat{c}_{22} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_2^2} + \hat{c}_{12} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\hat{u}$  – перетворення Фур'є зміщення елементарного об'єму;  $\hat{c}_y = \text{Re}(\hat{c}_y) + \text{Im}(\hat{c}_y)$  – комплексне число, дійсна частина якого відповідає константі жорсткості

пружного середовища а уявна частина відповідає загасанню амплітуди;  $x_i$  – Декартові координати;  $\rho$  – густина пружного середовища;  $\omega$  – частота.

Граничні умови задано у вигляді узагальненого рівняння Неймана:

$$n_i \cdot (C_{ij} \nabla u_j + \alpha_{ij} u_j - \gamma_{ij}) + q_{ij} u_j = g_i, \quad (9)$$

де  $n_i$  – вектор нормалі до границь розділу пружного середовища;  $\alpha_{ij}$ ,  $\gamma_{ij}$ ,  $q_{ij}$ ,  $g_i$  – коефіцієнти матриці рівняння Неймана.

У випадку моделювання поширення УСКХ матриці  $\alpha_{ij}$  та  $\gamma_{ij}$  дорівнюватимуть нулю. Ненульова матриця  $q_{ij}$  буде присутньою на всіх границях розділу середовища, оскільки вона визначає, що хвиля може поширюватись у їх околі. Матриця  $g_i$  буде визначена на тій границі розділу середовищ, де буде присутнім джерело коливань. На всіх інших границях розділу матриця  $g_i$  дорівнюватиме нулю.

Форма середовища стінки труби, де поширюється УСКХ, задається розподілом ненульових значень густини та констант матриці жорсткості у Декартовій системі координат так:

$$\begin{cases} \rho(x_1, x_2) = \rho_{cm}, r_1 \leq CR(x_1, x_2) \leq r_2, & \rho(x_1, x_2) = 0, r_2 < CR(x_1, x_2) < r_1, \\ C_{ij}(x_1, x_2) = C_{ijcm}, r_1 \leq CR(x_1, x_2) \leq r_2, & C_{ij}(x_1, x_2) = 0, r_2 < CR(x_1, x_2) < r_1, \end{cases} \quad (10)$$

де  $CR(x_1, x_2) = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$  – функціонал визначення профілю стінки труби;  $r_1$ ,  $r_2$  – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси труби.

Обчислення переміщень елементарного об'єму визначається граничними умовами, оскільки отримання розв'язку для них передбачається в тому місці середовища, де є ненульові значення густини та жорсткості. Граничні умови для ультразвукових хвиль на внутрішній та зовнішній границях стінки труби будуть вільними:

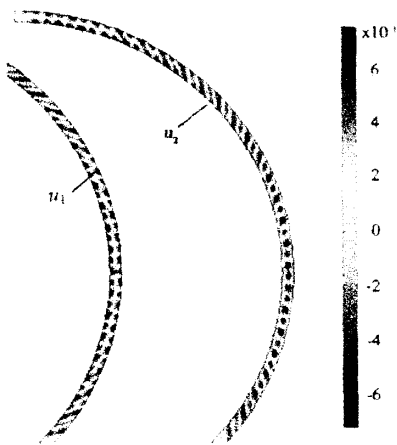
$$u_{i|CR=r_1} \Rightarrow n_i \cdot (C_{ij} \nabla u_j) - \rho \cdot \omega \cdot u_i = 0, \quad u_{i|CR=r_2} \Rightarrow n_i \cdot (C_{ij} \nabla u_j) - \rho \cdot \omega \cdot u_i = 0, \quad (11)$$

де  $CR = r_1 -$ ,  $CR = r_1 +$  – відповідно координата середовища на границі розділу метал-повітря стінки труби.

Обчислення математичної моделі проводиться розробленою програмою в середовищі Comsol (рис. 6). Результати обчислень дозволили провести аналіз зміни частотних характеристик мод, що одночасно поширюються в стінці магістрального трубопроводу, встановити закони зміни їх хвильових параметрів, що дозволило реалізувати методи ультразвукового контролю.

Для визначення ефективної ділянки контролю по околу стінки магістральних трубопроводів проведено аналіз та розроблено модель загасання амплітуди мод УСКХ, обчислити основні тенденції, тренди, форму кривих загасання.

Розроблено математичну модель генерування УСКХ в стінці труби первинним перетворювачем. Розв'язок математичної моделі отримано розробленою програмою, рис. 7. Отримана математична модель дозволила отримати нові знання про процеси утворення УСКХ, унаочнити розподіл хвильових параметрів в стінці труби та більш ефективно застосовувати ці хвилі на практиці.



$u_1, u_2$  – відповідно амплітуди спектрів УСКХ хвиль поляризованих в напрямках осей  $x_1, x_2$

Рис. 6. Розподіл амплітуд спектру УСКХ по товщині стінки труби на частоті 135 кГц

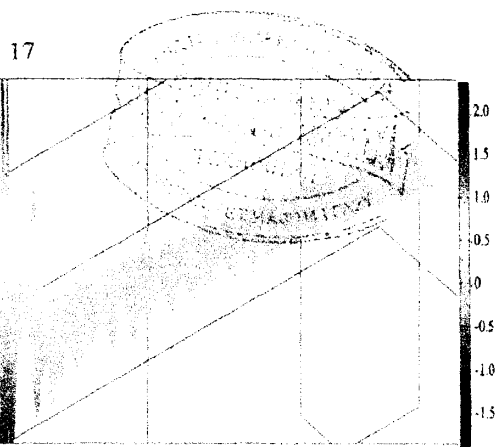


Рис. 7. Утворення УСКХ від поздовжньої хвилі згенерованої п'єзопластиною

**В четвертому розділі** розроблено методи контролю величини напружено-деформованого стану, пружних констант, наявності дефектів в метали стінок магістральних трубопроводів за допомогою УСКХ, розроблено математичну модель акустопружності УСКХ.

Для розроблення методу контролю дефектів за допомогою УСКХ було розроблено математичну модель взаємодії мод цих хвиль із дефектом. Для обчислення моделі розроблено програмне забезпечення на основі методу скінченних елементів, рис. 8. Отримані луно-імпульси від відбитих від дефектів хвиль показують, що їх амплітуда виокремлюється із завад. Проведений аналіз сигналу УСКХ відбитого від дефекту в частотній області, рис. 9.

Із частотного аналізу можна побачити, що луно-імпульс від дефекту відрізняється від іншої частини сигналу УСКХ своїм частотним діапазоном і має пікову форму. Це дозволяє стверджувати, УСКХ розподілена по товщині стінки неоднорідно в частотному діапазоні. У результаті порівняння величин спектрів трьох частин сигналу УСКХ можна зробити висновок про значну амплітуду тієї частини сигналу, яка формувалась хвилею відбитою від дефекту.

Це дозволило визначити необхідні параметри для проведення контролю дефектів в стінках магістральних трубопроводів за допомогою УСКХ.

Розроблено підхід визначення місцеположення дефекту по околу стінки труби та по товщині стінки на основі аналізу луно-сигналів отриманих від горизонтально-поляризованих мод та мод типу Лемба УСКХ.

Розроблено математичну модель акустопружності ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль. Швидкість поширення мод обчислюється із модального підходу опису поширення УСКХ за таким рівнянням:

$$(k^2[K\Pi_2] + k[K\Pi_1] + [K\Pi_0] - \omega^2[M])\{u\} = \{0\},$$

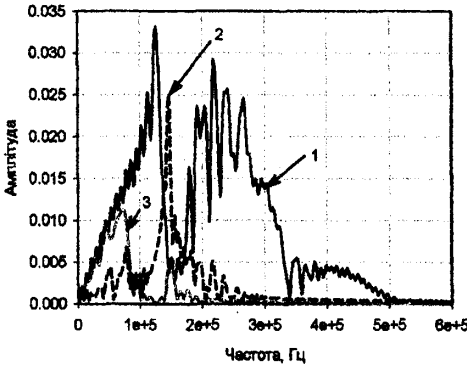
$$K\Pi_0(x_1, x_2) = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 - \nu \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 \right] + \frac{E}{2(1+\nu)} \times$$

$$\times \left[ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \nu \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 \right], \quad (12)$$

$$K\Pi_1(x_1, x_2) = \frac{2\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} u_3 + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} u_3 \right) - \frac{E}{1+\nu} \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_2} u_2 + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} u_1 \right),$$

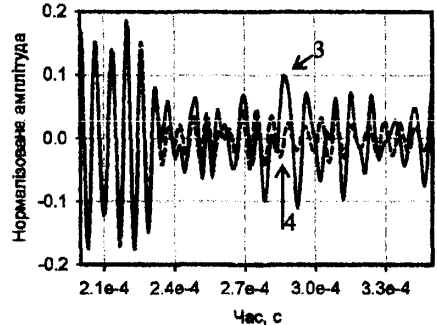
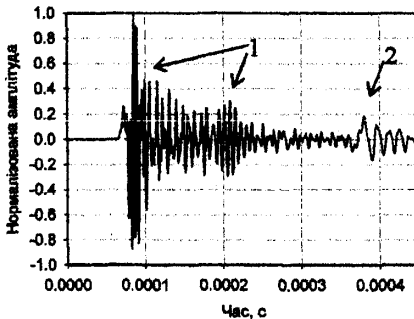
$$K\Pi_2(x_1, x_2) = \frac{E}{2(1+\nu)} (u_1^2 + u_2^2) + \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} u_3^2, \quad KK(x_1, x_2) = \omega^2 \rho (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2),$$

де  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.



1 – частина сигналу до взаємодії з дефектом, 2 – частина сигналу від взаємодії з дефектом, 3 – частина сигналу відбитого від другого кінця стінки сегменту труби

Рис. 8. Спектр УСКСХ у стінці сегменту труби з дефектом



1 – пряма мода УСКСХ, 2 – пружна хвиля відбита від кінця сегменту труби, 3 – луно-імпульс УСКСХ відбитий від дефекту, 4 – пряма хвиля, що поширюється від генеруючого первинного перетворювача

Рис. 9. Сигнали мод УСКСХ

Врахування зміни швидкості поширення мод УСКСХ внаслідок явища акустопружності, що описано теорією пружності Мурнагана, обчислюється так:

$$\frac{c - c_0}{d\varepsilon \cdot c_0} = 1 + \frac{f - f_0}{d\varepsilon \cdot f_0} + \frac{f - f_0}{f_0}, \quad (13)$$

де  $c$ ,  $c_0$  – відповідно швидкості ультразвуку в деформованому та недеформованому середовищах;  $f$ ,  $f_0$  – відповідно частоти отримані внаслідок розв'язку (12) в деформованому та недеформованому середовищах;  $d\varepsilon$  - відносні деформації.

Рівняння (12) та (13) складають основу математичної моделі акустопружності УСКХ.

Розв'язок математичної моделі акустопружності мод УСКХ показав: а) коефіцієнт акустопружності для однієї моди залежить від частоти, рис. 10, б) моди реагують на зміну величини напружено-деформованого стану неоднаково.

Проведені дослідження є достатніми для застосування мод УСКХ для контролю величини напружено-деформованого стану в стінці труби.

На основі розробленої математичної моделі акустопружності УСКХ розроблено метод контролю дійсних значень напружень металу стінки магістрального трубопроводу. Різниця швидкостей поширення мод УСКХ в напружено-деформованому стані  $C$  та ненапружено-деформованому стані  $C_0$  металу стінки магістрального трубопроводу відповідає певній величині напружень  $\sigma_0$ , що отримується із розрахунку математичної моделі, що описує явище акустопружності УСКХ:

$$C - C_0 = F(\sigma_0). \quad (14)$$

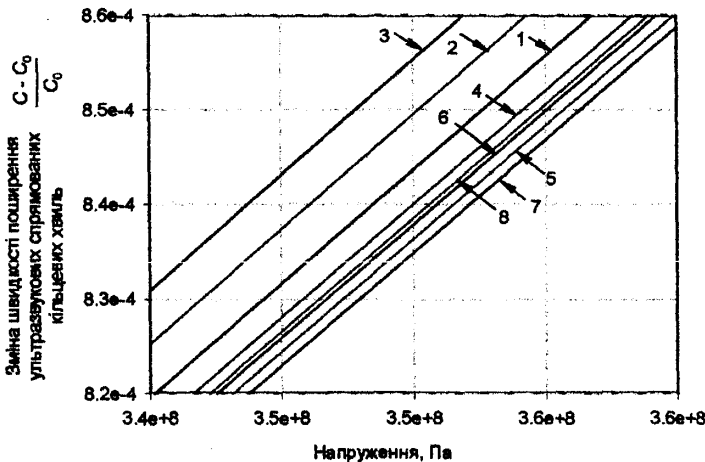


Рис. 10. Акустопружність восьми мод ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі в стінці труби діаметром 273 мм, товщиною стінки 10 мм в околі частот 2.5 МГц в діапазоні високих напружень

На практиці, в умовах експлуатації магістральних трубопроводів, виникає необхідність отримати знання про перерозподіл напружень металу стінок як по околу труби, так і по довжині трубопроводу. Розроблено методи визначення перерозподілу напружень як по околу, так і по довжині трубопроводу шляхом порівняння швидкостей поширення мод УСКХ в певних ділянках трубопроводу.

Контроль напружень на основі УСКХ проводиться на певній ділянці стінки труби (наприклад, довжиною 300 мм) за одне вимірювання, що дозволяє отримувати інтегральну оцінку їх розподілу та дозволяє збільшити чутливість

методу від 10-ти до 20-ти разів у порівнянні із методом нормального вводу акустичної хвилі в стінку труби.

Проведено аналіз причин зміни величини пружних констант в стінках магістральних трубопроводів, визначено характер їх деградації.

Розроблено залежності, що дозволяють визначати величину пружних констант металу стінки магістрального трубопроводу за допомогою УСКХ. В залежності є коефіцієнт  $k_{Ei}$  (де  $i$  є порядковим номером моди), що дозволяє враховувати особливості поширення кожної моди. Зроблено поправку на зміну швидкості поширення пружних хвиль від величини напружено-деформованого стану, що викликана тиском робочого продукту на величину  $\Delta c_p$ . Це дозволяє проводити моніторинг величини пружних констант стінок магістрального трубопроводу в робочому стані. Рівняння визначення величини пружних констант за швидкістю поширення мод УСКХ є таким:

$$\rho(c_1^2 + \Delta c_{1P}^2) = k_{E1} C_{44}, \quad \rho(c_3^2 + \Delta c_{3P}^2) = k_{E3} \left[ \frac{C_{11} + C_{12} + C_{44}}{2} + C_{44} \right], \quad (15)$$

$$2\rho(c_2^2 + \Delta c_{2P}^2) = k_{E2} \left[ C_{44} + C_{11} + \sqrt{(C_{44} + C_{11})^2 - 4C_{11}C_{44}} \right],$$

де  $\Delta c_{iP}$  – зміна швидкості поширення від тиску робочої речовини магістрального трубопроводу,  $c_i$  – фазові швидкості мод УСКХ,  $C_y$  – пружні константи.

Приведений результат обчислення залежності швидкості поширення мод УСКХ від зміни величини модуля Юнга, (рис. 11), показує нелінійний характер зміни їх швидкості.

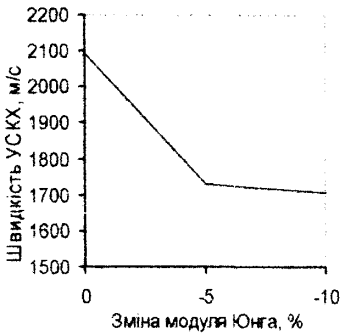


Рис. 11. Залежність зміни швидкості поширення нульової моди УСКХ в стінці труби  $\varnothing 270$  мм та товщиною стінки 10 мм від зміни величини модуля Юнга

Отримані результати є достатніми для застосування мод УСКХ для контролю величини пружних констант металу стінок магістральних трубопроводів.

**П'ятий розділ** присвячений розробці методів контролю металу стінок магістральних газопроводів об'ємними ультразвуковими хвилями. Розроблено математичну модель поширення об'ємних ультразвукових хвиль через межу розділу рідина-сталь нерівної форми; розроблено теоретичні засади термоакустичного методу контролю наявності дефектів.

Проведено аналіз типів дефектів стінок магістральних трубопроводів. Встановлено, що неперервний

ультразвуковий контроль товщини стінок магістральних трубопроводів в натурних умовах значно підвищить безпеку їх експлуатації. В результаті аналізу виявлено, що стінки магістральних трубопроводів внаслідок відшарування ізоляційного покриття, наявності зварних з'єднань, поверхневої корозії,

технологічних та експлуатаційних ушкоджень мають нерівну форму поверхні, що зменшує чутливість та точність ультразвукової товщинометрії. Для підвищення ефективності застосування неперервного ультразвукового контролю товщини стінки розроблено математичну модель поширення ультразвукової однорідної хвилі через нерівну геометричну форму границі розділу рідина-стінка труби, де граничні умови на межі рідина-стінка труби є такими:

$$\int_{S_{\beta}} \delta p \cdot n \cdot \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} dS \approx A_N \left( \sum_i N^i(p(x_N)) \cdot \frac{\partial^2 u_m}{\partial t^2} \right), \quad (16)$$

$$\int_{S_{\beta}} \delta u_m \cdot n \cdot p dS \approx A_N p_N \sum_i n N^i(p(x_N)), \quad (17)$$

де  $N^i(p(x_N))$  – інтерполянт головної поверхні обчислений за проекцією точки залежної поверхні;  $n$  – вектор-нормаль, що направлений в рідину;  $\delta p$  – довільне варіаційне поле тиску;  $S_{\beta}$  – об'єднання поверхні рідини та сталі в місці контакту, де імпеданс рідини залежить виключно від поля тиску та його варіацій і не залежить від контакту із поверхнею сталі;  $u$  – зміщення елементарного об'єму на поверхні рідини;  $u_m$  – зміщення елементарного об'єму на поверхні сталі;  $S$  – поверхня контакту;  $A_N$  – площа залежної поверхні, що є в околі точки контакту;  $x_N$  – точка на поверхні контакту спільна для двох середовищ,  $t$  – час.

До математичної моделі входять рівняння, що описують поширення ультразвукових коливань в рідкому шарі та стінці труби і є відомими рівняннями коливань елементарного об'єму пружного середовища. Для розв'язку математичної моделі розроблено програму мовою Python. Проведено аналіз результатів розв'язку цієї моделі, (рис. 12).

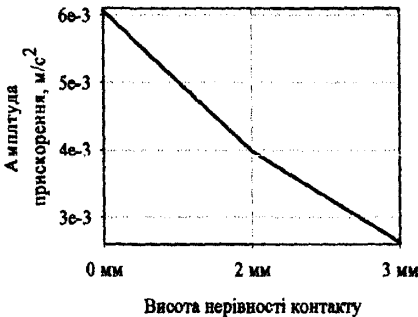


Рис. 12. Максимальна амплітуда першого імпульсу в залежності від висоти нерівності

Виявлено закономірності величини амплітуди та структури розподілу акустичного поля в залежності від висоти нерівностей границі розділу рідина-стінка труби, що дозволяє збільшити точність та достовірність ультразвукового контролю товщини.

Проведено аналіз параметрів акустичного поля при зміні густини нерівностей та частоти ультразвукової хвилі. Побудовано залежності, що визначають тренди основних акустичних параметрів і дозволяють кількісно оцінювати їх зміну, що підвищує точність контролю.

Розроблено метод та виготовлено пристрій неперервного контролю товщини стінок магістральних трубопроводів в натурних умовах їх експлуатації, на що отримано патент України. Особливість запропонованого в пристрої способу полягає у забезпеченні постійного імерсійного акустичного контакту на всій ділянці контролю як гладких так і нерівних поверхонь магістрального

трубопроводу. Додаткова перевага пристрою полягає у можливості переносити його вручну внаслідок невеликих розмірів і ваги. Для оптимального налаштування параметрів пристрою (висоти акустичного контакту при врахуванні хвильових параметрів рідини) розроблено програмне забезпечення мовою C++.

Розроблено теоретичні основи і методологія оцінювання та прогнозування параметрів термоакустичного явища в околі дефекту при існуванні потужного акустичного поля. Для кількісної оцінки теплового поля розроблено математичну модель взаємодії потужного акустичного поля із тріщиною, де до відомих рівнянь поширення об'ємних хвиль додаються залежності, що описують явище термопластичності металу:

$$r^{pl} = \eta \frac{\sigma}{\varepsilon^{pl}}, \quad \varepsilon^{pl} = \varepsilon^{pl} n(\sigma, \varepsilon^{pl}, \theta), \quad (18)$$

де  $r^{pl}$  – потік теплової енергії,  $\eta$  - коефіцієнт перетворення теплової енергії від непружної деформації,  $\sigma$  - напруження,  $\varepsilon^{pl}$  – швидкість пластичної деформації,  $\varepsilon^{pl}$  – скалярна величина пластичної деформації,  $n$  – вектор напрямку потоку зусилля, що залежить від напружень, пластичної деформації та температури  $\theta$ .

Обчислення математичної моделі здійснено методом скінчених елементів. Для вибору коефіцієнтів термопластичності металу проведено лабораторні дослідження, що підтверджують теоретичні положення. Приведені дослідження дозволяють розробляти нові методи неруйнівного контролю наявності дефектів в металі стінки труби.

У шостому розділі досліджуються методи обробки сигналів ультразвукових об'ємних та спрямованих хвиль. Дано класифікацію методів обробки сигналів відносно вимог до сигналів в ультразвуковому контролі.

Розроблено метод визначення частоти сигналу в реальному часі на основі адаптивного алгоритму обробки сигналів, що дозволяє більш точно ідентифікувати моди УСКХ. Для реалізації методу розроблено програмне забезпечення.

Розроблено модель обробки сигналу спрямованих хвиль, реалізованого в середовищі Simulink, що дозволяє пришвидшити виготовлення блоків вторинного пристрою ультразвукового контролю шляхом моделювання роботи цих блоків на етапі проектування пристрою.

У сьомому розділі приведено розроблену систему КТУ-1, що реалізує контроль пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів на основі УСКХ та пристрою УНКТ-1 з використанням об'ємних ультразвукових хвиль; проведено аналіз похибки контролю; здійснено лабораторні та натурні випробування.

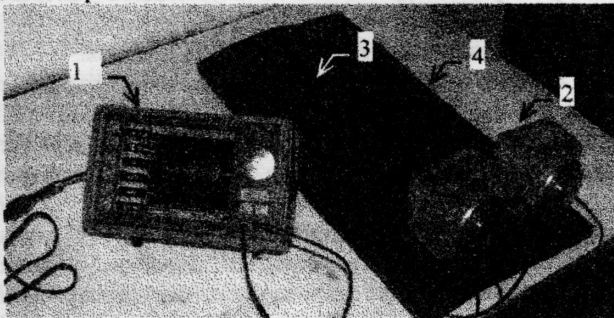
Для реалізації на практиці методів контролю ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями розроблено та виготовлено пристрій КТУ-1. Пристрій КТУ-1 працює таким чином, що одним первинним перетворювачем збуджується ультразвукове коливання, що падає на поверхню стінки труби, де в силу закону Снеліуса переломлюється, розщеплюється на поперечну складову та проходить в стінку труби. В стінці трубопроводу утворюється стоячі хвилі внаслідок відбиття падаючих ультразвукових хвиль від донної та верхньої поверхонь труби. Стоячі коливання поширюються вздовж



стілки труби, як ультразвукова спрямована кільцева хвиля. Другим первинним перетворювачем сигнал спрямованої кільцевої хвилі реєструється і передається у вторинний пристрій для подальшої обробки та проведення аналізу.

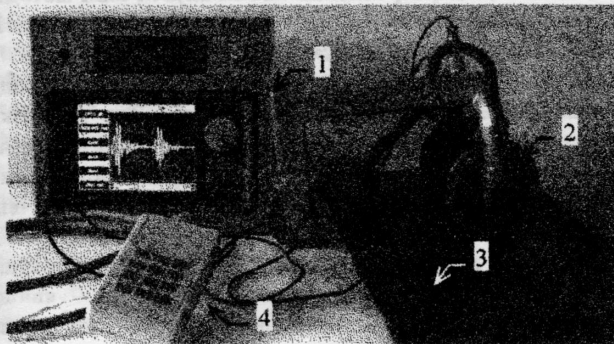
Для підвищення точності визначення швидкості поширення ультразвукових хвиль з метою застосування методів контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів (величини пружних констант, напружено-деформованого стану) ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями, розроблено пристрій реєстрації сигналів, на який отримано патент України. Представлено дискретний вейвлет метод обробки сигналів УСКХ, що дозволяє значно підвищити швидкість та точність обробки та зберігати, передавати в компактній формі вимірні сигнали без втрати інформації.

Проведено аналіз похибки пристрою контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів. Похибка первинного перетворювача та вторинного пристрою повинна складати не більше 0,7%. Загальна інструментальна похибка складає 0,9%. Загальна методична похибка складає 2,8%. Сумарна похибка складає 3,7%. На розроблену систему контролю труб КТУ-1 розроблена та затверджена "Методика метрологічної атестації системи ультразвукового контролю труб КТУ-1". Приведено лабораторні та промислові дослідження розробленої системи КТУ-1, (рис 13) та пристрою неперервного контролю товщини УНТК-1, (рис. 14). Результати, представлені в розділі та в актах впровадження дозволяють стверджувати, що розроблені пристрої та методи контролю параметрів технічного стану магістральних трубопроводів є достовірними.



1 – пристрій генерування та реєстрації ультразвукових коливань, 2 – система кріплення генеруючого ПП, 3 – система кріплення приймального ПП, 4 – дослідний зразок

Рис. 13. Пристрій КТУ-1 в умовах лабораторних експериментів



1 – пристрій генерування та реєстрації ультразвукових коливань, 2 – ПП, 3 – дослідний зразок, 4 – клавіатура

Рис. 14. Пристрій УНТК-1 в умовах лабораторних експериментів

Приклад луно-сигналу УСКХ, (рис. 15), показує набір мод, що є предметом аналізу при ультразвуковому контролі.

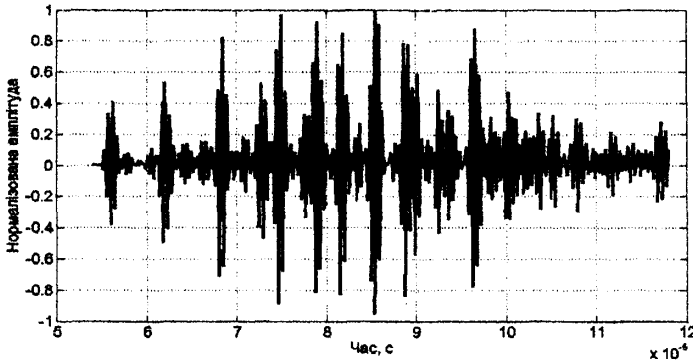


Рис. 15.  
Типова форма сигналу УСКХ в стінці магістрального газопроводу при частоті первинних перетворювачі в 2.5 МГц та куті нахилу 14°

У додатках подані програма та результати обчислення розроблених математичних моделей поширення ультразвукових коливань, акти впровадженнь результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

Науковим результатом дисертаційної роботи є вирішення науково-технічної проблеми підвищення безпеки та надійності експлуатації магістральних трубопроводів шляхом розвитку теорії методів та засобів акустичного контролю фізико-механічних параметрів стінок трубопроводів.

Основні результати дисертаційної роботи і нові наукові положення:

1. Проведений аналіз проблеми забезпечення підвищення безпеки та надійності експлуатації магістральних трубопроводів засвідчує, що традиційні методи мають ряд таких недоліків: а) неможливість отримати інтегральну характеристику досліджуваної ділянки трубопроводу внаслідок точковості контролю, б) складність проведення контролю в місцях з обмеженим доступом до поверхні трубопроводу (під опорами, в шурфах, під фундаментами, в місцях обмежувачів руху), в яких найбільше проявляються процеси деградації пружних властивостей, концентрації напружено-деформованого стану стінок магістральних трубопроводів. У роботі встановлено, що розроблення нових акустичних методів контролю є перспективним напрямком підвищення точності та достовірності контролю пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів.

2. Вперше розроблена математична модель, що описує явище акустопружності ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль. Для розв'язку математичної моделі застосовано метод скінченних елементів, в якому модель матеріалу представлено теорією Мурнагана. Внаслідок аналізу представлених кривих залежності 8-ми мод ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль від значення величини напружень в стінці труби на двох частотах 1 МГц та 2.5 МГц встановлено, що для кожної моди та для однієї моди на різних частотах явище акустопружності проявляється по-різному. Встановлено, що явище акустопружності має найбільший ефект на низьких частотах ультразвукових

спрямованих кільцевих хвиль. Розроблено алгоритм та програмне забезпечення поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль засобами скінчених елементів із застосуванням модального підходу, що є основою для розрахунку акустопружності запропонованою математичною моделлю. Програма реалізована в середовищі пакету Ansys і дозволяє враховувати неідеальність форми профілю стінки труби при поширенні ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль.

3. Вперше розроблений метод контролю дійсної величини напружено-деформованого стану металу магістральних трубопроводів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями, який полягає визначенні зміни швидкості поширення цих хвиль в залежності від величини напружено-деформованого стану на ділянці металу труби за одне вимірювання. Встановлено, що запропонований метод є для трубопроводів середнього діаметру (до 1000 мм) чутливіший на порядок ніж існуючі, а для діаметрів більше 1000 мм є ще більше чутливішим. Запропонований метод дає змогу підвищити точність контролю у порівнянні з існуючими методами. Подальшого розвитку набули методи контролю перерозподілу величини напружено-деформованого стану по околу та по довжині магістрального трубопроводу, що базуються на явищі акустопружності мод ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль і дають можливість проводити контроль металу трубопроводу без даних про швидкість поширення мод в ненапруженому стані, без інформації про марку сталі.

4. Вперше розроблено метод контролю величини пружних констант металу магістральних трубопроводів модами ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль. Метод полягає у визначенні зміни часу поширення мод у сегменті стінки труби в залежності від величини пружних констант металу трубопроводу. Встановлено, що значення пружних констант металу змінюються внаслідок деградації його фізико-механічних параметрів, їх значення залежить від технології виплавки сталі і тому має різне значення навіть для однієї марки сталі в залежності від року виготовлення та виробника. Дійсне значення модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона є основою для інженерних методів (R6, General Electric) оцінки опору руйнуванню трубопроводу із тріщинами.

5. Подальшого розвитку набули математичні моделі опису поширення горизонтально-поляризованих мод та мод типу Лемба ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в стінках магістральних трубопроводів, що полягають: а) у описі дисперсних властивостей цих мод для труб великих діаметру, б) можливості проведення числового аналізу суперпозиції об'ємних поздовжньої та поперечної хвиль при утворенні мод типу Лемба ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль. Розроблені математичні моделі дають змогу проводити аналіз зміни хвильових параметрів мод в залежності від величини фізико-механічних параметрів стінок магістральних трубопроводів та здійснювати селективний вибір мод при їх генеруванні ультразвуковим первинним перетворювачем. За допомогою розробленого програмного забезпечення на базі пакету математичного числення Matlab реалізовано запропоновані математичні моделі.

6. Для контролю дефектів в стінках магістральних трубопроводів розроблено метод неруйнівного контролю, який полягає у виявленні дефектів за

луно-імпульсами від мод ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль. Форма сигналу, що утворена відбиттям моди від дефекта аналізується та порівнюється із сигналом розрахованого розробленою математичною моделлю поширення мод кільцевих хвиль в стінці труби із дефектом. Такий підхід дозволив розробити спосіб визначення місцеположення дефекта по околу труби та його розміру шляхом аналізу часу приходження луно-імпульсу спрямованої кільцевої хвилі. Метод дозволяє контролювати як поверхневі, так і донні дефекти в стінці труби за одне вимірювання. Переваги запропонованого методу полягають також у тому, що ним можна проводити контроль у складно доступних місцях для традиційних методів ультразвукового контролю, виявляти дефекти такої форми, що є складно для ультразвукових спрямованих хвиль, що поширюються вздовж осі труби. Запропонований метод дозволяє зменшити час проведення контролю та збільшити достовірність результатів, оскільки значно зменшується ймовірність пропуску дефектів. Оптимальною була вибрана робоча частота 2.5 МГц, виходячи із складності аналізу луно-імпульсів та розмірів дефектів, які необхідно виявляти.

7. Вперше розроблено метод неперервного контролю товщини стінок магістральних трубопроводів в натурних умовах їх експлуатації об'ємними ультразвуковими хвилями, розроблено та виготовлено пристрій УНКТ-1, що реалізує цей метод, який полягає у забезпеченні постійного імерсійного акустичного контакту на всій ділянці контролю і дає змогу проводити контроль як гладких, так і нерівних поверхонь трубопроводу, що зумовлені зварними з'єднаннями, нерівністю ізоляційного покриття тощо. За результатами розв'язку розробленої моделі поширення ультразвукових об'ємних хвиль через нерівну межу розділу рідина - сталь із різною густиною нерівностей однакової висоти отримано числові дані різниць амплітуди сигналу, що дає можливість класифікувати поверхні магістральних трубопроводів в залежності від ступеня нерівності, що дозволить підвищити точність і чутливість контролю.

8. Вперше побудована математична модель ультразвукового тракту пристрою контролю ультразвуковими спрямованими хвилями пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів, що враховує параметри коливань первинного перетворювача. Ця модель становить теоретичну основу для створення процедур обробки експериментальних сигналів з метою виключення з результатів вимірювання швидкості поширення ультразвукових спрямованих хвиль систематичних похибок, які вносяться первинними перетворювачами. Розроблено програмне забезпечення обчислення розроблених математичних моделей в середовищах прикладних програм Comsol та Matlab для частот хвиль 1...10 МГц та для товщин стінок труб більше 10 мм. При аналізі результатів обчислень встановлено перерозподіл хвильової енергії мод по товщині стінки труби викликаний кривизною середовища поширення для магістральних трубопроводів малого та середнього діаметрів.

9. Встановлено, що на основі термоакустичного явища можна проводити неруйнівний контроль наявності дефектів у стінках магістральних трубопроводів за одне вимірювання на поверхні певного розміру, що дозволяє значно підвищити достовірність та швидкість контролю. Для розроблення нових методів контролю дефектів розроблено теоретичні основи і методологія оцінювання та

прогнозування параметрів термоакустичного явища на основі експериментальних досліджень концентрації теплової енергії в околі дефекту при існуванні потужного акустичного поля.

10. Подальшого розвитку набули теорія і методи обробки сигналів ультразвукових об'ємних та спрямованих хвиль, які полягають у виокремленні інформаційних складових із загального сигналу із завадами, визначенні частоти сигналу в реальному часі, визначення часу поступлення вибраного періоду луноімпульсу і дають змогу на відміну від існуючих методів підвищити точність обробки сигналів при реалізації методів ультразвукового неруйнівного контролю стінок магістральних трубопроводів.

11. Розроблено та виготовлено пристрій КТУ-1 для генерування та реєстрації ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в умовах експлуатації магістральних трубопроводів, що реалізує методи контролю параметрів технічного стану їх стінок. Проведений метрологічний аналіз розробленого пристрою КТУ-1 та здійснено аналіз схеми нагромадження похибок, визначено величину кожної з складових інструментальної та методичної похибок. Сумарна похибка складає 3,7 %. Розроблено методику метрологічної атестації пристрою КТУ-1, що реалізує методи неруйнівного контролю фізико-механічних параметрів стінок магістральних трубопроводів, технологію проведення контролю розробленими методами. Проведено лабораторні та натурні дослідження параметрів технічного стану стінок магістральних трубопроводів розробленими методами та засобами. Встановлено, що амплітуда мод спрямованих кільцевих хвиль є в два рази більшою за амплітуду об'ємних хвиль, що дозволяє точно проводити їх ідентифікацію і обробку та реалізовувати розроблені методи контролю.

## **СПИСОК ОПУБЛКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Лютак І. З. Ультразвуковий контроль технічного стану магістральних трубопроводів [Текст] / І. З. Лютак, І. С. Кісіль. - Івано-Франківськ: Факел, 2010. - 285 с.
2. Лютак І. З. Математична модель методу контролю донних дефектів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями / І. З. Лютак // Східно – Європейський журнал передових технологій. – 2010. - № 5/4 (47). – С. 53 - 57.
3. Лютак І. З. Определение напряженно-деформированного состояния трубопроводов ультразвуковыми направленными кольцевыми волнами / И. З. Лютак // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. - 2010. - № 3. - С. 25-28.
4. Лютак І. З. Розроблення алгоритму обчислення дисперсних властивостей спрямованих ультразвукових хвиль та дослідження їх залежності від механічних характеристик сталі / І. З. Лютак // Збірник наукових праць. Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України). - 2009. - випуск 14. - С. 22-28.

5. Лютак І. З. Контроль дефектів в стінках трубопроводів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями / І. З. Лютак // *Методи та прилади контролю якості*. – 2009. - № 23. – С. 20-24.

6. Лютак І. З. Побудова та обчислення математичної моделі поширення кільцевих мод в трубопроводі спрямованими хвилями в ультразвуковому діапазоні частот / І. З. Лютак // *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*. – 2009. - № 2. - С. 30-35.

7. Лютак І. З. Контроль технічного стану магістральних трубопроводів кільцевими модами пластинчатих ультразвукових хвиль / І. З. Лютак // *Збірник наукових праць*. Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України). - 2008. - випуск 13. - С. 193-198.

8. Лютак І. З. Використання ультразвукового методу для оцінки залишкового ресурсу газопроводу / І. З. Лютак // *Наукові вісті інституту менеджменту і економіки "Галицька академія"*. – 2007. – № 1(11). - С. 158-164.

9. Лютак І. З. Визначення коефіцієнтів демпфування пружного середовища при поширенні ультразвукової хвилі / І. З. Лютак // *Східно – Європейський журнал передових технологій*. – 2007. - № 6/4 (30). – С. 24 - 27.

10. Лютак І. З. Математична модель обробки сигналу ультразвукових пластинчатих хвиль / І. З. Лютак // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2007. – № 2 (16). – С. 178-183.

11. Лютак І. З. Моделювання методом кінцевих елементів поширення нульових мод плоских хвиль Лемба в пластині з ортотропними механічними властивостями / І. З. Лютак // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2007. - № 6. т. 1. – С. 151-156.

12. Лютак І. З. Наукові основи нового неруйнівного термоакустичного методу контролю фізико-механічних параметрів металевих конструкцій / І. З. Лютак // *Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації*. Науковий журнал. – 2007. – № 2 (15). – С. 90-94.

13. Лютак І. З. Розробка математичної моделі акустичного поля тріщиною в пружному металічному середовищі / І. З. Лютак // *Методи та прилади контролю якості*. – 2006. - № 17. – С. 31-36.

14. Лютак І. З. Математична модель роботи прямокутного чутливого елемента ультразвукового перетворювача / І. З. Лютак // *Збірник наукових праць*. Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України), випуск 11. - 2006. - С. 40-47.

15. Lyutak I. Discrete representation model of multiply connected pipelines with distributed physical properties / I. Lyutak // *Міжнародний науковий журнал Комп'ютинг*. – 2006. – т. 5. – Випуск 1. – С. 66-71.

16. Лютак І. З. Розробка пристрою та алгоритму обробки ультразвукового сигналу для контролю фізико-механічних характеристик сталі / І. З. Лютак // *Наукові вісті інституту менеджменту і економіки "Галицька академія"*. - 2005. - № 2(8). - С. 106-110.

17. Лютак І. З. Підхід реалізації нового термоакустичного методу неруйнівного контролю технічного стану металевих конструкцій / І. З. Лютак, А. А. Мандра // Східно – Європейський журнал передових технологій. – 2010. - № 4/6 (46). – с. 52 - 56.

*Особистим науковим внеском здобувача є розроблення підходу реалізації термоакустичного методу неруйнівного контролю технічного стану металевих конструкцій, обґрунтування хвильового аспекту та застосування теорії механіки руйнування в термоакустичному методі.*

18. Бедзір А. О. Автоматичне знаходження дефектів на основі аналізу зображень, отриманих неруйнівними методами контролю / А. О. Бедзір, І. З. Лютак // Методи та прилади контролю якості. – 2009. - № 22. – С. 28-32.

*Здобувачем розроблені концепції та методологія застосування Р-снейк алгоритму для знаходження дефектів в металевих виробках на основі термоакустичного методу контролю.*

19. Лютак І. З. Спосіб селективного збудження мод ультразвукових кільцевих хвиль / І. З. Лютак, І. С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. – 2008. - № 21. – С. 36-42.

*Особистим науковим внеском здобувача є математичний опис і спосіб збудження окремої моди ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі в стінці трубопроводу, підхід виокремлення інформативної складової із групи мод з використанням декількох ультразвукових первинних перетворювачів.*

20. Копей В. Б. Моделювання напружено-деформованого стану металевий пластини з неоднорідністю під дією гармонічних навантажень ультразвукової частоти / В. Б. Копей, І. З. Лютак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2008. - 3 (28). - С. 65-69.

*Здобувачу належить ідея та обґрунтування напрямку, постановка задачі досліджень взаємодії неоднорідності в металі із ультразвуковою хвилею, розроблення моделі тертя при контакті твердих тіл.*

21. Лютак І. З. Спосіб визначення параметрів загасання хвиль Лемба в ізотропному пружному середовищі / І. З. Лютак, А. А. Мандра // Науковий вісник національного технічного університету "ХПІ". - 2008. - № 3. - С. 114-118.

*Особистим науковим внеском здобувача є метод визначення параметрів загасання хвиль Лемба в ізотропному пружному середовищі, математичний опис процесу загасання ультразвукової хвилі.*

22. Лютак І. З. Розробка мережевого програмного забезпечення технологією Джава для моніторингу технічного стану магістральних газопроводів / І. З. Лютак, Р. М. Федорак // Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – 2007. – № 3 (4). – С. 35-40.

*Здобувачу належить методи проектування та тестування, реалізація програмного забезпечення, підхід моделювання клієнт-серверної частини програми з використанням універсальної мови моделювання.*

23. Лютак І. З. Адаптивний алгоритм обробки вимірюваного ультразвукового сигналу в частотній області / І. З. Лютак, І. С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. – 2006. - № 16. – С. 15-18.

*Особистим науковим внеском здобувача є розроблення методу обробки ультразвукового сигналу в частотній області, побудова адаптивного алгоритму та програмного забезпечення.*

24. Лютак І. З. Модель поширення ультразвукових хвиль у металах трубопроводів при навантаженнях / І. З. Лютак, І. С. Кісіль, А. А. Мандра // *Методи та прилади контролю якості.* – 2003. - № 11. – С. 27-31.

*Здобувачу належить математична модель поширення ультразвуку в металах в залежності від величини навантажень.*

25. Мандра А. А. Експериментальний модальний аналіз повітряних переходів магістральних газопроводів / А. А. Мандра, С. Ф. Савула, Ю. В. Банахевич, І. З. Лютак // *Нафтова і газова промисловість.* - 2008. - №5. - С. 36-37.

*Здобувачем розроблено загальну концепцію дослідження модальних параметрів повітряних переходів магістральних газопроводів, метод обробки експериментальних результатів.*

26. Лютак І. З. Дослідження поширення поверхневих ультразвукових хвиль в металі при зміні величини фізико-механічних параметрів поверхні металу / І. З. Лютак, І. С. Кісіль, З. П. Лютак, А. А. Мандра // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* - 2010. - 3 (36). - С. 68-72.

*Здобувачем розроблено підхід для моделювання скінченними елементами поширення ультразвукової поверхневої хвилі в металевій пластині при змінених фізико-механічних властивостях поверхневого шару.*

27. Лютак І. З. Алгоритм оброблення сигналів під час аналізу поширення поверхневих ультразвукових хвиль / І. З. Лютак, І. С. Кісіль, А. А. Мандра, З. П. Лютак // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.* – 2010. – № 3 (25). – С. 189-192.

*Здобувачем розроблено алгоритм оброблення сигналів ультразвукових поверхневих хвиль, що базується на теорії вейвлет перетворення.*

28. Стрілецький Ю. Й. Дослідження пасивуючих плівок на поверхнях сталевих конструкцій електромагнітним методом / Ю. Й. Стрілецький, І. С. Кісіль, І. З. Лютак, З. П. Лютак // *Методи та прилади контролю якості.* – 2010. - № 24. – С. 112-115.

*Здобувачу належить ідея та обґрунтування напрямків досліджень, дослідження фізичних процесів в магістральних трубопроводах.*

29. Лютак І. З. Експериментальні дослідження виявлення донних дефектів ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями / І. З. Лютак, І. С. Кісіль // *Вісник Інженерної академії України.* - 2010. - № 2. - С. 121-124.

*Здобувачу належить модель поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль, проведення лабораторних досліджень генерування та аналізу сигналів.*

30. Пат. 86910. Україна, МПК (2009) G01H 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку [Текст] / Лютак І. З.; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - № а 2008 04340; заявл. 27.10.2008 Бюл. № 20; опубл. 25.05.2009 Бюл. № 10. - 3 с.: іл.



31. Пат. 90052. Україна, (51) МПК (2009) G01B 17/02. Ультразвуковий товщиномір [Текст] / Лютак І. З.; заявник і патентовласник Лютак І. З.- № а 2008 11619; заявл. 10.11.2009 Бюл. № 21; опубл. 26.03.2010 Бюл. № 6.- 3 с.: іл.
32. Патент на корисну модель 32624. Україна, (51) МПК (2006) G01H 5/00. Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку [Текст] / Лютак І. З., Семененко М. М., Померенко А. В., Бедзір А. О.; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.- № у 2008 00077; заявл. 02.01.2008; опубл. 26.05.2008 Бюл. № 10.- 3 с.: іл.
33. Патент на корисну модель 40819. Україна, (51) МПК (2009) G01F 1/66. Ультразвуковий витратомір [Текст] / Мельниченко Ю. Г., Лютак І. З., Дзюргалюк І. С., Вульчин І. В.; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.- № у 2008 13781; заявл. 01.12.2008; опубл. 27.04.2009 Бюл. № 8.- 3 с.: іл.
34. Пат. 92275. Україна, (51) МПК (2009) G01N 29/04. Спосіб ультразвукового контролю труб [Текст] / Лютак І. З.; заявник і патентовласник Лютак І. З.- № а 2009 07879; заявл. 26.07.2010 Бюл. № 14; опубл. 11.10.2010 Бюл. № 19.- 4 с.: іл.
35. Kisil I. S. Calculation of ultrasonic field distribution in steel plate by finite element method / I. S. Kisil, I. Z. Lyutak // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus Special number. VI International Conference "Strategy of Quality in Industry and Education", Varna, Bulgaria.- 2010.- V. 1 (2).- p. 186-189.
36. Лютак І. З. Експериментальні дослідження взаємодії круглих дефектів в стінах трубопроводів великого діаметру із ультразвуковою спрямованою кільцевою хвилею / І. З. Лютак // Матеріали 15-ї міжнародної науково-технічної конференції "Електромагнітні і акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів і виробів ЛЕОТЕСТ-2010", Славське Львівської обл.- 2010.- С. 68-69.
37. Лютак І. З. Визначення дефектів в трубах спрямованими кільцевими ультразвуковими хвилями / І. З. Лютак // Відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України "Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи".- Львів.- 2009.- С. 349-350.
38. Лютак І. З. Дослідження залежності величини кутового хвильового числа від частоти кільцевих ультразвукових хвиль для магістральних газопроводів середніх діаметрів / Лютак І. З., Кісіль І. С. // 6-а Національно-технічна конференція і виставка "Неруйнівний контроль та технічна діагностика".- Київ.- 2009.- С. 107-110.
39. Лютак І. З. Дослідження залежності хвильових параметрів симетричних мод спрямованих ультразвукових хвиль від товщини пластини трубної сталі / І. З. Лютак // Матеріали 14-ї міжнародної науково-технічної конференції "Електромагнітні і акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів і виробів ЛЕОТЕСТ-2009", Славське Львівської обл.- 2009.- С. 49-50.
40. Лютак І. З. Дослідження дисперсних властивостей ультразвукових кільцевих мод пластинчатих хвиль в трубопроводі великого діаметру / І. З. Лютак // Матеріали шестнадцятої міжнародної конференції "Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики", г. Ялта.- 2008.- С. 29-31.

41. Lyutak I. Z. New Corrosion Inspection Techniques: Passive Film Measurement by Ultrasonic Surface Waves / I. Z. Lyutak // IV International conference "Strategy of Quality in Industry and Education", Varna Bulgaria.- 2008.- v. 1.- pp. 379-381.

42. Лютак І. З. Метод енергетичного балансу для опису роботи кварцового чутливого елемента / І. З. Лютак // Матеріали 5-ї національної науково-технічної конференції і виставки "Неруйнівний контроль та технічна діагностика", Київ. – 2006. – С. 104-105.

43. Lyutak I. Wavelet analysis of ultrasonic guided waves in pipeline inspection / I. Lyutak // IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Sofia, Bulgaria.- 2005.- pp. 517-523.

44. Lyutak I. A computer system for monitoring technical state of gas pipeline / I. Lyutak // The 8-th conference of computer aided science, industrial and transport "TransComp 2004", Zakopane, Poland.- 2004.- pp 56-60.

45. Лютак І. З. Динамічні процеси в металах при термоакустичному методі контролю / І. З. Лютак // Матеріали 3-ї науково-технічної конференції "Приладобудування 2007: стан і перспективи", Київ: НТУУ "К П І".- 2007.- С. 279-280.

## АНОТАЦІЯ

**Лютак І. З. Контроль пружних властивостей металу стінок магістральних трубопроводів акустичними методами. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2011.

Наведено результати аналізу проблеми підвищення надійності та безпеки експлуатації магістральних трубопроводів і доведено, що традиційні методи, які ґрунтуються на точковому контролі чи із застосуванням інспекційних снарядів є недостатньо ефективними та малодостовірними, а теоретичні засади та методи, що використовують ультразвукові спрямовані хвилі недостатньо розвинуті. Для розвитку теорії поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль та методів неруйнівного контролю фізико-механічних параметрів магістральних трубопроводів розроблено ряд математичних моделей, що описують поширення цих хвиль та забезпечують теоретичне обґрунтування для вперше запропонованих методів контролю величини напружено-деформованого стану, наявності дефектів та значення пружних констант стінок трубопроводів модами спрямованих кільцевих хвиль. Розробленими математичними моделями є моделі опису поширення горизонтально-поляризованих та мод типу Лемба ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в стінках магістральних трубопроводів, модель поширення мод цих хвиль в частотній області та модель опису процесу генерування ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі чутливим елементом.

Вперше розроблено метод неперервного контролю товщини стінок магістральних трубопроводів в натурних умовах їх експлуатації об'ємними ультразвуковими хвилями. Для розроблення нових методів контролю дефектів розроблено теоретичні основи і методологія оцінювання та прогнозування параметрів термоакустичного явища. Розроблено пристрої, що реалізують запропоновані методи контролю та проведено їх лабораторні та натурні випробування.

**Ключові слова:** ультразвукова спрямована кільцева хвиля, ультразвуковий контроль, магістральний трубопровід, напружено-деформований стан, дефект, пружні константи, термоакустичне явище, товщинометрія.

## АННОТАЦІЯ

**Лютак И. З. Контроль упругих свойств металла стенок магистральных трубопроводов акустическими методами. - Рукопись**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2011.

Приведены результаты анализа проблемы повышения надежности и безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов и доказано, что традиционные методы, основанные на точечном контроле или с применением инспекционных приборов недостаточно эффективны и мало достоверны, а теоретические основы и методы, которые используют ультразвуковые направленные волны недостаточно развиты. Для развития теории распространения ультразвуковых направленных кольцевых волн и методов неразрушающего контроля физико-механических параметров магистральных трубопроводов разработан ряд математических моделей, описывающих распространение этих волн и обеспечивают теоретическое обоснование для впервые предложенных методов контроля величины напряженно-деформированного состояния, наличия дефектов и значения упругих констант стенок трубопроводов модами направленных кольцевых волн. Разработанными математическими моделями являются модели описания распространения горизонтально-поляризованных и мод типа Лэмба ультразвуковых направленных кольцевых волн в стенках магистральных трубопроводов, модель распространения мод этих волн в частотной области и модель описания процесса формирования ультразвуковой направленной кольцевой волны чувствительным элементом.

Обоснована математическая модель описания параметров ультразвукового поля образованного переходом однородной волны через неравную геометрическую форму границы раздела жидкость-стенка трубы, которая заключается в определении распределения амплитуд ускорения, смещения элементарного объема, напряжения на плоскости сечения стенки трубы и

позволяет разрабатывать более эффективные методы контроля толщины и наличия дефектов.

Дальнейшее развитие получили теория и методы обработки сигналов ультразвуковых объемных и направленных волн. Они заключаются в выделении информационных составляющих из общего сигнала с помехами, определении частоты сигнала в реальном времени, определении времени прихода выбранного периода эхоимпульса и позволяют в отличие от существующих методов повысить точность обработки сигналов при реализации методов ультразвукового неразрушающего контроля стенок магистральных трубопроводов.

Впервые разработан метод непрерывного контроля толщины стенок магистральных трубопроводов в натуральных условиях их эксплуатации объемными ультразвуковыми волнами, что позволяет проводить контроль как гладких, так и неровных поверхностей трубопровода, обусловленных сварными соединениями, неравенством изоляционного покрытия и т.п. Для разработки новых методов контроля дефектов разработаны теоретические основы и методология оценки и прогнозирования параметров термоакустического явления. Разработаны устройства, реализующие предложенные методы контроля и проведено их лабораторные и натурные испытания.

**Ключевые слова:** ультразвуковая направлена кольцевая волна, ультразвуковой контроль, магистральный трубопровод, напряженно-деформированное состояние, дефект, упругие константы, термоакустическое явление, толщинометрия.

## ANNOTATION

**Lyutak I. Z. Control the elastic properties of the metal walls of the pipelines by acoustic methods. - Manuscript.**

Dissertation for scientific degree of doctor of technical sciences on the speciality 05.11.13 - Methods and Devices of Testing and Defining Matter Composition. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2011.

The analysis results of increasing reliability and safety of pipelines operation is presented. It is proved that the traditional methods based on control in a point or inspection pigs are not both sufficiently effective and trustworthiness. It is proved that theoretical principles and methods that use ultrasound guided waves are not sufficiently developed. To develop both the theory of ultrasonic circumferential waves propagation and non-destructive testing methods of physical and mechanical parameters of the main pipelines are developed a set of mathematical models describing the propagation of these waves and providing a theoretical foundation for the first time proposed methods to control the value of the stress-strain state, the presence of defects and the values of elastic constants of the walls pipeline by means of modes of circumferential waves. Developed mathematical models are models describing the propagation of horizontally-polarized modes and Lamb-type ultrasonic modes of circumferential waves in the walls of pipelines; a model of propagation of these waves in the frequency domain and a

model describing the process of generating of ultrasonic circumferential waves by a sensor.

It is developed for the first time a method of continuous control of wall thickness of main pipelines in operation conditions by means of bulk ultrasonic waves. To develop new methods of flaw detection it is developed the theoretical basis, methodology of assessment and forecasting of parameters of thermoacoustic phenomena. Devices that implement the proposed testing methods are manufactured. Laboratory and field tests are fulfilled.

**Keywords:** ultrasound circumferential wave, ultrasonic testing, main pipeline, the stress-strain state, defect, elastic constants, thermoacoustic phenomenon, thickness measurement.