

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА
СПОРТУ УКРАЇНИ**

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

**Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу**

Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України

**М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький, Т.Т. Котурбаш,
О.Г. Бондаренко, О.М. Карпаш**

**АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦІЙ ТА
УСТАТКОВАННЯ У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ**

МОНОГРАФІЯ

**Рекомендовано Вченою Радою університету,
протокол № 11/507 від 30.11.2011 року**

**Івано-Франківськ
2012**

УДК: 620.179.17
ББК: 34.204.013
К - 21

Рецензенти:

- Троїцький В.О.** - доктор технічних наук, професор, голова УТНКТД, лауреат Державної премії в галузі науки і техніки, завідувач відділу неруйнівних методів контролю якості ІЕЗ ім. Є.О.Патона.
- Снарський А.О.** - доктор фізико-математичних наук, професор Національного університету «Київський політехнічний інститут».
- Сучков Г.М.** - доктор технічних наук, професор, зав. каф. «Прилади і методи неруйнівного контролю» НТУ «Харківський політехнічний інститут», спеціаліст 3 рівня з ЕТ.

Рекомендовано до друку:

Вченою Радою Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (протокол № 11/507 від 30.11.2011 р).

ISBN: 978-966-694-157-5

М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький, Т.Т. Котурбаш, О.Г. Бондаренко, О.М. Карпаш. К-21. Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі. Монографія. – Видавництво: ІФНТУНГ, 2012. – 420 с.

Робота присвячена вирішенню важливого науково-технічного завдання – удосконалення методів і засобів акустичного контролю об'єктів підвищеної небезпеки, якими є бурове та нафтогазове устаткування, безпосередньо в умовах експлуатації. У монографії наведено результати науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт зі створення нових способів і засобів контролю фактичного технічного стану бурового, нафтогазопромислового устаткування й інструменту, нафто-, газо-, продуктопроводів та інженерних мереж. Авторами роботи успішно вирішена важлива науково-технічна проблема нафтогазової галузі – суттєве зменшення аварій та відмов нафтогазового устаткування й інструменту шляхом розроблення, впровадження нових методів і засобів виявлення на ранній стадії розвитку різних дефектів експлуатаційного походження методами неруйнівного контролю, у першу чергу акустичного.

Призначена для науковців – фахівців у галузі технічної діагностики і контролю конструкцій та устаткування, аспірантів, магістрів, студентів технічних спеціальностей.

УДК: 620.179.17
ББК: 34.204.013
ISBN: 978-966-694-157-5

© М.О. Карпаш, І.В. Рибіцький, Т.Т. Котурбаш,
О.Г. Бондаренко, О.М. Карпаш.
© ІФНТУНГ, 2012

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Аналіз основних типів відмов устаткування та конструкцій в нафтогазовій галузі.....	7
1.1 Особливості умов експлуатації нафтогазового устаткування.....	7
1.2 Причини аварій технічних систем	11
1.3 Дефекти технічних систем.....	13
1.4 Відмови елементів бурильної колони.....	24
1.5 Основні пошкодження нафтогазопромислового устаткування.....	28
1.6 Загальна характеристика відмов нафтогазопроводів.....	29
2 Загальна характеристика акустичних методів неруйнівного контролю матеріалів.....	39
2.1 Загальна характеристика методів неруйнівного контролю.....	39
2.2 Вибір методів неруйнівного контролю.....	41
2.3 Фізичні основи акустичного методу	43
3 Теоретичні дослідження методів акустичного контролю металоконструкцій криволінійної форми...52	
3.1 Дослідження особливостей акустичного контролю конструкцій криволінійної форми в нафтогазовій промисловості.....	52
3.2 Опис методів дефектоскопії та товщинометрії трубних конструкцій.....	66
3.3 Методи контролю конструкцій, виконаних з натягом....	103
3.4 Контроль напружено-деформованого стану	133
3.5 Контроль неметалевих трубних конструкцій	151
3.6 Розроблення способів виявлення корозійно-втомних тріщин в тілі бурильних труб.....	162
4 Підвищення точності та чутливості методів неруйнівного контролю	168
4.1 Підвищення чутливості шляхом удосконалення конструкцій п'єзоперетворювачів.....	168

4.2 Підвищення точності та якості контролю трубних колон.....	253
4.3 Використання методів оброблення сигналів для підвищення чутливості контролю.....	269
4.4 Методи ідентифікації типів дефектів під час ультразвукової дефектоскопії.....	304
4.5 Підвищення точності контролю в середовищі природного газу.....	309
5 Технічні засоби неруйнівного контролю устаткування, інструменту та інженерних мереж	322
6 Технологія далекодіючої низькочастотної акустичної дефектоскопії трубопроводів.....	330
6.1 Опис технології низькочастотної акустичної дефектоскопії трубопроводів.....	330
6.2 Особливості поширення низькочастотних спрямованих хвиль у трубопроводах.....	332
6.3 Сухий контакт у технології акустичної дефектоскопії трубопроводів.....	342
6.4 Види відбивачів спрямованих хвиль у трубопроводах	361
6.5 Оцінка амплітуди відбитих від несучільностей труби сигналів спрямованих хвиль.....	363
6.6 Оцінка чутливості технології низькочастотного ультразвукового контролю протяжних трубопроводів..	369
6.7 Аналіз форми подання інформації про несучільності у системах низькочастотного ультразвукового контролю трубопроводів.....	375
6.8 Оцінка ступеню ураження корозією стінки труби.....	379
7 Нормативне забезпечення акустичного контролю нафтогазового устаткування.....	385
Висновки.....	394
Перелік використаних джерел.....	396

ВСТУП

Метод ультразвукового контролю виробів складної форми набув в останні роки значного поширення. За період широкого промислового освоєння ультразвукової дефектоскопії (понад 30 років) основні зусилля дослідників були направлені на вирішення найбільш невідкладних та найбільш простих завдань, таких як контроль виробів простої форми. Контроль же виробів складної форми до сьогодні застосовується в недостатньому обсязі та тільки після спеціального механічного оброблення контрольованих виробів, в результаті чого їм, на окремих ділянках, надається більш проста форма тіла з паралельними плоскими поверхнями. Низка вітчизняних і закордонних спеціалістів вважають навіть, що ультразвукова дефектоскопія в принципі не може бути використана для контролю виробів складної форми, які не були піддані попередньому обробленню.

Проведені в останні роки дослідження показують, що ультразвуковий контроль виробів складної форми можливий і без попереднього механічного оброблення, але лишень за спеціального методичного підходу і за використання спеціальної апаратури.

Для аналізування особливостей контролю виробів складної форми необхідно, в першу чергу, з'ясувати, що необхідно вважати виробами простої та складної форми. Очевидно, якщо тут враховувати умови ультразвукового контролю, то виробом найбільш простої форми слід вважати такий, який може бути проконтрольований за більш простою методикою, що забезпечує надійне виявлення недопустимих дефектів, просте розшифрування показів приладів та оцінювання розмірів дефекту з достатнім ступенем достовірності. А ускладненням форми виробу треба вважати таку зміну форми, яка призводить до ускладнення умов розповсюдження ультразвукових коливань (УЗК) у виробі, викликає труднощі під час розшифрування показів приладу

та, відповідно, вимагає відповідного ускладнення методики контролю.

Зростання рівня існуючих технологій неруйнівного контролю в переважній більшості галузей промисловості базується на поглибленні знань у сфері використання нових матеріалів для виготовлення первинних перетворювачів і методів оброблення вимірювальної інформації. Останній напрямок є особливо актуальним щодо тих неруйнівних методів, які застосовуються для: контролю напружено-деформованого стану; визначення фізико-механічних характеристик матеріалів; оцінки структури матеріалів; розпізнавання типів дефектів; дослідження кінетики початкової стадії руйнування зрізів і виробів під час випробувань.

Слід відмітити, що під час проведення вказаних вище видів неруйнівного контролю, як правило, відсутні або є складними для відтворення зрізи, на яких проводиться налаштування апаратури та не чітко визначені критерії відбракування.

Характерною особливістю оцінки результатів контролю під час визначення вказаних вище параметрів є складність інтерпретування інформаційних сигналів, так як одержувана інформація про результати контролю не завжди є однозначною, інформаційні сигнали є зачумленими, та, в кращому випадку, є співрозмірними з рівнем завад.

Особливо гостро ця проблема стоїть для використання акустичних методів контролю, які найбільше використовуються в процесі проведення неруйнівного контролю в базових галузях промисловості. Поряд з цим, основними перевагами акустичного методу є його висока чутливість, проникна здатність і можливість миттєвої індикації дефектів та інваріантність щодо контрольованих матеріалів.

1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТИПІВ ВІДМОВ УСТАТКОВАННЯ ТА КОНСТРУКЦІЙ В НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ

1.1 Особливості умов експлуатування нафтогазового устаткування

Не дивлячись на різноманітність функційно та конструктивно різних видів устаткування, що використовується в нафтогазовій промисловості, за умовами експлуатування необхідно виділяти дві основні групи устаткування: наземне та свердловинне. Більшість видів наземного устаткування експлуатується на відкритому повітрі, тому воно зазнає зовнішнього кліматичного впливу.

Враховуючи дефіцит нафти і газу та вигідне географічне положення Україна, відповідно до міжнародних договорів [1] планує освоєння нафтогазових родовищ на територіях інших держав. Географія може бути широкою – від крайньої півночі до крайнього півдня, де кліматичні умови є дуже різноманітними. У північних районах зима тривала, температура повітря знижується до -50°C , а інколи і до -60°C ; у південних районах зими майже немає і температура повітря влітку досягає $+50^{\circ}\text{C}$. Клімат впливає на тепловий режим агрегатів та устаткування, корозійну активність навколишнього середовища, трудомісткість і якість технічного обслуговування і ремонту. У процесі експлуатації за низьких температур виникає небезпека руйнування металоконструкцій і деталей механізмів, спричинена підвищенням крихкості матеріалів, виходу з ладу пристроїв для осушення стиснутого повітря та видалення рідкого конденсату, систем керування. У результаті передчасного руйнування або зміни властивостей матеріалів ущільнень, шлангів порушується робота систем змащування, що призводить до інтенсивного зношування деталей і механізмів.

У процесі експлуатування нафтогазового устаткування за високих температур можливе передчасне руйнування деталей, виготовлених із гуми та полімерних матеріалів.

За значного вмісту пилу в повітрі зростає зношування поверхонь тертя. Ступінь абразивної дії змінюється в широкому діапазоні та залежить від його дисперсності, форми, розмірів і твердості частин.

Зношування різних з'єднань устаткування суттєво зростає під час проникнення пилу через ущільнювальні пристрої до поверхонь тертя. Тому в умовах високої запиленості якість ущільнень і догляд за ними суттєво впливає на ресурс з'єднань устаткування.

На підземне устаткування та внутрішні робочі порожнини наземного устаткування впливають різні рідкі і газоподібні технологічні та експлуатаційні середовища [2]. За механізмом контактної взаємодії середовища з конструкційними матеріалами, що використовуються для виготовлення елементів устаткування для буріння свердловин та нафтогазовидобування, різноманітні технологічні і експлуатаційні середовища можуть бути поділені на декілька груп: абразивні, сорбційноактивні, хімічно активні, електрохімічноактивні та інертні. Такий поділ є умовним – одне і те ж середовище може бути абразивним, сорбційноактивним, електрохімічноактивним або хімічно активним у відношенні до одного матеріалу та інертним у відношенні до іншого, що, значною мірою, визначається властивостями самого матеріалу й умовами його контактної взаємодії з середовищем.

Механізм контактної взаємодії абразивного середовища з поверхнями елементів устаткування полягає в ріжучій дії цього середовища у відношенні до поверхонь устаткування.

Механізм контактної взаємодії сорбційноактивних середовищ з конструкційними матеріалами базується на явищах сорбції середовища на поверхні матеріалу і його

адсорбції об'ємом матеріалу, що призводить до зміни міцності і деформаційних властивостей цього матеріалу. Адсорбція компонентів експлуатаційного середовища на поверхнях устаткування зумовлює утворення на цих поверхнях значних відкладень, у тому числі і твердих відкладів парафінів і мінеральних солей, що містяться в продукції свердловин. Змінюючи природу матеріалу поверхні твердого тіла, можна надавати їй гідрофільні або гідрофобні властивості. У багатьох випадках поглинання речовини твердим тілом, яке починається на поверхні, розповсюджується в об'ємі цього тіла. Подібний процес об'ємного поглинання твердим тілом рідини або газу має назву адсорбція. У результаті адсорбції зменшується міжмолекулярна взаємодія в твердому тілі. Прикладом адсорбції може бути поглинання металом водню, що призводить до його водневої крихкості.

До електрохімічноактивних середовищ відносяться середовища, які володіють властивостями електроліту. Електрохімічна активність цих середовищ проявляється переважно під час контакту з металами і сплавами і зумовлює дію електрохімічної корозії, яка є самовільним процесом руйнування металів в електрохімічнопровідному середовищі [3]. Руйнування металу в цьому випадку є результатом роботи корозійних елементів на окремих ділянках поверхні металу, що утворюються внаслідок електрохімічної гетерогенності цієї поверхні. Основними причинами електрохімічної гетерогенності поверхні є утворення на них анодних і катодних ділянок, зумовлених наявністю різних домішок у металі, анізотропність кристалічної ґратки, присутність окислів і забруднень на поверхні металу, нерівномірний напружений стан у мікрооб'ємах та ін.

Таким чином, наявність на поверхні металу точок або ділянок з різними значеннями електродних потенціалів призводить до утворення мікрогальванічних елементів. При

цьому анодні ділянки завжди мають більш від'ємний електродний потенціал і піддаються розчиненню.

Закономірності електрохімічної поведінки металів визначаються їх хімічним складом, складом електроліту і зовнішніми умовами протікання процесу.

У результаті взаємодії іонів металу з киснем на поверхні металу виникає оксидна плівка, швидкість зростання якої характеризує швидкість корозії і залежить від швидкості хімічної реакції взаємодії швидкості дифузії речовин через плівку, швидкості видалення продуктів реакції [4].

У більшості випадків продукція видобувних свердловин є багатокомпонентним провідним середовищем, що складається з нафти, пластової води, вільного або розчиненого вуглекислого газу й інших розчинених домішок, які визначають його електрохімічну активність у відношенні до металу (сірководень, вуглекислий газ, кисень, мінеральні солі тощо). Під час контакту металу устаткування з подібним середовищем розвивається його інтенсивна електрохімічна корозія.

Агресивність самої нафти дуже мала в тому випадку, якщо в ній не міститься води. Вода, що міститься в продукції свердловин, утворює з нафтою стійкі емульсії. Із багатьох чинників, які впливають на корозійну активність подібної системи, важливе значення має співвідношення води і нафти.

На даний час для інтенсифікації видобутку нафти використовують, в основному, штучне підтримання пластового тиску шляхом закачування в пласт прісних і стічних вод. У результаті значно збільшується обводненість нафти і, як наслідок, збільшується корозійна активність продукції свердловин. Відомо, що пластова вода, яка видобувається разом з нафтою, є високо мінералізованим середовищем, що містить іони хлору, карбонатів і бікарбонатів, сульфатів калію, магнію, натрію, заліза. У цьому середовищі також можуть бути розчинені газоподібні

домішки – сірководень, двоокис вуглецю, вуглекислі гази та ін.

Одна з особливостей експлуатації нафтопромислового устаткування — періодична повторюваність одних і тих самих технологічних функцій і стадій руху устаткування через певні проміжки часу, що зумовлює відповідну повторюваність режимів і умов навантаження та пауз між ними. Наприклад, певну тривалість повного циклу робіт мають операції з дослідження свердловин спеціалізованими агрегатами, оброблення або підземного ремонту свердловин, нагнітання рідини в пласт і т.д.

Навантаження на підймальний механізм устаткування для поточного ремонту свердловин за характером дії можна розділити на три основні категорії:

- 1) регулярні навантаження.
- 2) нерегулярні навантаження, що виникають упродовж декількох порівняно нетривалих періодів внаслідок зміни кліматичних факторів, порушення технологічних режимів тощо;
- 3) випадкові навантаження, через зміну техногенних навантажень, що виникають у процесі проведення технологічних заходів під час ремонту (зсуви, землетруси, аварії та ін.).

1.2 Причини аварій технічних систем

Необхідно зазначити, що небезпека аварії (відмови) технічної системи існує завжди. Руйнування або відмови, викликані тими чи іншими причинами, практично завжди завершують функціонування будь-якої технічної системи [5].

Керівництво часто нічого не знає про аварії та катастрофи, що попереджують умілі дії фахівців. Але керівництво повинно пам'ятати, що аварії, катастрофи можуть

ставатись і вони стаються, а інколи їх фінансові, екологічні, політичні, соціальні, юридичні наслідки є значними.

До аварій призводять помилки наступних трьох видів:

1. Технічні помилки, що призводять до відмови устаткування і зумовлені: а) неправильним проектуванням, у результаті чого елементи конструкції володіють несучою здатністю, недостатньою для заданого навантаження; б) неправильним виготовленням, коли елементи конструкції не відповідають проекту; в) неправильною експлуатацією, наприклад, відхилення від технологічного регламенту, експлуатування устаткування за умов, більших ніж допустимі навантаження.

2. Організаційні помилки викликані тим, що керівник проекту не передбачив організаційних заходів, які запобігають виникненню технічних помилок за п.1.

3. Недостатність кваліфікації, пов'язаної з тим, що відповідальна людина не була достатньо підготовлена для того, щоб уникнути технічних і організаційних помилок. Також причиною аварій можуть бути, так звані, форс-мажорні обставини.

Форс-мажор – природні явища (землетрус, повінь, ураган, гроза) і явища, що є результатами діяльності людини (авіакатастрофи, диверсії, вплив сусідніх підприємств та ін.).

Відмови можуть бути поділені на три основні групи:

- первинні відмови;
- вторинні відмови;
- відмови керування.

До *первинних* відмов відносяться відмови устаткування, що відбуваються за стандартних (штатних) умов роботи устаткування. *Вторинні* відмови відбуваються за зміни умов роботи (відхилення від регламентних параметрів). Відмови *керування* мають місце, коли нормально працююче устаткування не одержує з різних причин керуючих сигналів, що призводить до його неправильної роботи.

1.3 Дефекти технічних систем

Одним із визначальних моментів вибору ефективної стратегії діагностики та прогнозування ресурсу є формалізація причин відмов, спричинених дефектами [2].

Дефекти можуть виникати внаслідок утворення порушень суцільності та структурних неоднорідностей матеріалу, відхиленням розмірів та фізико-механічних характеристик від номінальних розмірів, порушенням форми та іншими причинами. Незалежно від типу дефекту, їх, згідно з ГОСТ 15467-79 [6] та ДСТУ 2925-94 [7] розділяють на три види: *критичні*, коли за наявності дефекту використовувати продукцію за призначенням неможливо чи недопустимо (небезпечно); *значні*, що здійснюють суттєвий вплив на використання продукції та на її довговічність, але вони не є критичними; та *малозначні*, що практично не впливають на використання продукції за призначенням [7].

Залежно від геометричних параметрів дефекти за ступенем небезпечності класифікуються за трьома категоріями: небезпечні, безпечні, недопустимі.

Небезпечні дефекти

Якщо параметр виявленого дефекту такий, що руйнування по ньому можливе за окружних напруг, які рівні або нижчі за 90% від нормативної межі текучості матеріалу, то такий дефект відноситься до категорії “небезпечних” [8].

Для небезпечних дефектів у методиках в обов’язковому порядку визначається допустимий робочий тиск перекачування нафти, який нижчий за встановлений нормативний робочий тиск у нафтопроводі. Величина зниження тиску порівняно з нормативним за СНіП 2.05.06-85 залежить від ступеня небезпечності дефекту: чим небезпечніший дефект, тим більше зниження тиску.

До здійснення ремонту експлуатація ділянки з “небезпечним” дефектом можлива тільки за пониженого робочого тиску, який не перевищує розрахунковий

допустимий тиск. Рішення про зниження робочого тиску приймаються керівництвом.

Безпечні дефекти

Якщо параметри виявленого дефекту відповідають «безпечному» дефекту, розрахунок допустимого тиску на дефектній ділянці не здійснюється. Для таких дефектів зниження робочого тиску не вимагається.

Недопустимі дефекти

Це дефекти геометрії труби (вм'ятини, гофри), що призводять до звуження внутрішнього діаметра труби більше ніж на 85% від нормативного.

Це також дефекти стінки з глибиною, більшою ніж 80% від нормативної товщини (можливе появлення протікання).

Недопустимі дефекти, незалежні від розрахункової несучої здатності дефектної труби, підлягають усуненню.

Одним із видів дефектів трубопроводів є їх овальність, тобто плавне відхилення форми поперечного перерізу від ідеальної кругової. Виникаюча овальність (технологічний брак, порушення правил транспортування, будівництва, експлуатації) викликає зміну безмоментного напруженого стану, який характерний для труби, що навантажена внутрішнім тиском.

Існують також інші види класифікації дефектів, наприклад:

- за природою утворення: металургійні, зварювальні, механічні, корозійні;

- за належністю до визначеного технологічного процесу: дефекти листа, виробництва труб, зварювально-монтажні та будівельні роботи, дефекти, що утворилися в період експлуатації трубопроводу, інші пошкодження;

- за місцем розташування дефекту: основний метал труб, заводський зварювальний шов, поперечний зварювальний шов, зона термічного впливу зварних швів, нижнє утворення труби, верхнє утворення труби;

- за положенням дефекту в металі стінки труби або зварювального шва: поверхневі, внутрішні, наскрізні дефекти;
- за конфігурацією дефекту: точкові, лінійні, дефекти значної площі.

Точкові дефекти – поодинокі корозійні каверни, вибоїни, поодинокі пори та ін. Ці дефекти утворюють концентрацію напруг у дуже малому об'ємі металу, і ймовірність руйнування нафтопроводу внаслідок присутності такого дефекту мала. Однак корозійні каверни можуть бути причиною утворення свищів.

Лінійні дефекти характеризуються значною протяжністю за дуже малих поперечних розмірів. До них відносяться риси, задирки, тріщини, непровари зварних швів, підрізи та ін. Лінійні дефекти є другою причиною руйнування через їх розповсюдженість та значний вплив на несучу здатність нафтопроводу за відсутності або малих поздовжніх напруг. Поздовжній дефект завжди знаходиться від впливом кільцевих напруг, і наявність поздовжніх напруг є лишень додатковим чинником. Вплив похиленого дефекту залежить від кута нахилу до осі трубопроводу.

Дефекти значної площі – корозійні пошкодження, які є основною причиною руйнування на нафтопроводах, що знаходяться в експлуатації довготривалий час, особливо в районах із підвищеною корозійною активністю ґрунтів. Сюди також відносяться розшарування металу і механічні змінання металу.

Основними типами дефектів є порушення суцільності (несуцільності) матеріалу виробу. Під типом дефекту розуміють природу дефекту, наприклад, тріщина, неякісне зварювання шва, розшарування і т.п. Кількість дефектів у виробі характеризує його дефектність.

Несуцільності в матеріалах виникають у процесі:

- виробництва шляхом плавлення та лиття (окисні плівки, шлакові вклинювання, гарячі тріщини, крихкості від осідання та ін.);
- зміни форми (тріщини, розшарування, розриви, обважнювачі, флокени, волосовини та ін.);
- об'ємного та поверхневого зміцнення (гартування та поверхневі тріщини, пори, бульбашки, перепалювання та ін.);
- механічного оброблення (шліфувальні тріщини, припалювання, надрізи, вибої та ін.);
- налагодження та монтажу (рихтувальні тріщини, надрізи та ін.);
- зварювання (зварювальні тріщини, непровари, пори, шлакові та металеві вкраплення та ін.);
- експлуатації (втомні тріщини, місцева, загальна і міжкристалічна корозія та ін., рисунки 1.1., 1.2).

Дефекти механічного походження

Подряпини на зовнішній поверхні труби (риски). Краї подряпини зазублин не мають. Форма поперечного перерізу подряпини наближується до трикутної або трапецієподібної і може змінюватись по довжині. Напрямок поздовжньої осі трубопроводу довільний. Форма подряпини на поверхні трубопроводу може бути прямолінійною і криволінійною. Контактні напруги досягають руйнівних значень. Пошкодження відбулося за однократного взаємовпливу “індентора” з поверхнею.

Задирки. На відміну від подряпин задирка має зазублені краї і меншу кривизну дна. Геометричні характеристики задирок ті ж, що і для подряпин.

Вибої – пошкодження, що мають гострі краї. Залежно від характеру та сили удару вибої можуть мати різну форму, площу і глибину (до 4 мм), при цьому в стінці труби виникають значні напруги, залишкові від локальних пластичних деформацій стінки. Площа вибою F умовно

визначається як добуток найбільшого лінійного розміру (довжини) a_1 на найбільшу ширину b_1 .



Рисунок 1.1 – Поломка підіймального механізму

Вм'ятини – пошкодження, що характеризуються плавним сполученням поверхонь, які утворюють поглиблення на поверхні труби. Під час вм'ятин суцільність металу труби не порушується. Площа вм'ятин не регламентується. Вм'ятини глибиною до 50 мм підлягають виправленню, а ділянки труб зі вм'ятинами понад 50 мм видаляються.

Ерозійне пошкодження внутрішньої поверхні трубопроводу – пошкодження внутрішньої поверхні стінки труби, яке представляє собою послідовне руйнування поверхневого шару стінки під впливом механічної дії завислих у потоці рідини, що рухається, твердих частинок (рисунок 1.3). Під час перетворювальної дії твердих частинок має місце механічна ерозія. За характером впливу на метал адекватна абразивному зношенню, який супроводжується процесами: витирання і локального або загального

потоншення стінки; поверхневого тріщиноутворення і місцевої втрати міцності стінки.



Рисунок 1.2 – Дефекти калібратора

Ерозія на зовнішній поверхні труби – пошкодження, що з’являється в результаті динамічної дії на трубу робочих органів станків під час механічного оброблення (зачищення дефектів). Відбувається рівномірне на великій площі потоншення стінки труби.

Дефекти корозійного походження

Суцільна корозія – корозія, що охоплює окремі ділянки поверхні металу. Рівномірна суцільна корозія протікає з однаковою швидкістю по поверхні, що піддалася корозії, а нерівномірна – з неоднаковою швидкістю на різних ділянках кородуючого металу [8].

Місцева корозія – корозія, що охоплює окремі ділянки металу. Місцева корозія у вигляді окремих плям – корозія плямами. Місцеве корозійне пошкодження, що має вигляд

окремої раковини. Лінійна корозія – корозійні виразки, розташовані на одній лінії на малій відстані (порядку декількох діаметрів раковини) одна від одної.



Рисунок 1.3 – Ерозійне пошкодження обсадної труби

Міжкристалітна корозія – корозія, що розповсюджується на межах кристалів (зерен) металу (рисунок 1.4).

Корозія трубопроводів є основною причиною їх проривів і виникнення аварійних ситуацій.

Для трубопровідних комунікацій і основного устаткування переважно використовують вуглецеві сталі, що володіють малою корозійною стійкістю в середовищах нафтовидобування. Корозійний вплив нафтогазопромислових середовищ оцінюється за швидкістю корозії сталі залежно від вмісту агресивних компонентів. За ступенем корозійного

впливу вини поділяються на неагресивні за швидкості корозії менше $0,01$ мм/рік, малоагресивні - $0,01-0,1$ мм/рік, середньоагресивні – $0,1-0,5$ мм/рік і сильноагресивні – понад $0,5$ мм/рік.



Рисунок 1. 4 – Корозійне пошкодження внутрішньої поверхні бурильної труби

Ступінь агресивного впливу середовищ на нафтогазопромислове устаткування і трубопроводи з вуглецевих сталей залежить:

- для газових середовищ – від вмісту і виду агресивних компонентів (сірководень, вуглекислий газ, кисню), наявності конденсату (водного і вуглеводневого), вологості, температури, тиску;

- для водних і нафтових середовищ – від наявності і концентрації агресивних компонентів, зважених часток,

швидкості руху, температури, мінералізації та pH водної фази, вмісту корозійно-небезпечних мікроорганізмів.

Водні середовища поділяються на прісні (технічні) води підземних горизонтів, морські і стічні, керовані і некеровані, що вміщують і не вміщують сірководень, вуглекислий газ, сульфатовідновлювальні бактерії (СВБ).

Нафтові середовища переважно поділяють на стійкі і нестійкі водо нафтові емульсії, що вміщують і не вміщують агресивні компоненти.

Особливістю корозійного впливу нафтопромислових середовищ на трубопровідні мережі є його локалізація по нижній твірній труб і, дуже рідко – по межі розподілу фаз. На внутрішній поверхні труб, окрім металургійної гетерогенності за наявності різних умов експлуатації, виникають макроскопічні гальванічні пари за рахунок різного доступу електроліту (контакт з вуглеводною і водною фазами, наявність осадів і продуктів корозії, локальний розвиток бактерій, нагромадження їх метаболітів та ін). Диференціація поверхні металу на ділянки призводить до того, що анодна реакція зупиняється на значній частині поверхні і зосереджується на локальних ділянках.

Корозійна активність транспортованого середовища може збільшуватися в результаті розшарування фаз і виділення пластової води, часткового видалення газу і, головним чином, за рахунок попадання в нафту кисню повітря внаслідок негерметичності системи.

З точки зору захисту металу устаткування від корозії важливо, що найбільш прогресивні системи збору і транспортування нафти є герметизованими, а це сприяє збереженню початкової корозійної активності перекачаного середовища [3].

Відомо, що продукція свердловин нафтових родовищ постійно обводнюється в процесі розроблення. Дві взаємно нерозчинні фази (нафта і вода) утворюють емульсію

гідрофобного типу. Під час підняття на поверхню зі зростанням водонафтового відношення стійкість емульсії в наземних трубопроводах знижується, тому відбувається її розшарування. Під час руху суміші промисловими колекторами знову утворюються нестійкі емульсії, швидко руйнівні, наприклад, під час переходу в трубопровід більшого діаметру чи зупинки перекачування. Якщо кількість води в нафті перевищує деяку межу (переважно, 70-80%), відбувається інверсія змочування, і емульсія з гідрофобної переходить у гідрофільну, тобто водна фаза починає змочувати поверхню металу. Відділення води від нафти, накопичення її, переважно, в нижній частині трубопроводів і ємностей, складає реальні можливості для корозійного процесу, інтенсивність якого залежить від наявності в середовищі агресивних агентів.

На швидкість корозії сталі впливають розчинені в пластовій воді гази(сірководень, кисень, вуглекислий газ). За відсутності агресивних газів у середовищі швидкість корозії сталі мінімальна, за аерації повітрям швидкість корозії, наприклад, для умов родовищ Башкортостану збільшується в 3 рази, а за насиченості середовища тільки сірководнем корозійне руйнування сталі зростає в 4 рази. Спільна присутність кисню і сірководню призводить до зростання швидкості корозії сталі майже у 2 рази.

Утворення сірководню в нафтових пластах пов'язано як і з мікробіологічними процесами, так і з життєдіяльністю сульфатовідновлювальних бактерій під загальною назвою *Desulfovibrio*, широко розповсюджених у природі. СВБ розвиваються, переважно, під осадами продуктів корозії і відкладів солей, парафіну, залишків нафти. Залишкова кількість кисню, що іде на окислення пластової нафти, створює для СВБ неперервне джерело живлення.

Дефекти металургійного походження

Включення – металеве або неметалеве забруднення різної величини і форми, яке відрізняється від основного металу мікроструктурою, хімічним складом і механічними властивостями, що викликає порушення суцільності поверхні.

Окалина – окис металу, розташований на всій поверхні або на окремих її ділянках, що утворився в процесі охолодження нагрітого металу.

Тріщина – вузька тріщина металу, яка проникає в глибину і має будь-який напрямок на поверхні виробу. Причинами появи тріщин можуть бути різні чинники (дефекти злитків, напруги чи охолодження, несуцільності напруги та ін).

Пухир (бульбашка) – здуття різної форми на поверхні виробу.

Плена – відшарування металу різної товщини і розміру несуцільності форми, витягнуте в напрямку прокатки та з'єднане з основним металом одним боком. Нижня поверхня плени й утворене заглиблення окислені.

Розшарування – несуцільності в шарах всередині прокату. Поверхня металу в розшаруванні окислена.

Сегрегація – накопичення неметалевих включень в окремих шарах прокату.

Руйнування за причини таких дефектів відбувається через потоншення стінки труби на значній площі і в переважній більшості випадків носить виражений пластичний характер (рисунок 1.5).

Особливу групу складають групові дефекти, які можуть виникати з дефектів однієї з перерахованих вище груп або дефектів двох чи всіх груп різного поєднання. Так, ланцюг пор у зварному шві чи ланцюг корозійних каверн може працювати як лінійний дефект, а декілька точкових корозійних каверн можуть утворювати зону підвищених напруг, аналогічну за впливом на несучу знадність труби одному дефекту значної площі. Характер руйнування такого

групового дефекту аналогічний до характеру руйнування ближнього за типом дефекту з трьох основних груп або носить комбінований характер.



Рисунок 1.5 – Металургійні дефекти калібратора

1.4 Відмови елементів бурильної колони

Покращання якості бурильних труб, дотримання правил їх експлуатації, а також своєчасний та якісний ремонт не дали суттєвого зниження аварійності бурильних колон. Так у США, не дивлячись на високий рівень проведення бурових робіт, затрати, пов'язані з пошкодженням тільки бурильних труб під час роботи 3000 одиниць бурового устаткування, становлять 178 млн. доларів [9]. Ці втрати розподіляються таким чином (у млн. доларів):

- простоювання бурового устаткування на суші – 20;
- простоювання бурового устаткування на морі – 32;
- контроль бурильних труб – 18;
- ловильні роботи – 27;

- попереджувальні роботи – 15;
- поломки бурільних труб – 21;
- додаткові витрати бурового розчину – 45.

За даними [10], вартість буріння похило спрямованих свердловин середньою глибиною 3637 м з урахуванням затрат на компенсацію накопичених пошкоджень залежно від інтенсивності викривлення стовбура від 3,5 до 4,5 град. на 30,48 м може коливатись від 450 до 900 тис. доларів.

Під час буріння свердловин у Перській затоці впродовж встановлено, що втомні руйнування бурільних колон відбуваються в середньому через кожні 2000 м проходження і вартість ліквідації аварії становить до 100 тис.дол. [11].

М.І. Козаченко [12] встановив, що розподіл дефектів у матеріалі сталевих бурільних труб по довжині бурильної колони можна описати, використавши закон Пуассона, (рисунок 1.6).

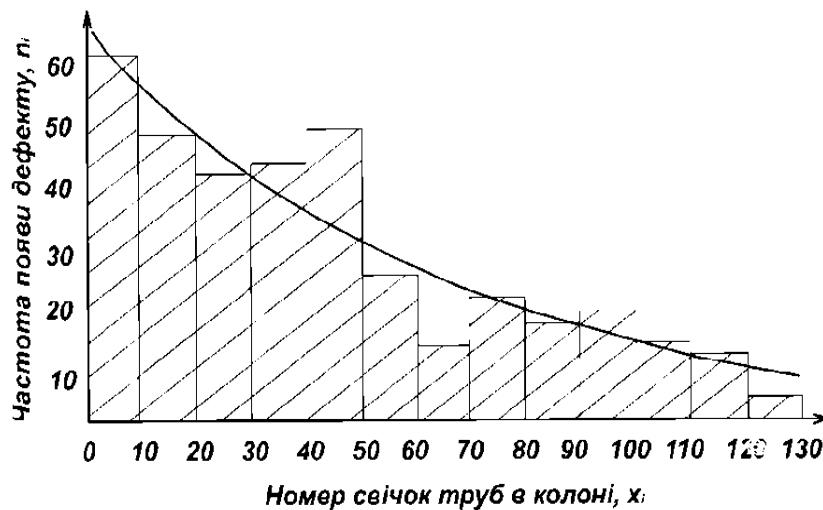


Рисунок 1.6 - Розподіл дефектів у сталевих бурільних трубах від довжини колони

Такий розподіл дефектів автор пояснює дією розтягувальних навантажень під час спуско-підймальних операцій, а зростання кількості дефектів у межах 40-50 свічок – дією змінних навантажень на ділянці переходу до бурильних труб меншого типорозміру.

Автор [13] наводить залежність коефіцієнта аварійності (імовірність виникнення відмови на тисячу метрів проходки) від глибини буріння (рисунок 1.7). Як бачимо на рисунку, коефіцієнт аварійності залежно від глибини інтервалу буріння різко зростає, особливо після глибин 4000 метрів.

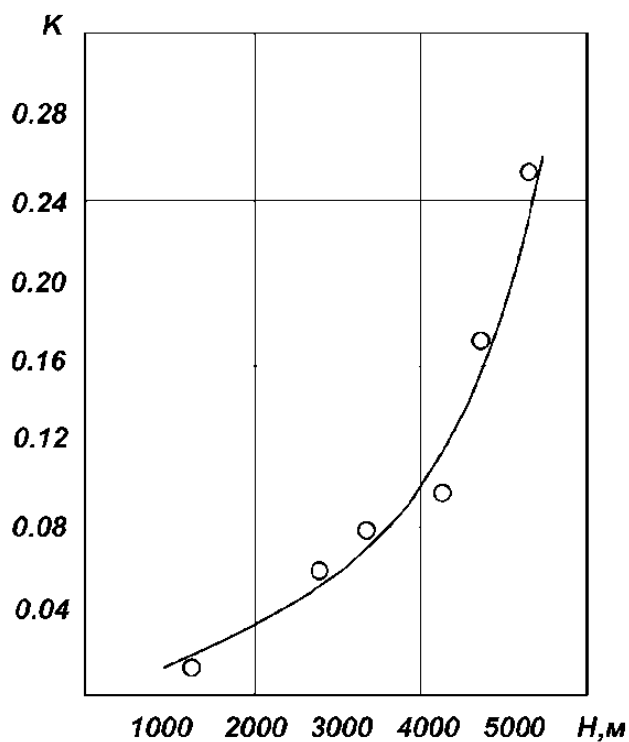


Рисунок 1.7 – Залежність коефіцієнта аварійності від глибини буріння [14]

Згідно з дослідженнями автора [12], найбільша ймовірність відмов припадає на інтервал 2500-4000 м, що пов'язано, на його думку, з наявністю каверн, осипанням стінок, плинністю порід та іншими чинниками. Крім того автор вказує, що після досягнення свердловиною глибини 2500 м кількість відмов в інтервалі буріння 2500-4500 м зростає в 4,8-5 разів, а в інтервалі 4500-5000 м – в 9,8 рази.

Аналіз аварійності з бурильними колонами на 250 свердловинах об'єднання “Укрнафта” впродовж 5 років [15] показав, що частка аварій з бурильними трубами складає 50%, а з обважненими бурильними трубами (ОБТ) – 35%. Найбільша частина аварій припадає на обважнені бурильні труби діаметром 203 мм – 60%, а аварії з ОБТ-146, ОБТ-178 і ОБТ-229 відповідно складають 19%, 13% і 18%.

В об'єднанні “Укрнафта” проведено аналіз 406 аварій з бурильними трубами, який показав, що 23% руйнувань пройшли по трубній різьбі, 31% – по різьбових з'єднаннях ОБТ і 45% – по ніпельній частині замків [16].

Дані про аварійність бурильних колон, наведені Северинчиком М.О. та Копеем Б. В. [17], показують, що 76% з них відбулись внаслідок втомних пошкоджень, 19% – через одностороннє зношування та зрив різьби ЛБТ, а три аварії – з вини бурових бригад.

О.М. Карпаш [18] наводить аналіз аварійності з бурильними трубами в 1994 році в тресті “Укрбургаз”. Усього сталося 27 відмов елементів бурильної колони: 12 (44%) складають руйнування різьбових з'єднань (з яких 9 – поломки по замковій різьбі); 11 відмов (40%) – руйнування по тілу труби. Крім того, автор [18] наводить порівняння залежності розподілу відмов елементів бурильної колони в різні періоди буріння свердловин. Так, в 1971-1975 роках відбулось 31,2% відмов по трубній різьбі, а в 1985-1990 роках – 28,3%, руйнувань по зварному шву 5,9% і 8,6% відповідно, зриву замкової різьби – 8,5% і 9,6%, руйнувань по тілу труби –

28,5% і 26%, поломок по замковій різьбі однаково по 21,7%. Враховуючи статистичний характер даних, можна зробити висновок, що незважаючи на впровадження нових конструкцій бурильних труб та їх з'єднань, покращення якості і дотримання правил експлуатації, аварійність з бурильними трубами не знижується. Це вказує на необхідність більш повного аналізу причин виникнення різних видів відмов і методів їх попередження.

1.5 Основні пошкодження нафтогазопромислового устаткування

Основним видом відмов бурового устаткування та бурильного інструменту є відмови трубних колон, у першу чергу їх різьбових з'єднань.

Спостереження за пошкодженням деталей машин в експлуатаційних умовах дають змогу виділити п'ять основних видів руйнування матеріалу деталей:

- деформація та зломи (крихкий, в'язкий та втомний злом, залишкова деформація, контактні втомні пошкодження);
- механічне зношування (зношування металевих пар, абразивне зношування, утворення пітінгів);
- ерозійно-кавітаційні пошкодження (рідинна, газова кавітація);
- корозійні пошкодження (атмосферна, газова корозія, корозія в електролітах);
- корозійно-механічні пошкодження (втомність, розтріскування, корозія під час тертя).

Деформація та зломи виникають внаслідок надмірного збільшення напружень у матеріалі деталей, що перевищують межу текучості або межу міцності. Залишкова деформація призводить до змін параметрів і конфігурації деталі, а в окремих випадках до аварійного розділення деталі на частини з повною втратою працездатності.

Механічне зношування виявляється в результаті взаємної дії тертя пар.

Ерозійно-кавітаційні пошкодження утворюються внаслідок взаємодії з рідиною чи газом, які з великою швидкістю обмивають металеву поверхню.

Обов'язковою умовою для виникнення корозії є наявність контакту між деталлю та корозійним середовищем [19].

Корозійно-механічні пошкодження виникають внаслідок одночасної дії корозії та механічних чинників (деформацій, напружень, стирання).

1.6 Загальна характеристика відмов нафтогазопроводів

Причини виникнення аварій на промислових трубопроводах можна умовно розділити *технічні й організаційні*.

Трубопроводи є одним з найпоширеніших видів зварних конструкцій і знаходять широке застосування в галузях промисловості різних країн світу. Вони призначені для транспортування рідких, газоподібних і сипучих речовин (продуктів) за різних тисків і температур. Через неоднакову пропускну здатність розміри (діаметри) трубопроводів коливаються у великому діапазоні. На рисунку 1.8 зображено класифікацію зварних трубопроводів залежно від їх діаметрів.

Трубопроводи можна класифікувати так: трубопроводи великого діаметра, трубопроводи середнього діаметра й трубопроводи малого діаметра. До трубопроводів великого діаметра відносяться магістральні нафто- і газопроводи [20]. Трубопроводи середнього діаметра можна розділити на нафто- і газопроводи регіонального призначення, технологічні трубопроводи промислових підприємств, а також трубопроводи водо-, тепло- і газопостачання підприємств

комунального господарства. До трубопроводів малого діаметра можна віднести санітарно-технічні трубопроводи житлових будинків, промислових підприємств, а також труби енергетичних установок (теплообмінники, труби газощільних панелей). Загальним для всіх видів трубопроводів є наявність великої кількості зварних з'єднань, переважна більшість яких є стиковими кільцевими швами.



Рисунок 1.8 – Класифікація трубопроводів різного призначення

Взагалі трубопроводи різного призначення належать до об'єктів підвищеної небезпеки, що зумовлено високими робочими тисками, складними природно-кліматичними

умовами їх експлуатації тощо. Тому до переважної більшості трубопроводів ставляться підвищені вимоги, пов'язані з дотриманням певних правил під час проектування, виготовлення, монтажу й експлуатації, оскільки від якості трубопроводів, їх міцності й працездатності залежить надійність і довговічність різних промислових об'єктів, будинків і споруджень. Це рівною мірою стосується як магістральних нафто- і газопроводів, вихід з ладу яких через аварію може призвести до порушення нормальної роботи цілих економічних районів або до перебоїв у постачанні нафти й газу, так і технологічних трубопроводів виробничих підприємств, де аварія трубопроводу може призвести до втрат продуктів транспортування, вибухам і катастрофам, а також трубопроводів водо-, тепло- і газопостачання комунального господарства, коли аварії в цих трубопроводах також призводять до важких наслідків. Особливо це стосується експлуатації фізично застарілих трубопроводів з величезними запасами потенційної енергії вибухонебезпечних і отрутних продуктів, тому що ймовірність і небезпека аварійних ситуацій у цих випадках транспортування призводить до локальних і загальних забруднень навколишнього середовища, величезним матеріальним втратам і створює підвищений ризик з погляду персоналу й населення.

Кількість відмов промислових трубопроводів коливається від 0,15-1,15 на один кілометр у рік. Найбільша кількість відмов (до 70%) має місце на родовищах Західного Сибіру.

У трубопроводах системи збирання нафти найбільша кількість проривів припадає на викидні лінії видобувних свердловин (80-97%). Основна кількість аварій (до 90%) відбувається внаслідок корозії внутрішньої поверхні труб. При цьому 70-85% проривів відбувається на тілі труб, 72-83% відмов припадає на зону нижньої твірної труби.

Зі збільшення часу експлуатації нафтопроводів, що експлуатуються без захисних заходів, кількість аварій з причини корозії збільшується. Прогресуюче зростання аварійності спостерігається вже через 3-4 роки експлуатації.

Кількість проривів і питома аварійність на нафтозбірних колекторах залежить від швидкості потоку видобувної рідини в трубах. Для умов низки родовищ Росії максимум цих показників спостерігається за швидкості потоку до 0,5 м/с і різко зменшується (у – раз) під час досягнення потоком швидкості м/с. Найбільша кількість аварій на викидних лініях спостерігається на свердловинах із низьким ($50-100\text{ м}^3 / \text{доб}$) дебітом рідини.

У трубопроводах системи підтримання пластового тиску (ПШТ) у початковий період експлуатації понад 90% аварій відбувається на зварних з'єднаннях труб. Зі збільшення часу експлуатації системи заводнення стічними водами кількість аварій на тілі труби збільшується. Основна кількість проривів також відбувається внаслідок внутрішньої корозії труб.

На сьогоднішній день довжина магістральних нафтопроводів сягає 4574 км, нафтопродуктопроводів (в однитковому розрахунку) - 4625 км, а магістральних газопроводів – понад 37500 км. Загальна довжина розподільних газових мереж становить понад 255000 км. Необхідний режим газопостачання забезпечують понад 47000 газорегуляторних пунктів [21].

У загальному, структура лінійної частини магістральних газопроводів за терміном експлуатації має такий вигляд: понад 35 років експлуатують 30,7 % трубопроводів; від 25 до 35 років – 17,3 %; від 15 до 25 років – 32,0 %; менше 15 років – 20,0 %. Біля 2 % газопроводів мають термін експлуатації понад 50 років, у той же час всього 2,3 % магістральних газопроводів побудовано за останні 10 років.

Параметр потоку відмов трубопроводів колишнього СРСР та США діаметром до 700 мм складає $0,26 \text{ рік}^{-1}$, на

1000 км. Із статистичних даних British Petroleum інтегральний потік відмов (для трубопроводів із умовним діаметром понад 400 мм) складає $0,36 \text{ рік}^{-1}$ на 1000 км [20].

Дані про відмови трубопроводів із інших джерел, наприклад, дають більш завищену оцінку параметрів відмов трубопроводів $0,8 - 2,1 \text{ рік}^{-1}$ на 1000 км. На основі статистичної інформації встановлено, що із збільшенням діаметра трубопроводу потік відмов збільшується, при цьому кількість відмов на газопроводах є значно більшою ніж на нафтопродуктопровода [22].

Зокрема, для трубопроводів із діаметром менше 400 мм потік відмов прийнято $1,5 \text{ рік}^{-1}$ на 1000 км, а більших діаметрів труб – $3,0 \text{ рік}^{-1}$ на 1000 км. За даними Українського Центру Екології, безпеки та охорони праці нафтогазової промисловості (ВАТ “УЦЕБОПнафтогаз”) та ін. встановлено, що в Україні сумарне число виявлених відмов нафтогазопроводів, у тому числі аварійних (із впливом на довкілля), змінюється від $0,25$ до $0,5 \text{ рік}^{-1}$ на 1000 км. До того ж, починаючи з 1993 року збільшується кількість відмов, що пов’язана з крадіжками рідкого палива (вандалізм).

Відмови, без сумніву, характеризують стан трубопровідних систем.

За останні десять років кількість аварій на газопроводах Європейських країн знижується (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 - Частота аварій на газопроводах

Період, роки	Кількість аварій в рік на 1000 км газопроводів	
	Європейські країни	Росія
1970 - 1993	0,568	-
1994 - 1998	0,211	0,23
1998	0,192	0,24
2000		0,21

Це пояснюється якісним проектуванням, підвищенням якості труб і достатньо високим рівнем технічного обслуговування та експлуатації об'єктів трубопровідних систем.

Основними видами відмов лінійної частини магістральних трубопроводів є зовнішня і внутрішня корозія і дефекти зварного шва (таблиця 1.2) [2].

Таблиця 1.2 – Основні види відмов лінійної частини магістральних трубопроводів, %

Основні види відмов	АК «Транснефть »	США
Дефект зварного шва	17,7	17,8
Пошкодження механізмами і машинами	4,8	26,1
Порушення правил експлуатації	5,0	
Заводські дефекти металу труб	12,2	5,7
Зовнішня і внутрішня корозія	55,3	36,8
Інші	5,0	13,6
Разом	100,0	100,0

Потенційними причинами утворення тріщин у магістральних нафтогазопроводах є в основному технологічні дефекти зварювання та дефекти труб металургійного або будівельного походження. За даними авторів ряду досліджень відмови зварних з'єднань на трубопроводах становлять 50 %, а після 5 - 7 років експлуатації вони можуть зрости до 80 %.

Аварійність водогонів прісних вод у кілька разів нижча, ніж під час утилізації стічних вод.

Також спостерігається зв'язок між кількістю проривів і швидкістю потоку. На низці родовищ відзначено, що питома

аварійність водогонів зворотно пропорційна швидкості потоку в трубопроводі. Вона скорочується більше, ніж у 10 разів за швидкостей 0,6 м/с.

Руйнування й втрати герметичності різних трубопроводів зумовлені стохастичними процесами розвитку в часі тріщин, геометричних дефектів типу стоншення стінки труби через проходження продуктів, що транспортуються, і появи корозійних уражень металу труби. Тому виявлення цих дефектів за допомогою своєчасної діагностики в необхідному обсязі й наступний ремонт зон із небезпечними дефектами в послідовності, що допускається у часі, є основними складовими забезпечення безпеки різних трубопровідних транспортних систем.

Процес руйнування трубопроводів різного призначення, як відомо, характеризується стадіями зародження тріщини, поступового її розвитку до критичних розмірів і поширення тріщини на різних швидкостях. Початкова стадія (зародження тріщини) є найбільш відповідальною, оскільки запобігання їй може виключити руйнування конструкції трубопроводу взагалі. Однак практична дія щодо виключення стадії зародження тріщини не завжди виявляється технічно ефективною або виправданою з економічної точки зору. Різноманіття й невизначеність у загальному випадку форми й розмірів дефектів у конструкції трубопроводу ускладнюють здійснення кількісної оцінки зародження тріщини. Завдання ускладнюється ще й тим, що математичний опис умов переходу в тріщину дефекту навіть із заданими формами й розмірами для таких пластичних матеріалів, як, наприклад, трубні сталі, практично відсутній. При цьому необхідно зазначити, що сучасні технічні засоби контролю не дають можливості забезпечити повне виявлення дефектів у конструкції трубопроводу під час його виготовлення.

Причинами відмови трубопроводів є корозія зовнішньої поверхні труб, заводські дефекти труб, брак у ході проведення

будівельно-монтажних робіт, механічні uszkodження труб, стихійні лиха (зсуви), порушення умов експлуатації й т.д. Однією з основних причин аварій трубопроводів різного призначення є корозія. Так, аналіз розташування корозійних uszkodжень у магістральних газо- і нафтопроводах показує, у газопроводах uszkodження у вигляді корозійних виразок створюються на зовнішній стороні труб, що призводить до стоншень стінок труб. Внутрішня ж поверхня труб газопроводів піддається, в основному, ерозійному зношуванню (стоншенню) стінки труби в потоці газу твердими й рідкими частками, що рухаються. У нафтопроводах можливе виникнення корозійних uszkodжень як із внутрішньої, так і із зовнішньої поверхні труб.

Для захисту труб від корозії на них наноситься захисне покриття (гідроізоляція) і застосовується електричний захист. Однак корозійні uszkodження труб мають місце, незважаючи на наявність гідроізоляції й електричного захисту. Значним джерелом uszkodжень трубопроводів різного призначення є зони концентрації напруг і деформацій, зумовлені впливом робочих навантажень, що призводить до виникнення напружено-деформованого стану (НДС) на певних ділянках трубопроводів. Спільна дія корозії й механічних напруг призводять до утворення дуже небезпечних тріщин, таких як стрес-корозійне розтріскування. Напрямок цих тріщин приблизно паралельний осі труби (поздовжні тріщини). Тріщини часто починаються у вигляді дрібних віспинок і впродовж декількох років зростають до загрозливих розмірів, проникаючи в стінку труби радіально, перпендикулярно поверхні.

Під час корозійного розтріскування високий відсоток тріщин виникає в нижній частині труби у зв'язку з uszkodженням ізоляції, наявністю ґрунтових вод на дні траншей, коли нижня частина труби анодна відносно верхньої через низьку концентрацію кисню й ін.

Розтріскування особливо проявляється там, де є ділянки вигину труб, у місцях гофри і жолоблення поверхні, тобто в зонах підвищеної пластичної деформації, а також у зонах зварних швів. Прискорює процес корозійного розтріскування металу труб концентрація напруг у вершинах тріщин.

Особливістю корозійного впливу нафтопромислових середовищ на трубопровідні мережі є його локалізація по нижній твірній труб і, дуже рідко – по межі розподілу фаз. На внутрішній поверхні труб, окрім металургійної гетерогенності за наявності різних умов експлуатації, виникають макрогальванопари за рахунок різного доступу електроліту (контакт з вуглеводною і водною фазами, наявність осадів і продуктів корозії, локальний розвиток бактерій, нагромадження їх метаболітів та ін.). Диференціація поверхні металу на ділянки призводить до того, що анодна реакція зупиняється на значній частині поверхні і зосереджується на локальних ділянках [4].

Корозійна активність транспортованого середовища може збільшуватися в результаті розшарування фаз і виділення пластової води, часткового видалення газу і, головним чином, за рахунок попадання в нафту кисню повітря внаслідок негерметичності системи.

З точки зору захисту металу устаткування від корозії важливо, що найбільш прогресивні системи збору і транспортування нафти є герметизованими, а це сприяє збереженню початкової корозійної активності перекачуваного середовища.

Відомо, що продукція свердловин нафтових родовищ постійно обводнюється в процесі розроблення. Дві взаємно нерозчинні фази (нафта і вода) утворюють емульсію гідрофобного типу. Під час підняття на поверхню зі зростанням водонафтового відношення стійкість емульсії в наземних трубопроводах знижується, тому відбувається її розшарування. Під час руху суміші промисловими

колекторами знову утворюються нестійкі емульсії, швидко руйнівні, наприклад, під час переходу в трубопровід більшого діаметру чи зупинки перекачування. Якщо кількість води в нафті перевищує деяку межу (переважно 70-80%), відбувається інверсія змочування, і емульсія з гідрофобної переходить у гідрофільну, тобто водна фаза починає змочувати поверхню металу. Відділення води від нафти, накопичення її, переважно, в нижній частині трубопроводів і ємностей, складає реальні можливості для корозійного процесу, інтенсивність якого залежить від наявності в середовищі агресивних агентів [3].

На швидкість корозії сталі впливають розчинені в пластовій воді гази(сірководень, кисень, вуглекислий газ). За відсутності агресивних газів у середовищі швидкість корозії сталі мінімальна, за аерації повітрям швидкість корозії, наприклад, для умов родовищ Башкортостану збільшується в 3 рази, а за насиченості середовища тільки сірководнем корозійне руйнування сталі зростає в 4 рази. Спільна присутність кисню і сірководню призводить до зростання швидкості корозії сталі майже у 2 рази.

2 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

2.1 Загальна характеристика методів неруйнівного контролю

Неруйнівний контроль і технічна діагностика в останній час стали штатною технологічною операцією в нафтогазовій промисловості на всіх етапах – буріння нафтових свердловин, видобування, транспортування вуглеводневих енергоносіїв до споживачів.

Це пояснюється необхідністю забезпечення безаварійної та довготривалої експлуатації об'єктів нафтогазової промисловості з метою підтримання їх високої продуктивності та зменшення ризиків виникнення техногенної й екологічної небезпеки.

На практиці застосовуються всі методи неруйнівного контролю: акустичний, магнітний, вихреструмний, радіохвильовий, радіаційний та інші.

Методи неруйнівного контролю призначені для виявлення дефектів типу порушення суцільності матеріалу (тріщини, включення, непровари та ін.), відповідності оцінки фізико-механічних властивостей матеріалів і виробів, контролю геометричних параметрів виробів, оцінки структури матеріалу виробів.

До засобів неруйнівного контролю (НК) відносять контрольно-вимірвальну апаратуру, в якій використовують проникаючі поля, випромінювання і речовини для отримання інформації про якість досліджуваних матеріалів і об'єктів. Класифікація методів неруйнівного контролю наведена за ГОСТ 18353-79 [23] і ДСТУ 2865-94 [24] у таблиці 2.1.

Відповідно до ГОСТ 18353-79 НК розподіляли на дев'ять видів.

Кожний вид НК здійснюють методами, які класифікують за наступними ознаками:

- характером взаємодії фізичних полів або речовин з об'єктом, що контролюється;
- первинним інформативним параметрам;
- способом одержання первинної інформації.

Таблиця 2.1 - Види неруйнівного контролю за ГОСТ 18353-79 і ДСТУ 2865-94

ДСТУ 2865-94	ГОСТ 18353-79
Акустичний	+
Вихрострумний	+
Радіохвильовий	+
Радіаційний	+
Електричний	+
Тепловий	+
Оптичний	+
Газорозрядна візуалізація та фотографування у полях високої напруги	-
Органолептичний	-
Візуальний	-
Електрогазодинамічний контроль	-
Магнітний	+
Проникаючими речовинами	+

За технічним виконанням засоби контролю можна розділити на три класи:

- автономні прилади для контролю однієї або декількох взаємно пов'язаних якісних характеристик;

- комплексні системи, автоматичні лінії і роботи-контролери, призначені для визначення ряду основних параметрів, які характеризують якість об'єкта;

- системи неруйнівного контролю для автоматичного управління технологічними процесами за якісними ознаками.

За видами контрольованих параметрів системи неруйнівного контролю розділяють на:

- прилади-дефектоскопи (прилади або установки), які призначені для виявлення дефектів типу порушень суцільності (тріщин, раковин, розшарувань тощо); для контролю геометричних характеристик (зовнішні і внутрішні діаметри, ступінь зношування, ширина і довжина виробу, товщина стінки, покриттів і шарів тощо); для вимірювання фізико-механічних і фізико-хімічних характеристик (електричних, магнітних і структурних параметрів, відхилень від заданого хімічного складу, вимірювання твердості, пластичності, коерцитивної сили, контролю якості зміцнених шарів, вмісту і розподілу феритної фази тощо);

- технічної діагностики для прогнозу виникнення різного роду дефектів, у тому числі порушень суцільності, зміни розмірів і фізико-механічних властивостей виробів на період експлуатації виробів.

2.2 Вибір методів неруйнівного контролю

Під час вибору методів неруйнівного контролю важливе значення мають наступні характеристики: чутливість і розрізнявальна здатність; достовірність результатів контролю; надійність апаратури; простота технологій проведення контролю; продуктивність контролю; вимоги до техніки безпеки; вимоги до кваліфікації фахівців, які здійснюють контроль.

Також вибір методу контролю необхідно проводити з урахуванням таких чинників: тип дефекту та його місце

розташування в контрольованому виробі; умови роботи виробу і вимоги технічних умов чи іншого нормативного документа на відбракований виріб; матеріал, з якого виготовлений виріб; стан і чистота оброблення поверхні; форма і розмір виробу; доступність виробу; умови контролю.

Найпоширенішим у різних галузях економіки, у т.ч. і в нафтогазовій галузі, є акустичний луно-імпульсний метод контролю. Основні його переваги:

- висока чутливість до виявлення найбільш поширених і небезпечних дефектів (тріщини, не провари, пори, включення та ін.), що дає змогу виявляти дрібні дефекти;
- значна проникна здатність, що дає змогу виявляти внутрішні дефекти в габаритних виробах;
- можливість визначення місця і розмірів дефектів;
- миттєва індикація дефектів, що дає змогу автоматизувати контроль;
- можливість контролю за умови одностороннього доступу до виробу;
- простота і висока продуктивність контролю;
- повна безпечність роботи оператора та обслуговуючого персоналу [25].

Окрім того, метод дає можливість контролювати геометричні розміри виробів і визначати фізико-механічні властивості й структуру.

Останнім часом акустичні методи з успіхом застосовують також у вивченні кінетики початкової стадії руйнування зразків і виробів у процесі сталих випробувань.

До недоліків акустичного методу можна віднести:

- необхідність розроблення спеціальних методик контролю окремих виробів;
- необхідність порівняно високої чистоти оброблення поверхні підконтрольних виробів і наявність мертвих зон, що знижують ефективність контролю;

- відносна складність інтерпретації та розшифрування результатів контролю, визначення місця знаходження, розмірів та характеру дефектів;

- необхідність наявності контактної рідини для покращення акустичного зв'язку між п'єзоперетворювачами і контрольованих виробом.

2.3 Фізичні основи акустичного методу

Акустичний метод контролю ґрунтується на реєстрації параметрів пружних хвиль, що виникають чи збуджуються в об'єкті. Найчастіше використовують пружні хвилі ультразвукового діапазону (з частотою коливань вище 20 кГц), цей метод називають *ультразвуковим*. Акустичні властивості твердих матеріалів і повітря настільки сильно відрізняються, що акустичні хвилі відбиваються від найтонших зазорів (тріщин, не проварів) шириною 10^{-6} - 10^{-4} мм [25, 26]. Цей вид контролю застосовується до всіх матеріалів, що досить добре проводять акустичні хвилі: металів, пластмас, кераміки, бетону тощо.

По характеру взаємодії з об'єктом розрізняють *пасивний* і *активний* методи. Пасивний акустичний метод передбачає реєстрацію пружних хвиль, що виникають у самому об'єкті. Шуми працюючого механізму (особливо, якщо забезпечити реєстрацію таких інформативних параметрів, як місце їхнього виникнення й амплітудно-частотну характеристику) дозволяють судити про справність чи несправність механізму і навіть про характер несправності. Цей пасивний метод акустичного контролю називають *шумовібраційним*. Багато машин постачають датчиками, що реєструють рівень вібрації визначених вузлів і прогнозуючими їх працездатність. Це *вібраційний* метод контролю або діагностики.

Перебудова структури матеріалу, яка викликається рухом груп дислокацій, виникненням і розвитком тріщин, алотропічними перетвореннями в кристалічних ґратах, супроводжується появою пружних хвиль ультразвукового

(рідше звукового) діапазону. На використанні цих хвиль заснований метод *акустичної емісії*. Використовуючи такі інформативні параметри, як кількість сигналів в одиницю часу, їх частота, амплітудний розподіл, локація місця виникнення пружних хвиль, судять про стан матеріалу, змінах, що відбуваються в ньому, прогнозують працездатність конструкції.

Активні ультразвукові методи різноманітніші за схемами застосування й одержали набагато більш широке поширення.

Методи ультразвукової дефектоскопії на практиці базуються на використанні пружних ультразвукових коливань частотою від 0,5 МГц до 25 МГц. Процес поширення ультразвукових пружних коливань в просторі є хвильовим. Пружні коливання характеризуються такими параметрами як частота коливань, довжина хвилі та швидкість поширення.

Границя, що відділяє частинки які коливаються від частинок що ще не почали коливатися, називається фронтом хвилі. Під довжиною хвилі розуміють відстань між ближніми частинками, що коливаються в одні фазі.

Число хвиль, що проходять через дану точку простору в кожную секунду, визначає частоту коливань. Довжина хвилі λ зв'язана зі швидкістю її поширення C і частотою коливання f відношенням $\lambda = C / f$.

В залежності від напрямку коливання частинок розділяють декілька типів хвиль. Якщо частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, то такі хвилі називаються повздовжніми (рисунок 2.1, а). Якщо частинки середовища коливаються перпендикулярно напрямку поширення хвилі, то такі хвилі називаються поперечними (рисунок 2.1, б).

Поперечні хвилі можуть виникати тільки в середовищі, яке володіє опором зсуву. Тому в рідких та газоподібних середовищах утворюються тільки повздовжні хвилі. В твердому середовищі можуть виникати як повздовжні так і поперечні хвилі.

Вздовж вільної поверхні твердого тіла можуть поширюватися поверхневі хвилі (хвилі Релея). Вони є комбінацією поперечних і повздовжніх хвиль. Площина, в якій коливаються частинки середовища для цих хвиль, перпендикулярна поверхні (рисунок 2.1, в).

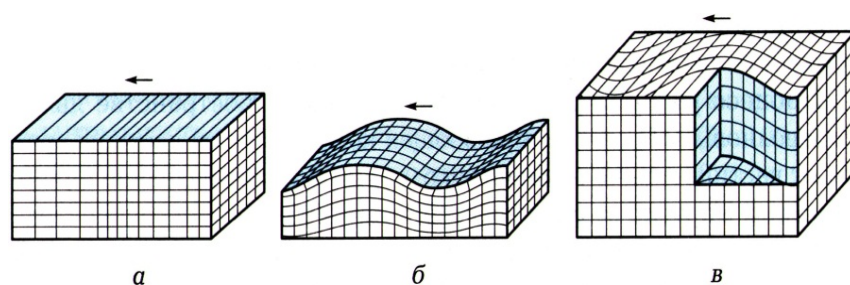


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення повздовжньої (а), поперечної (б) та поверхневої (в) хвиль (стрілкою показано напрямок поширення хвилі)

При проведенні ультразвукової дефектоскопії та товщинометрії в основному для збудження акустичних коливань використовують п'єзоелектричні матеріали у вигляді пластин найчастіше дископодібної або в меншій мірі прямокутної форми [27]. П'єзоелемент одночасно виконує роль приймача та випромінювача пружних коливань. При подачі на п'єзопластину електричної напруги змінюється її товщина в наслідок зворотного п'єзоелектричного ефекту (рисунок 2.2, а, б). Якщо до пластини прикласти знакозмінну напругу, то вона почне коливатись з частотою рівною частоті зміни напруги, генеруючи в навколишньому просторі пружні коливання та виступаючи в ролі випромінювача (рисунок 2.2, в).

У випадку, коли на п'єзопластину падає імпульс тиску (відбита ультразвукова хвиля), на її обкладках, в наслідок прямого п'єзоелектричного ефекту, виникає електричний

заряд, величину якого можна виміряти (рисунок 2.2, г). В цьому випадку п'єзопластина виступає як приймач. Для прикладання і зняття напруги на протилежні сторони поверхні пластини нанесені срібні електроди [25].

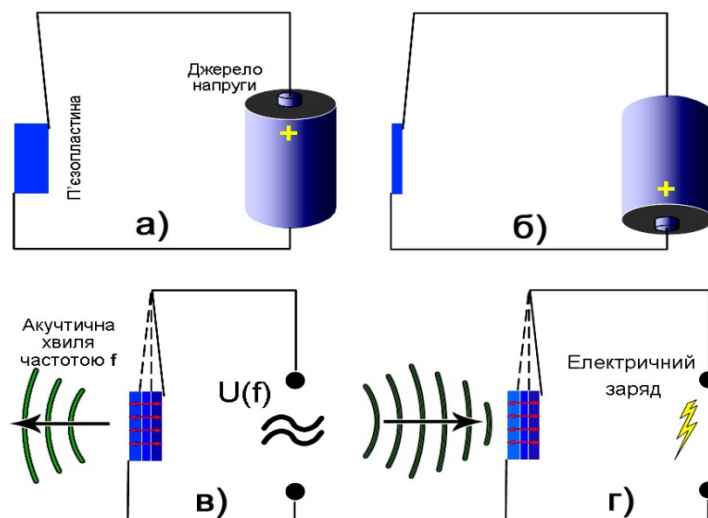


Рисунок 2.2 – Схеми, які пояснюють принцип дії п'єзопластини в якості випромінювача (а, б, в) та приймача (г) ультразвукових коливань

При випромінюванні п'єзоелементом імпульсу ультразвукових коливань в середовищі виникає ультразвукове поле, яке має просторові границі і певний розподіл звукового тиску в пучку променів (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Акустичне поле п'єзоелектричного перетворювача

В ближній зоні, яка має форму скошеного при вершині конусу, акустичне поле має неоднорідний характер, ультразвуковий пучок має певне сходження в точці, що називається фокусом. В дальній зоні ультразвукова хвиля поступово розходить у формі скошеного при вершині конусу.

При проходженні ультразвукової хвилі під кутом β з першого твердого середовища I в друге тверде середовище II на границі розділу відбувається відбивання, заломлення і трансформація хвилі. В загальному випадку (рисунок 2.4, а) виникає чотири хвилі: дві заломлення (повздовжня і поперечна) і дві відбивання.

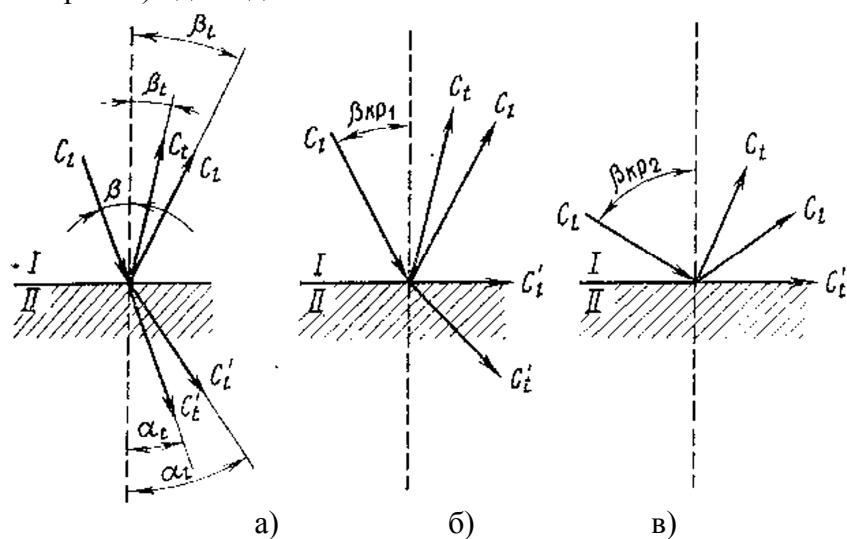


Рисунок 2.4 – Відбивання і заломлення повздовжніх хвиль на границі розділу двох твердих середовищ

Кути відбивання і заломлення зв'язані з кутом падіння виразом Снеліуса (закон синусів):

$$\frac{\sin \beta}{C_L} = \frac{\sin \beta_L}{C_L} = \frac{\sin \beta_t}{C_t} = \frac{\sin \alpha_t}{C_t'} = \frac{\sin \alpha_L}{C_L'}, \quad (2.1)$$

де C_L і C_t - швидкість поширення повздожньої і поперечної хвиль в першому середовищі, C_L' і C_t' - швидкість поширення повздожніх і поперечних хвиль у другому середовищі. β_L , β_t - кути відбивання повздожньої і поперечної хвилі, α_L , α_t - кути заломлення повздожньої і поперечної хвилі.

Кути, при яких зникають ті чи інші типи хвиль в процесі заломлення ультразвуку, називають критичними (рисунок 2.4, б, в). По мірі збільшення кута падіння β , починаючи з деякого значення $\beta_{кр}$, який називається першим критичним кутом, зникає заломлена повздожжня хвиля. При подальшому збільшенні кута β настає момент, коли зникає поперечна хвиля. Це явище відповідає другому критичному куту. При кутах падіння менших за другий критичний і більших ніж перший, в другому середовищі виникають тільки поперечні хвилі. Для системи оргскло-сталь розраховані критичні кути рівні відповідно 27° і 56° . Дана властивість має велику практичну цінність. Зокрема, якщо розмістити випромінювач на призмі з оргскла і вибрати кут β в діапазоні $30-55^\circ$, то в сталевому виробі буде поширюватися тільки одна поперечна хвиля, що значно спрощує розшифрування результатів контролю.

Ультразвукова дефектоскопія та товщинометрія базується на властивості ультразвукових хвиль направлено розповсюджуватися в середовищах і відображатися від меж середовищ або порушень суцільності (дефектів), що володіють іншим акустичним опором (рисунок 2.5).

На практиці при проведенні ультразвукової дефектоскопії чи товщинометрії в основному використовують луно-імпульсний (луно-імпульсний) метод (або метод луно-локації). Він полягає в „прозвучуванні” об’єкту контролю короткими імпульсами *1* (рисунок 2.5) ультразвуку та реєстрації приймачем відбитих імпульсів *2* та *3* відповідно від дефекту та нижньої поверхні об’єкту контролю. Ознакою дефекту є поява луна-сигналу (імпульсу) *2* на екрані дефектоскопа (рисунок 2.5).

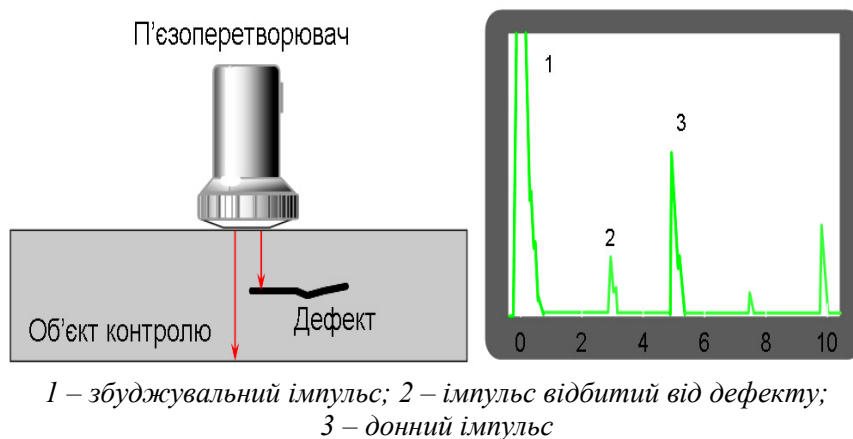


Рисунок 2.5 – Суть ультразвукового методу дефектоскопії та товщинометрії

Для вимірювання товщини об’єкту імпульсними товщиномірами, як правило, вимірюють час між зондувальним і одним з відбитих імпульсів або між двома луно-імпульсами. При цьому вимірювана товщина визначається за формулою:

$$d = \frac{vt}{2} , \quad (2.2)$$

де *t* — час поширення ультразвукового імпульсу у виробі, *v* - швидкість поширення ультразвукового імпульсу у виробі.

При проведенні ультразвукової дефектоскопії похилими п'єзоперетворювачами найчастіше використовують прямий чи однократно відбитий (рисунок 2.6) акустичний промінь.

З використанням похилого перетворювача можна визначити відстань s за відомим значенням швидкості та часу поширення повздовжніх ультразвукових коливань t , знаючи кут введення β акустичного променя та товщину основного металу, за формулами (рисунок 2.6) визначити глибину залягання дефекту d і відстань a вздовж поверхні зварного з'єднання від точки введення променя до дефекту.

УЗ-контроль широко поширений в промисловості для виявлення дефектів: тріщин, непроварів, шлакових і інших включень в зварних швах товщиною від 1,0 до 2800 мм. До експлуатаційних параметрів луна-методу відносяться: чутливість методу контролю і роздільна здатність. Чутливість методу контролю характеризує мінімальні розміри дефектів того або іншого типу, які впевнено (із заданою вірогідністю) виявляються у виробках певного типу.

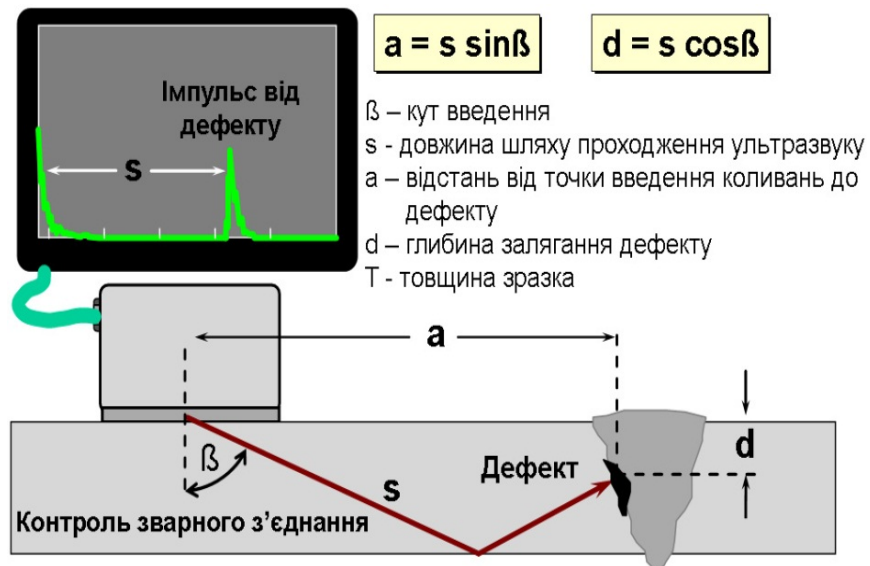


Рисунок 2.6 – Ультразвукова дефектоскопія зварних з'єднань

Апаратура для ультразвукового контролю складається з п'єзо-перетворювача, що містить п'єзоелемент для випромінювання і прийому ультразвукових коливань, електронного блоку (власне дефектоскопа) і різних допоміжних пристроїв [28].

На даний час в напрямку удосконалення акустичних методів контролю проводиться ряд робіт спрямованих на відділення від шумів, головним чином зв'язаних з відбиттям пружних хвиль від структурних неоднорідностей, наприклад, границь кристалів у полікристалічному матеріалі. Освоюється застосування специфічних типів пружних хвиль у твердому тілі: поверхневих хвиль, хвиль у пластинах і стержнях. Це істотно розширює область виробів, доступних контролю. Розробка засобів високоточного виміру швидкості ультразвукових хвиль відкриває можливості виміру

внутрішніх напружень у твердих тілах за зміною швидкості чи загасання.

Розробляють нові способи обробки інформації, де дуже перспективна є *обчислювальна ультразвукова голографія*. Наприклад, використовуючи спеціальні п'єзоперетворювачі, сканують велику ділянку (порядку 200x200 мм) поверхні об'єкта контролю. Одержувану при цьому інформацію направляють у пам'ять ЕОМ. Подальшу обробку всієї інформації, яка отримана на великій ділянці сканування, виконують на ЕОМ, використовуючи ті ж алгоритми, що реалізуються в оптичній голографії при накладенні світлових пучків. Завдяки цьому вдається значно точніше представити форму і розміри дефектів, що виявляються, і більш обґрунтовано судити про їхній вплив на працездатність виробу.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ КРИВОЛІНІЙНОЇ ФОРМИ

3.1 Дослідження особливостей акустичного контролю конструкцій криволінійної форми в нафтогазовій промисловості

До виробів з криволінійною поверхнею (сферичною, циліндричною) відносяться до 80% виробів від загальної кількості об'єктів контролю. Це водо- і паро трубопроводи теплових і атомних електростанцій (у т.ч. труби малого діаметра, поверхні нагрівання), сталеві нафто- і газопроводи в нафтохімічній та газовій промисловості, циліндричні трубки

несучих конструкцій вантажопідіймальних механізмів та гірничошахтного устаткування. У зв'язку з цим актуальним завданням є дослідження акустичного тракту, параметри якого визначає кривизна контролюючих виробів, і розроблення на основі цього дослідження ефективних та ресорсоощадних методів, технологій, засобів і способів УЗК.

Для аналізу особливостей контролю виробів складної форми необхідно, в першу чергу, в'яснити, що необхідно розуміти під виробами простої і складної форми. Очевидно, якщо при цьому виходити з умов ультразвукового контролю, то виробом найбільш простої форми необхідно вважати такий, який може бути проконтрольований за більш простою методикою, яка забезпечує надійне виявлення дефекту, просте розшифрування показників приладу та оцінку розмірів дефекту з достатнім ступенем достовірності. А ускладненням форми виробу потрібно вважати таку зміну форми, яка призводить до ускладнення умов розповсюдження УЗК у виробі, викликає забруднення під час розшифрування показників приладу і, відповідно, вимагає відповідного ускладнення методики контролю.

Було проаналізовано основні проблеми акустичного неруйнівного контролю, як пов'язані, з впливом криволінійної поверхні на акустичний тракт.

У першу чергу необхідно розглянути акустичні поля найбільш типових перетворювачів.

Найскладнішими є умови контролю виробів, обмежених кривими поверхнями різної кривизни і знаку. Контроль таких виробів у переважній більшості випадків доцільно проводити в імерсійному варіанті. При цьому поверхні виробів виконують роль поверхонь лінзи – вбираючої або розсіювальної, залежно від співвідношення швидкостей розповсюдження ультразвукових коливань (УЗК) у середовищах, що їх розділяють. Тому умови розповсюдження УЗК, проломлених під час введення у виріб, відбитих від його

поверхонь (нижньої і бокових) приймаючим шукачем у вигляді луно-сигналів будуть різними для виробів будь-якої форми [18].

Розглянемо умови розповсюдження променя УЗК під час переходу його з води в металічний виріб із випуклою циліндричною поверхнею (зливоч, вал, прутик та ін.) і навпаки (рисунок 3.1).

Якщо шукач орієнтувати так, щоб вісь акустичного поля його співпадала з радіусом кривизни поверхні, то тільки промінь L_0 направлений за віссю поля буде введений у виріб без переломлення. Решта променів (L') будуть розходитися в результаті переломлення, оскільки перехід здійснюється із середовища з меншою до середовища з більшою швидкістю розповсюдження УЗК. У площині, перпендикулярній до вісі циліндра, розбіжність променя буде значно більшою, ніж під час переходу через плоску поверхню тому, що в міру віддалення від вісі променя кут падіння променів зростає не тільки через розбіжності падаючого променя (як і під час падіння на поверхню), але й через кривизну поверхні. Переломлення буде спостерігатися навіть якщо відстань між шукачем і поверхнею виробу буде менша від протяжності ближньої зони випромінювача, тобто коли падаючий промінь УЗК складається з паралельних променів (під час падіння на плоску поверхню у даному випадку переломлення не буде).

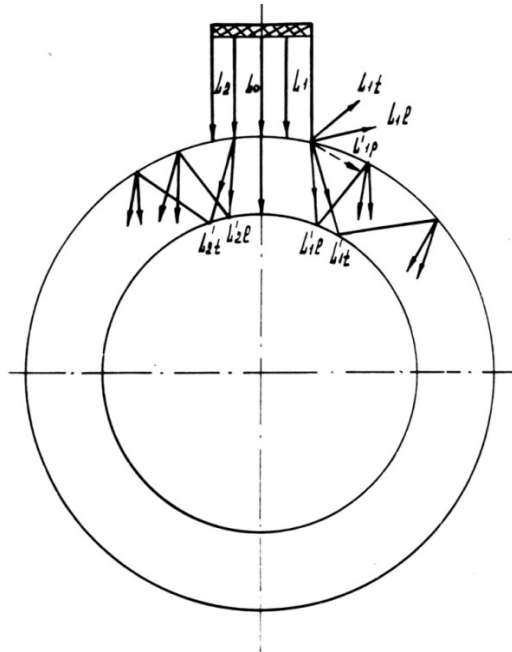


Рисунок 3.1 – Акустичний контроль металічних виробів із випуклою циліндричною поверхнею

Акустичне поле у виробі буде мати вигляд конуса зі значно більшим кутом на вершині, ніж під час контролю виробу з плоскою поверхнею введення УЗК. При цьому кути падіння променів, що знаходяться від вісі поля на значній відстані, можуть перевищити значення, за яких у матеріалі виробу збуджуються рушійні чи поверхневі хвилі. У результаті у виробі розповсюджуватимуться в різних напрямках хвилі будь-яких видів з усілякими швидкостями.

Якщо під час контролю виробів циліндричної форми потрібно віднайти дефекти різного орієнтування, розміщених як усередині виробу на будь-якій глибині, так і на поверхні, то вісь шукача потрібно орієнтувати не тільки за радіусом циліндра, але й під гострим кутом до твірної (у площині, що

проходить через вісь циліндра). При цьому у виробі, вздовж вісі циліндра, будуть також розповсюджуватися хвилі різних видів. Розподіл енергії УЗК у таких хвилях залежить від діаметра циліндра та від кута нахилу падіння променя. Зі зменшенням діаметра і зі збільшенням кута падіння зростає частка енергії в поверхневій хвилі (за дуже малих діаметрів, наприклад під час контролю дроту, і за визначеного кута падіння практично вся енергія введених УЗК концентрується у хвилі Лемба). За значної інтенсивності поверхневої хвилі ефект, пов'язаний з розбіжністю променя, стає особливо помітним – поряд з основним променем R , орієнтованим вздовж твірної циліндра, можуть спостерігатися бокові промені R_1, R_2 , і т.д., що розходяться під кутами β_1, β_2 до твірної та розповсюджуваних по гвинтових лініях з кроком, пропорційним до діаметра циліндра і зворотно пропорційним тангенсам кутів β_1 і β_2 .

У результаті можна зареєструвати луно-сигнали від дефектів, розміщених на шляху бокових променів, і, відповідно, як і в попередньому прикладі, спотворені (викривлені) координати виявлених дефектів.

Необхідно зазначити, що спотворення (викривлення) координат виявлених дефектів можливе також у результаті розщеплення променів, що падають на поверхню виробу внаслідок недостатньої чистоти оброблення цієї поверхні. За певних співвідношень між висотою, періодом регулярних нерівностей (слідів глибокого оброблення різцем) на поверхні виробу та довжиною пружної хвилі поверхня введення діє як дифракційна решітка, викликана виникненням дифракційних спектрів УЗК, розповсюджених у виробі в площині, що проходить через вісь циліндра, під певними дискретними кутами.

Відповідно, методика контролю виробів циліндричної форми вимагає суттєвого, порівняно з методикою контролю

виробів простої форми, ускладнення. Найперше, необхідно з метою підвищення надійності контролю використовувати різні і різним способом орієнтовані шукачі суміщеного і для виявлення дефектів, що залягають на незначній глибині, - роздільно-суміщеного типу. Контроль може здійснюватися цими перетворювачами одночасно чи послідовно, залежно від схеми електроакустичного тракту (одноканальна чи багатоканальна). У процесі контролю виріб доцільно обертати, а шукачі переміщувати вздовж твірної циліндра – це дає можливість підвищувати продуктивність контролю і певною мірою полегшувати розшифрування сигналів. Для вирівнювання чутливості на глибині потрібна система тимчасового регулювання чутливості (ТРЧ) зі значнішою глибиною регулювання, ніж для контролю виробів з плоскими поверхнями. Це впливає з умов розповсюдження УЗК, відбитих від дефекту, виявленого у виробі циліндричної форми.

Акустичне поле високочастотного перетворювача

Зона простору, в якій перетворювач випромінює і з якого може приймати хвилі, називається *акустичним полем*. *Поле випромінювання* перетворювача – залежність амплітуди випромінювання від положення досліджуваної точки B у просторі. *Поле приймання* – залежність амплітуди прийнятого перетворювачем сигналу від положення в просторі точкового джерела B випромінювання. *Поле випромінювання-приймання* – залежність амплітуди прийнятого сигналу від положення в просторі точкового відбивача B , що розсіюється однаково за всіма напрямками та опромінює самим перетворювачем. Переважно воно пропорційне квадрату поля випромінювання, тому в подальшому будемо говорити тільки про поле випромінювання з урахуванням його ідентичності з полем приймання [29].

Акустичне поле перетворювача частіше розраховують, вважаючи, що перетворювач складається з великої кількості

елементарних випромінювачів-приймачів, а потім їх дію інтегрують. Поле випромінювання окремого точкового елемента у тверде тіло (сталь) зображено на рисунок 3.2.

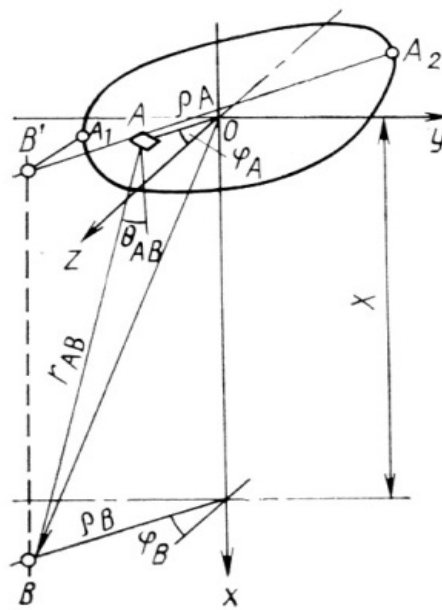


Рисунок 3.2 – Акустичне поле випромінювання точкового елемента

Центральний пелюсток відповідає повздовжній хвилі L , а бокові – поперечній хвилі – T . Спрямованість центрального пелюстка, який використовується для формування поля, приблизно описується функцією $\chi(\theta) = \cos\theta$.

Спрямованість під час випромінювання в рідину описується функцією $\chi(\theta) = 1$ (не спрямований сферичний випромінювач) або $\chi(\theta) = \cos\theta$ (дипольний випромінювач) залежно від умов роботи. У зоні малих кутів θ можна вважати, що діаграма спрямованості кожного випромінювача і

приймача сферична, тобто $\chi(\theta)=1$. У поле приймання перетворювача множник, що характеризує спрямованість точкового джерела, може відрізнятись від форми, але завжди за кутів $\theta \leq 20^\circ$ $\chi \approx 1$.

Поле прямого контактного перетворювача

Ближня і дальня зони. Тут розглядається не тільки перетворювач, що випромінює безпосередньо в ОК, але й будь-який перетворювач, що випромінює в однорідне середовище, наприклад у рідину.

Поле в середовищі описується суттєво різними закономірностями на близькій і віддаленій відстані від перетворювача. Ця різниця особливо чітко виражена для круглого перетворювача. У безпосередній близькості від нього УЗ розповсюджується у вигляді паралельних променів (прожекторна зона), але трохи далі картина різко змінюється (див. рисунок 2.3). Енергія як і раніше залишається в межах променя, що не розходиться, але з'являються максимуми і мінімуми амплітуди. Уся ця зона називається *ближньою зоною, ближнім полем або зоною Френеля*.

У віддаленій зоні (віддаленою полі, зоні Фраунгофера) формуються промені, що розходяться. Випромінюється ніби то сферична хвиля, але розповсюджується не рівномірно у всі боки від джерела, а в межах конуса – основного пелюстка. Максимум амплітуди відповідає вісі перетворювача (*акустична вісь чи центральний промінь*). Зі збільшенням кута між напрямком будь-якого променя і віссю амплітуда зменшується, з'являються бокові пелюстки. Залежність амплітуди випромінювання від напрямку променя називається *діаграмою спрямованості*.

За деякого кута (*кута розкриття*) амплітуда випромінювання рівна нулю для безперервного випромінювання, а для імпульсного спостерігається мінімум. Кут розкриття визначає *основний пелюсток*. За його межами

переважно з'являються бокові пелюстки, які є джерелом перешкод.

У віддаленій зоні амплітуда плавно зменшується зі збільшенням відстані від перетворювача. У ближній зоні амплітуда змінюється від положення в просторі складним чином.

Межа між ближньою і віддаленою зонами приблизно визначається формулою:

$$N = S / (\pi \lambda) = a^2 / \lambda, \quad (3.1)$$

де N – відстань вздовж осі x ; що співпадає з акустичною віссю перетворювача; S – площа п'єзоелемента; λ – довжина хвилі. Остання частина формули відповідає круглому п'єзоелементу радіусом a . Перша частина наближено придатна також для квадратного п'єзоелемента.

Під час конструювання перетворювача переважно хочуть зменшити осциляції амплітуди в ближній зоні, тобто зменшити кут розкриття і бокові пелюстки.

Дослідження показують, що розв'язати одночасно всі задачі неможливо. Деякі практичні умови контролю вимагають навпаки застосування перетворювача із широкою діаграмою спрямованості.

Поле перетворювача з акустичною затримкою

Акустична затримка – протяжне середовище з властивостями, що відрізняються від ОК, розміщена між ним і перетворювачем. Це рідина в іммерсійому перетворювачі, призма з пластику в нахиленому або РС-перетворювачі (рисунок 3.3, а).

Середовище стримує фронт хвилі на однакові або різні проміжки часу. В останньому випадку протяжне середовище є призмою, що забезпечує нахилене введення різних видів хвиль. Переважно швидкість звуку в затримці менша, ніж в ОК.

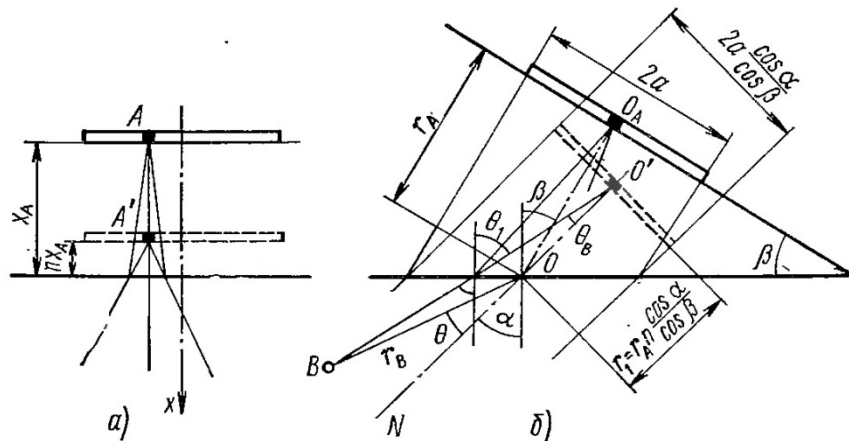


Рисунок 3.3 – До розрахунку поля випромінювання перетворювача з акустичною затримкою

Визначимо деякі поняття. *Акустичною віссю* прямого перетворювача називають геометричну вісь п'єзопластини $O_A X$ (рисунок 3.3, б). Для нахиленого перетворювача також називається продовження геометричної вісі в призмі у виробі після її переломлення на межі призма – ОК. *Точка виходу* O – точка перетину геометричної вісі з *контактною* (що контактує з ОК) *поверхнею* призми перетворювача. За малої товщини шару контактної рідини вона практично співпадає з точкою введення, де акустична вісь у виробі перетинається з поверхнею ОК (поверхнею введення). *Кутом нахилу акустичної вісі* α називають кут між нею і перпендикуляром до поверхні введення. Кут між перпендикуляром до контактної поверхні перетворювача і геометричною віссю в призмі – *це кут призми* β .

Центральний промінь – напрямок максимуму випромінювання. Він може не співпадати з акустичною віссю. Кут введення менший або рівний куту нахилу акустичної вісі. *Основна площина* – площина переломлення акустичної вісі; *додаткова(азимутальна) площина* перпендикулярна до

основної (перпендикулярна до площини рисунка) і проходить через акустичну вісь. Деякі наведені визначення і поняття трохи відрізняються від рекомендованих в ГОСТ 23829-85, але вони точно відповідають фізиці явища.

Акустичне поле прямого перетворювача, тобто перетворювача з плоско паралельною затримкою, розраховують, використовуючи поняття «уявна п'єзопластина», як показано на рисунку 3.4.а) штриховими лініями. Відстань уявної пластини від поверхні ОК рівна nx_3 , де x_3 – товщина акустичної затримки; $n=c_3/c$ – відношення швидкостей звуку в затримці та ОК (коефіцієнт переломлення).

Продовження переломлених променів у напрямку затримки приблизно перетинаються на уявній п'єзопластині (наприклад, для променів біля осі – в точці O'), а зміна фази хвиль однакова для всіх точок під час переходу від дійсної пластини до уявної, тому його можна не враховувати.

Акустичне поле нахилоного перетворювача має різний вигляд в основній і додатковій площинах. У площині падіння (основній) розмір уявного п'єзоелемента вважають зменшеним в $\cos \alpha / \cos \beta$ раз порівняно з дійсним, відстань вздовж переломленої вісі від нього до поверхні введення (тобто відстань від центра уявної пластини O' до точки виходу O) $r_1 = r_3 n \cos \alpha / \cos \beta$, де r_3 – середній шлях у затримці-призмі O_4O (рисунок 3.4, б). Така побудова уявного п'єзоелемента забезпечує достатньо точне зображення поля у віддаленій зоні. У додатковій площині поле формується так, як для випадку плоскої затримки.

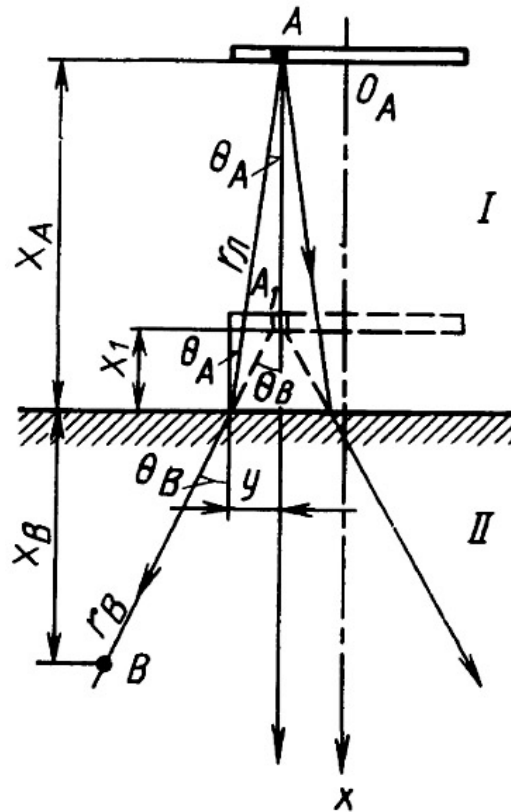


Рисунок 3.4 – Акустичне поле прямого перетворювача з плоско паралельною затримкою

Максимуми і мінімуми в ближній зоні визначаються інтерференцією хвиль у додатковій площині, де пластина має розмір $2a_2$. Розміщення останнього (найбільш віддаленого від перетворювача) максимуму визначається наближеною формулою:

$$r'_{\max} = \frac{a_2^2}{\lambda} - r_1, \quad (3.2)$$

де r'_{\max} – шлях вздовж акустичної вісі від точки введення O до максимуму.

В основній площині максимуми і мінімуми практично не утворюються внаслідок того, що переломлені промені від симетричних точок пластини, розташованих вище і нижче акустичної вісі, дають коливання, що не співпадають у точці B по фазі.

Роздільно-суміщений перетворювач, переважно, має призми, тобто акустичні затримки. Акустичне поле РС-перетворювача розраховують, побудувавши уявні п'єзопластини для дійсних випромінювача S_1 і приймача S_2 .

Центри уявних випромінювача і приймача s'_1 і s'_2 . Поле в точці B знаходять, розраховувавши відстань $r'_{s'_1 B}$, $r'_{s'_2 B}$ вздовж променів $S'_1 B$, $S'_2 B$ і кути θ' , θ'' між цими променями та акустичними осями уявних пластин, за формулою:

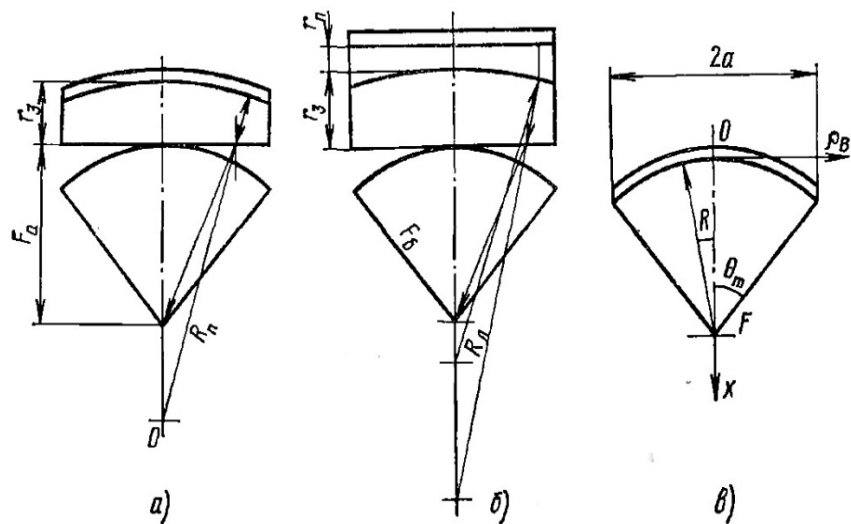
$$\Phi(a' k \sin \theta') \Phi(a'' k \sin \theta'') / (r' r'') \quad (3.3)$$

Тут $2a'$, $2a''$ – розміри уявних п'єзопластин в основній площині, постійні множники і коефіцієнти прозорості опущені, оскільки вони не впливають на зміну поля.

Поле фокусувального перетворювача

Фокусувальний перетворювач концентрує енергію поля у визначеній зоні – фокальній зоні, яка за сферичного фокусування має вигляд кола, а за циліндричного – полоси. Тут розглядається сферичне фокусування, хоч одержані закономірності дійсні і для циліндричного.

Найбільше застосування одержали способи з використанням криволінійної п'єзопластини (активним концентратором) і лінзи (рисунок 3.5). Між скривленою поверхнею п'єзопластини і плоскою поверхнею виробу вводять акустичну затримку, яка також виконує роль лінзи. Окрім того, застосовують фазове фокусування і фокусування з допомогою фазованих решіток (ФР).



а – активний концентратор з затримкою, б – плоска пластина з лінзою та затримкою, в – активний концентратор без затримки.

Рисунок 3.5 – Фокусувальні акустичні перетворювачі

Для забезпечення ефективного фокусування затримка і лінза повинні мати товщини, значно менші за довжину ближньої зони, тому вважають, що в цій зоні акустичне поле – пучок променів, перпендикулярних до поверхні випромінювача. Деформацію пучка лінзою і затримкою розраховують за законами геометричної акустики (аналогічно до законів геометричної оптики). Фокальні відстані для рисунку 3.5, а і б рівні

$$F_a = (R_a - r_3) \frac{c_1}{c_0}; \quad F_b = \left(\frac{R_l}{1 - c_3/c_l} - r_3 \right) \frac{c_3}{c_0}, \quad (3.4)$$

де R_a і R_l - радіуси кривизни поверхонь активного концентратора і лінзи; c_l , c_3 і c_0 - швидкості звуку в матеріалах лінзи, затримки і ОК відповідно.

У результаті, фокусувальною системою формується хвильовий фронт, що сходиться, з радіусом кривизни, рівним фокусній відстані. Усе подальше відноситься до активного концентратора, радіус кривизни якого рівний фокусній відстані: $R=F$ (рисунок 3.5, в). Будемо вважати, що апертурний кут (кутова апертура) рівний $\theta_m = \arcsin(a/F)$, не перевищує 30° .

Наближений вираз для поля випромінювання вздовж осі x [29]

$$|I_\phi| = \left| \frac{2}{1-x/F} \sin \left[\frac{\pi N}{2x} \left(1 - \frac{x}{F} \right) \right] \right|. \quad (3.5)$$

За $x=F$, тобто в точці геометричного фокусу, розкриття невизначеності дасть

$$|I_\phi| = N/F, \quad N = S/\pi\lambda, \quad (3.6)$$

де S - площа пластини перетворювача.

Поле випромінювання-приймання, як і раніше, наближено рівне квадрату поля випромінювання.

Різниця акустичних фокусуєчи систем від оптичних є в значному зміщенні максимуму $|I_\phi|$ (акустичного фокуса F') від геометричного фокуса F в бік перетворювача. Це пояснюється тим, що поле, що створюється фокусуванням, накладається на складне акустичне поле ближньої зони перетворювача, а в оптичних системах нефокусоване поле дуже добре здається як поле плоскої хвилі.

Під час проектування фокусуєчи перетворювачів часто ставиться завдання збільшення фокальної зони, тобто створення акустичного поля, в якому концентрація енергії коло осі відбувається в можливо більш широкому діапазоні відстаней. Кращих результатів у досягненні цієї мети вдається добитися з допомогою *аксиконового* РС-перетворювача. У ньому два п'єзоелементи: у центрі - кругла плоска пластинка, а навколо неї - фокусувальне кільце (активний концентратор).

Один з елементів є випромінювачем, другий – приймачем УЗ. Поле випромінювання-приймання такого перетворювача наближено рівне виробленню полів активного концентратора і центрального плоского елемента.

Під час контакту нахилених перетворювачів з викривленою поверхнею ОК (циліндричною чи сферичною) призму переважно притирають до поверхні. Акустичне поле такого перетворювача формується в результаті переломлення води, подібного з переломленням у лінзі. У зв'язку з цим були проведені дослідження з підбору матеріалу призми зі швидкістю повздовжніх хвиль, рівною або близькою до швидкості поперечних хвиль в ОК. Як подібний матеріал, було вибрано германантне скло.

Експерименти підтвердили, що результати фокусування таким нахиленим перетворювачем не гірші, ніж фокусування прямим перетворювачем.

Коректування акустичного поля перетворювача можливе шляхом змінного демпфірування п'єзопластини. Останнє викликає відповідні зміни тиску п'єзопластини на призму нахилоного перетворювача і формування акустичного поля перетворювача. Найбільший ефект спостерігався для параболічного закону демпфірування: він викликав звуження діаграми спрямованості і усунування поверхневих хвиль за більших кутів нахилу призми.

3.2 Опис методів дефектоскопії і товщинометрії трубних конструкцій

Основним завданням під час неруйнівного контролю нафтогазового устаткування є його дефектоскопія, а саме: виявлення дефектів типу порушення суцільності матеріалу (тріщини, раковини, непровари, розшарування, включення, корозійні пошкодження та ін.).

Кожен з методів неруйнівного контролю має свою сферу застосування, свої переваги й недоліки, і конкретний вибір передбачає врахування багатьох факторів. Наприклад, якщо говорити про дефектоскопію – а цей напрямок є найбільш опрацьованим – то слід брати до уваги матеріал, форму і розміри виробу; стан поверхні і доступність зони контролю; вид, місцезнаходження та розміри очікуваного дефекту; критерії відбракування; умови проведення контролю; технічну та технологічну забезпеченість. Якщо ж орієнтуватись на комплексний контроль якості, то необхідно одночасно оцінювати придатність методу для контролю декількох параметрів.

В загальному випадку якісний стан трубої колони визначають наступні параметри [30]:

1) геометричні параметри тіла труб (внутрішній та зовнішній діаметри, товщина стінки, величина та характер зносу, зігнутість, різностінність тощо);

2) геометричні параметри різьбових ділянок (параметри різьби та вузлів додаткової герметизації, ступінь зносу різьби, співвісність з'єднання);

3) несуча спроможність та герметичність з'єднань елементів колони;

4) наявність внутрішніх та поверхневих дефектів в тілі й різьбових ділянках;

5) міцнісні та пружні характеристики матеріалу елементів трубої колони, твердість їх поверхневого шару;

6) величина та характер розподілу напружень по товщині, в тому числі монтажних напружень.

Цей перелік узгоджується з рекомендаціями Американського нафтового інституту (АНІ) [31].

З метою обмеження номенклатури використовуваних приладів, а отже, й здешевлення комплексного контролю, бажано орієнтуватись на ті види неруйнівного контролю, які

забезпечують оцінку не одного, а декількох показників. Більшість параметрів, що визначають якість трубної колони, може бути оцінена за допомогою акустичного, вихрострумового та магнітного видів контролю [26, 32 – 34]. Коротко розглянемо переваги, недоліки й обмеження кожного з них.

Акустичні методи ґрунтуються на властивості пружних коливань звукового та ультразвукового (від $1,5 \cdot 10^4$ до 10^9 Гц) діапазонів розповсюджуватись в пружних середовищах у вигляді спрямованих пучків і змінювати свої параметри (амплітуду, швидкість поширення, відбиття, заломлення та ін.) в залежності від характеристик та стану контрольованого середовища [35-38]. В звуковому діапазоні використовуються методи акустичного імпедансу та вільних коливань. Методи ультразвукової дефектоскопії твердих тіл (тінювий, резонансний, велосиметричний та імпульсний луно-метод) добре досліджені й описані, забезпечують достатньо високу чутливість і різняться між собою в основному способами розташування перетворювачів відносно об'єкту контролю та характером дефектів, що виявляються. Але ці методи не обмежуються дефектоскопією – ультразвук може бути використаний для визначення пружних та міцнісних характеристик металу та інших матеріалів [39]. Акустичні методи відрізняються високою продуктивністю, порівняно легко піддаються механізації та автоматизації, дозволяють документувати й обробляти результати контролю [40, 41]. Великою перевагою ультразвукового методу є можливість проведення контролю безпосередньо недосяжних елементів (наприклад, різьбових частин згвинчених з'єднань) при односторонньому доступі до об'єкту [42]. Основним обмеженням цього методу є вплив на результати контролю наявності та властивостей проміжного акустичного середовища.

Вихрострумний контроль ґрунтується на залежностях амплітуди, фази, траєкторій, перехідних характеристик та спектру частот струмів, що збуджуються в об'єкті контролю, від його (об'єкта) форми, розмірів, фізико-механічних властивостей і суцільності матеріалу, віддалі від давача, частоти й швидкості переміщень та ін. [34]. Відповідно до цього метод знайшов застосування в чотирьох напрямках: виявлення поверхневих та підповерхневих дефектів, контроль фізико-механічних властивостей, вимірювання розмірів деталей та товщини покриттів, вимірювання параметрів вібрацій і переміщень деталей. Як бачимо, метод охоплює широкий спектр якісних показників і дає можливість реалізації багатопараметрового контролю. Особливе зацікавлення викликає придатність способу для контролю процесу втоми та контролю залишкових напружень. Але універсальність методу спричиняє його основний недолік: необхідність відлаштування від завод і пов'язану з цим складність інтерпретації результатів контролю. До безсумнівних переваг методу належать його висока продуктивність, безконтактність, придатність до автоматизації. Вихрострумні перетворювачі прості за конструкцією, витривалі до механічних та атмосферних впливів, але чутливість контролю залежить від розмірів перетворювача. Основним обмеженням у застосуванні цього виду неруйнівного контролю є мала глибина проникності електромагнітного поля в контрольоване середовище.

Магнітний контроль використовується в основному для виробів з ферромагнітних матеріалів, здатних суттєво змінювати свої магнітні характеристики під впливом зовнішнього магнітного поля. Цей вид контролю базується на реєстрації магнітних полів розсіювання, виникаючих над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей виробу, які характеризують його механічні та структурні характеристики, і забезпечує виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів,

вимірювання товщини та визначення структури й механічних властивостей [43]. З огляду рекомендації АНІ щодо застосування магнітопорошкового та магнітографічного методів для контролю відкритих різьб, зупинимось на них детальніше. При магнітопорошковому методі поля розсіювання над дефектами фіксуються за допомогою феромагнітних часток (магнітних порошоків, суспензій, часто люмінесцентних). Цей метод забезпечує виявлення тільки поверхневих тріщин, правда, навіть при дуже малому їх розкритті. Низькі продуктивність та технологічність та високі вимоги до якості поверхні в зоні контролю (бо дрібні риси індикуються як дефекти) суттєво обмежують застосування цього методу.

Магнітографічний метод передбачає фіксацію полів розсіювання за допомогою магнітної стрічки з наступним зчитуванням та розшифруванням одержаного запису. Застосування його ускладнюється розшифровкою записів магнітних стрічок. Ферозондовий метод полягає і реєстрації магнітних полів розсіювання за допомогою магніточутливих перетворювачів напруженості або градієнта магнітного поля в електричний сигнал (так званих ферозондів). Метод забезпечує виявлення поверхневих та підповерхневих дефектів з малим розкриттям на глибині до 10 мм, але достовірність результатів нестабільна внаслідок їх залежності від неоднорідності магнітних властивостей матеріалу, внутрішніх напружень та ін.

До основних недоліків магнітного контролю слід віднести неможливість виявлення внутрішніх дефектів в товщі металу, необхідність розмагнічування проконтрольованого виробу, а також потребу в безпосередньому доступі до поверхні контролю.

Не описані тут інші види та методи неруйнівного контролю або мають іншу сферу застосування, або явно

непридатні для вирішення задач оцінки якості елементів та з'єднань трубних колон .

Згідно з [25], засоби неруйнівного контролю розділяють за видами параметрів, які контролюються, на такі, що призначаються для:

- знаходження дефектів типу порушення суцільності (тріщини, непровари, вклучення та інше);
- контролю геометричних характеристик об'єкту (діаметр, товщина стінки, покриття, величина зносу, ширина, довжина та інше);
- вимірювання фізико-механічних та хімічних характеристик (електричні та магнітні параметри, відхилення від заданого хімічного складу, вимірювання твердості та пластичності, коерцитивної сили та інше);
- технічної діагностики прогнозування виникнення різного роду дефектів, в тому числі порушення суцільності, зміни розмірів та фізико-механічних властивостей виробів на період їх експлуатації.

Слід відмітити, що жоден з методів неруйнівного контролю не є універсальним [25, 45]; кожен має свої переваги і недоліки (Таблиця 3.1), свою галузь застосування, має певну точність та чутливість до виявлення дефектів. Так, магнітні та вихрострумові є безконтактними, високопродуктивними, але дозволяють виявляти тільки поверхневі та підповерхневі дефекти; радіаційні дозволяють виявляти дефекти в тілі металу, але за їх допомогою нема змоги виявляти втомні тріщини [46, 47], а їх експлуатація пов'язана з небезпекою для обслуговуючого персоналу; акустичні дозволяють виявляти дефекти як на поверхні, так і в тілі металу, визначати їх координати, проводити контроль при односторонньому доступі до виробу, але для їх реалізації потрібно забезпечити акустичний та механічний зв'язки між перетворювачем та контрольованим виробом.

Таблиця 3.1 - Аналіз існуючих методів неруйнівного контролю труб

Вид контролю	Переваги	Недоліки
Магнітний	не потребує наявності контакту, висока продуктивність	виявлення тільки поверхневих та підповерхневих дефектів
Вихрострумний	не потребує наявності контакту, висока продуктивність	виявлення тільки поверхневих та підповерхневих дефектів
Радіаційний	не потребує наявності контакту, виявляє дефекти в тілі металу	не дозволяє виявляти внутрішні тріщини, небезпечний для обслуговуючого персоналу, висока вартість контролю
Акустичний	виявлення дефектів будь-якої орієнтації як на поверхні, так і в тілі металу, визначення їх координат; контроль за одностороннього доступу	необхідність акустичного та механічного контакту між перетворювачем та контрольованим виробом

Вибір конкретного методу неруйнівного контролю залежить від матеріалу виробу, його конструкції, стану поверхні, типу та розмірів дефекту, умов контролю, необхідної точності та продуктивності контролю, вартості контролю тощо.

Найбільш широке поширення одержали магнітні, акустичні та радіаційні методи контролю, причому, в останній час перевагу мають акустичні, як найбільш універсальні, високопродуктивні та технологічні [48, 49].

У вітчизняній та зарубіжній практиці питанням застосування методів неруйнівного контролю, в тому числі і в нафтогазовій промисловості, приділяється значна увага. Так, в США [50] розробкою, виготовленням та впровадженням технічних засобів для потреб нафтогазової галузі займається цілий ряд фірм: “Тюбоскоп” (*Tuboscope*), “Ветко” (*Vetco*), “Дрілко” (*Drillco*), “Пластик Аплікейторс” (*Plastic Applicators*), “Брансон” (*Branson*), “Дейві Юнайтед” (*Davy United*) та інші. Ці фірми випускають установки *Амалог IV*, *Сканалог 500*, *Соноскоп*, *Веткоскоп*, *Дрілко* та інші [51, 52]. Як правило, дані установки використовуються для знаходження дефектів в тілі нових труб. Так, згідно з рекомендаціями [53] АНІ контроль труб проводиться після термообробки, перед нарізанням різьби.

При цьому, окрім візуального огляду та інструментального контролю, передбачається:

- для бурильних труб - знаходження повздовжніх дефектів по всій довжині труби акустичним, електромагнітним або магнітопорошковим методами. Висаджені кінці перевіряються магнітопорошковим методом на наявність поперечних дефектів. Товщину стінки заміряють акустичним або радіаційним методом [54];

- для обсадних труб - контроль магнітопорошковим методом зовнішньої та внутрішньої поверхонь кінцевих ділянок на відстані 300 мм від торців [55].

Знайдені дефекти, глибина яких знаходиться в межах від 5 до 12,5% номінальної товщини стінки, усуваються шліфовкою або обточкою пошкодженого місця. При цьому труба, у відповідності до ступеню пошкодження, відноситься до відповідного класу. Труби з дефектами, глибина яких

перевищує 12,5%, як правило, бракуються і використовуються не за прямим призначенням. В умовах трубних баз або трубних площадок в США, згідно з рекомендаціями АНІ, виконуються такі види контролю:

- замір відхилення величини зовнішнього діаметру від нормованого значення;
- дефектоскопія тіла;
- дефектоскопія зовнішньої та внутрішньої поверхонь кінцевих ділянок труб;
- товщинометрія тіла;
- огляд внутрішньої поверхні всієї труби на предмет точкової корозії за допомогою оптичних приладів;
- магнітографічний контроль відкритих різьб;
- контроль твердості металу;
- контроль на відповідність марки сталі нової труби взірцю відповідної якості (для попередження перемішування труб різних груп міцності).

В Західній Європі панівне положення по випуску засобів неруйнівного контролю займають фірми “Крауткремер”, “Карл Дойч” (Німеччина), РЕК-500, “Ультрасонік” (Франція), “Брансон” (Англія), які випускають установки для виявлення дефектів заводського походження поперечної та поздовжньої орієнтації в тілі труб акустичним та електромагнітним методами.

Неруйнівний контроль товстостінних безшовних труб з необхідною вірогідністю являє собою серйозну комплексну науково-технічну проблему, що вимагає рішення ряду часткових теоретичних, прикладних і організаційних задач. Складність здійснення контролю необхідного рівня збільшується тим, що далеко не на усіх вітчизняних підприємствах використовується сучасна технологія виробництва катаних труб, що забезпечує високий рівень якості продукції [56]. Однак використання ефективного НК

необхідне для запобігання економічного збитку за рахунок підвищення вірогідності контролю продукції [57].

Значних успіхів у теорії і практиці дефектоскопії досягли вітчизняні фахівці в частині синтезу методів НК різних класів виробів і створення засобів НК, що реалізують ці методи [58-60].

Одним з найбільш складних напрямків НК є контроль виробів із криволінійною поверхнею, зокрема, трубної продукції – катаних середньо- і товстостінних труб нафтового сортаменту (НС) [61].

Одним з першочергових питань у проблемі НК безшовних труб НС за критеріями міцності і надійності є вибір фізичного методу НК. Аналіз вітчизняних і закордонних теоретичних і прикладних робіт останнього років в області дефектоскопії показує, що з цього різноманіття існуючих методів НК труб НС, з розуміння простоти технічної реалізації, надійності роботи в умовах вітчизняного виробництва, по сукупності вимог — відносної безпеки (з погляду шкідливого впливу на людей) і можливості забезпечення достатнього рівня вірогідності контролю по всій номенклатурі дефектів, їхньому місцезнаходженню в тілі труби, їхнім розміром, конфігурації й орієнтації — оптимальним є метод акустичного контролю при використанні п'єзоелектричних перетворювачів. Аналіз реального стану НК середньо- і товстостінних труб НС на вітчизняних заводах показує, що пристрої НК, що реалізують даний метод, є практично єдиними [29].

Як було зазначено вище, найслабшою ланкою нафтогазового устаткування є їх різьбові з'єднання, а виявлення дефектів у них, особливо у зібраномі стані, є одним з найскладніших науково-технічних завдань у неруйнівному контролі. Тому розглядання методів дефектоскопії нафтогазового устаткування здійснимо на прикладі різьбових з'єднань трубних колон, нових конструкцій.

Було доказано, що єдиним теоретично можливим методом виявлення тріщин в різьбових з'єднаннях труб, які знаходяться в згвинченому виді в складі бурильної колони є акустичний метод [62]. Тому для забезпечення універсальності апаратури та здешевлення її вартості для дефектоскопії нафтогазового устаткування розроблялися переважно способи та засоби акустичного контролю.

Основні труднощі у вирішенні проблеми НКТД устаткування пов'язані із неповнотою та неоднозначністю інтерпретації інформації, яку одержують на практиці експериментів різними фізичними методами.

Складність діагностування таких об'єктів визначається взаємозв'язком, стохастичністю і корельованістю багатьох одночасно триваючих фізичних процесів, складністю конструкцій основних вузлів устаткування та умов експлуатації, принциповими труднощами одержання достовірної інформації, необхідної для розпізнання несправностей і оцінки технічного стану.

Окрім того, на сучасному етапі розвитку науки і техніки України, ставиться завдання не тільки локалізації та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу, але й: контроль за утворенням та докритичним розвитком тріщини; контроль напружено-деформованого стану матеріалу; вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дозволить через вимірювання цих параметрів вийти на оцінку залишкового ресурсу об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного (технічного) стану металоконструкцій.

Першим етапом у вирішенні поставленої проблеми є розробка нових та удосконалення існуючих методів математичного моделювання взаємодії зовнішніх фізичних полів з об'єктами контролю для кількості та достовірності

діагностичної інформації. Особливо складним об'єктом для дефектоскопічного контролю є трубні вироби та їх різьбові з'єднання, оскільки у них складна геометрична форма, матеріал часто знаходиться під дією значних напружень, а розміри типових дефектів співрозмірні з розмірами витків різьби.

З метою вирішення цього завдання було розроблено новий підхід до дослідження поширення ультразвукових коливань у матеріалах, за яким використовується зведення ефективного середовища за модулями пружності, залежними від просторового розподілу попередніх напружень [63, 64].

Вирішення цього має суттєве значення для розвитку методів акустичного контролю взагалі і, зокрема, для однієї з найбільш актуальних проблем – контролю якості різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту.

Для вирішення цієї задачі, розглянемо три стани пружного, в загальному випадку анізотропного середовища, рисунок 3.6.

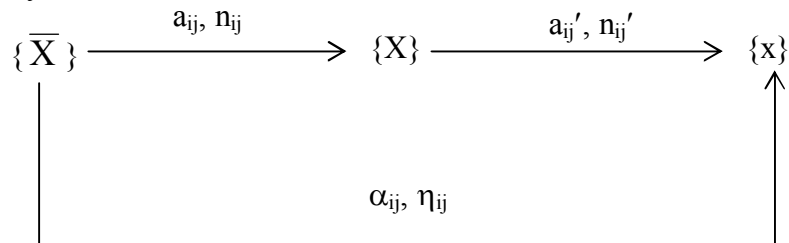


Рисунок 3.6 - Три стани пружного анізотропного середовища

$\{\bar{X}\}$ – стан ненапруженого середовища, $\{X\}$ – стан, який відрізняється від $\{\bar{X}\}$ наявністю скінченних неоднорідних напружень, які супроводжуються параметрами деформацій:

$$a_{ij} = \partial X_i / \partial \bar{X}_j = \delta_{ij} + U_{ij} \quad (3.6)$$

$$n_{ij} = 0,5 \cdot (a_{mi} \cdot a_{mj} - \delta_{ij}) = 0,5 \cdot (U_{ij} + U_{ji} + U_{ij} \cdot U_{ji}); \quad (3.7)$$

де $\delta_{ij} = 1, i = j; \delta_{ij} = 0, i \neq j; U_{ij} = \frac{\partial(X_i - \bar{X}_i)}{\partial X}$ - тензор дисторсій.

Перехід зі стану $\{X\}$ в стан $\{x\}$ описується інфінітезимальними тензорами \hat{a}° , \hat{n}° . Параметри деформацій \hat{a}° , \hat{n}° , $\hat{\alpha}$, $\hat{\eta}$ визначаються аналогічно (3.6) та (3.7).

Виходячи з визначення термодинамічного потенціалу одиниці маси, показано, що константи пружності другого порядку у стані $\{X\}$ можуть бути представлені як розклад по дисторсіях U_{mn} у лінійному наближенні:

$$C_{ijkl}(X) = C^{\circ}_{ijkl} + U_{mn} \cdot \left(\begin{aligned} &C^{\circ}_{njkl} \cdot \delta_{im} + C^{\circ}_{inlk} \cdot \delta_{jm} + C^{\circ}_{ijnl} \cdot \delta_{km} + \\ &+ C^{\circ}_{ijkn} \cdot \delta_{lm} - C^{\circ}_{ijkl} \cdot \delta_{mn} + C^{\circ}_{ijklmn} \end{aligned} \right) \quad (3.8)$$

де C°_{ijkl}, \dots - константи пружності у ненапруженому стані $\{X\}$.

Аналогічні вирази можуть бути одержані для констант пружності вищих порядків. Звідси випливає, що пружні властивості однорідного, але неоднорідно деформованого середовища можуть змінюватись внаслідок неоднорідності дисторсій U_{mn} . Вже на цьому етапі дослідження у першому наближенні можна було б, використовуючи залежні від координат пружні константи (3.8) у стандартних рівняннях руху пружного середовища, запропонувати метод дослідження поширення пружних хвиль у попередньо напружених середовищах. Але більш точний підхід полягає у виводі рівнянь руху у стані $\{x\}$ і переводі цього рівняння до координат ненапруженого стану $\{\bar{X}\}$. В результаті вказаних перетворень одержане рівняння руху у переміщеннях стандартного виду

$$\rho^{\circ} \ddot{\bar{\omega}} = \mu^* \cdot \bar{\nabla}^2 \cdot \bar{\omega} + (\lambda + \mu)^* \cdot \bar{\nabla} \cdot (\bar{\nabla} \cdot \bar{\omega}) \quad (3.9)$$

з пружними константами, залежними від координат. Це рівняння еквівалентне системі рівнянь Гельмгольца

$$\bar{\nabla}^2 \Phi(\bar{x}) + K_{ol}^2 n_1^2(\bar{x}) \Phi(\bar{x}) = 0 \quad (3.10)$$

$$\bar{\nabla}^2 \bar{\Psi}(\bar{x}) + K_{ot}^2 n_t^2(\bar{x}) \bar{\Psi}(\bar{x}) = 0 \quad (3.11)$$

де Φ і $\bar{\Psi}$ - скалярний та векторний пружні потенціали; $\bar{\omega} = W \cdot e^{-i\omega t}$, $i = \sqrt{-1}$, $\bar{W} = \bar{\nabla} \cdot \Phi + \bar{\nabla} \cdot \bar{\Psi}$, $\omega = 2\pi\nu$ - кругова частота; $k_{ol} = \omega/C_{ol}$; $k_{ot} = \omega/C_{ot}$; $n_1(\bar{x}) = C_{ol}/C_1(\bar{x})$; $n_t(\bar{x}) = C_{ot}/C_t(\bar{x})$; C_{ob} , C_{of} - деякі фіксовані швидкості поздовжніх і поперечних хвиль відповідно, $C_1(\bar{x})$, $C_t(\bar{x})$ - їх локальні значення; \bar{X} - координати ненапруженого стану.

У випадку високих частот доцільне застосування променевого методу. Тому розв'язок системи (5), (6) шукаємо у вигляді рядів Дебая:

$$\Phi(\bar{x}) = e^{iK_{ol}S} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} A_m(\bar{x}) / (ik_{ol})^m, \quad (3.12)$$

$$\bar{\Psi}(\bar{x}) = e^{iK_{ot}\bar{S}} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \bar{B}_m(\bar{x}) / (ik_{ot})^m, \quad (3.13)$$

де невідомі фази S , \bar{S} та амплітуди A_m , \bar{B}_m можуть бути знайдені з рівнянь ейконалу

$$(\bar{\nabla}S)^2 = n_1^2; \quad (\bar{\nabla}\bar{S})^2 = n_t^2 \quad (3.14)$$

та переносу

$$2\bar{\nabla}A_m \bar{\nabla}S + A_m \bar{\nabla}^2 S = -\bar{\nabla}^2 A_{m-1}; \quad (A_m = 0, m < 0); \quad (3.15)$$

$$2\bar{\nabla} \cdot \bar{B}_m \bar{\nabla} \cdot \bar{S} + \bar{B}_m \bar{\nabla}^2 \bar{S} = -\bar{\nabla}^2 \bar{B}_{m-1}; \quad (\bar{B}_m = 0, m < 0); \quad (3.16)$$

Розгляд задачі завершується прикладом застосування розвинутого методу до знаходження траєкторій променів і хвильових полів від зосереджених джерел у середовищах з плоско- та циліндрично-шаровим розподілом попередніх напружень.

Також було досліджено можливість застосування методу променивих рядів Дебая до дослідження поширення, відбиття

і заломлення пучків високочастотних хвиль (рисунок 3.7) при поперечному розповсюдженні у циліндричних хвилеводах.

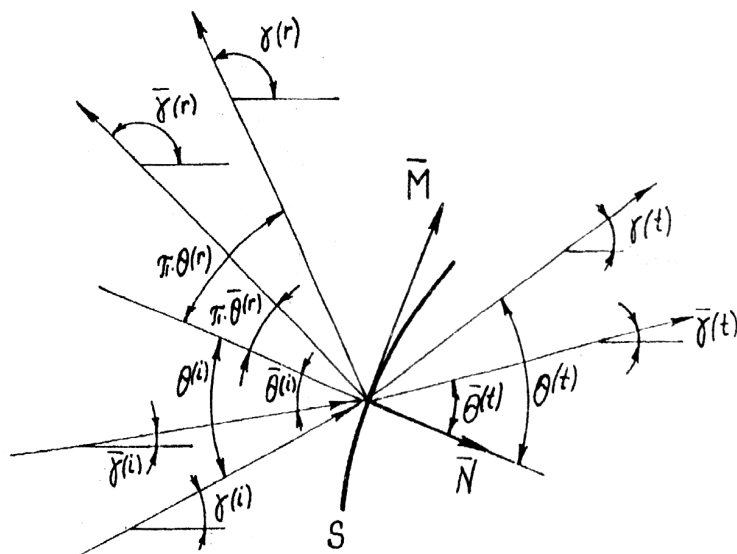
На відміну від більш складних умов попередньої задачі, у випадку плоских задач для однорідного середовища вдається знаходити довільну кількість членів променевих рядів і таким чином одержувати більш точні розв'язки, які залишаються придатними і для нижчих частот (до довжин хвиль, зрівнюваних з характерними розмірами задачі), а також більш точно враховують вплив кривизни хвильових пучків і границь.

Таким чином, одержані аналітичні вирази для знаходження довільної кількості амплітуд A_m , B_m променевих рядів Дебая. Розглянута геометрія падаючих, відбитих та заломлених променів на криволінійній границі розподілу двох середовищ, та граничні умови на них, що дало змогу розробити нові способи та методики ультразвукового контролю трубних виробів [65, 66].

Таким чином, одержані аналітичні вирази для знаходження довільної кількості амплітуд A_m , B_m променевих рядів Дебая. Розглянута геометрія падаючих, відбитих та заломлених променів на криволінійній границі розподілу двох середовищ, та граничні умови на них, що дало змогу розробити нові способи та методики ультразвукового контролю трубних виробів [66].

Відомо, що методика акустичного контролю матеріалів та виробів базується на властивості ультразвукових коливань (УЗК), що генеруються п'єзоелектричним перетворювачем встановленим на контрольованій поверхні і вводяться через шар акустичної рідини в контрольований виріб, розповсюджуватися в матеріалі виробу на значні відстані і відбиватись від границі розділу двох середовищ (тріщин з розкриттям 0,01 мм і більше) [32]. За інтенсивністю і часом приходу відбитих хвиль на п'єзоперетворювач можна судити про наявність, розміри, місцезнаходження, а інколи – і про

характер дефекту. Контроль здійснюється шляхом сканування перетворювачем поверхні виробу.



(i), (f), (r) – індекси відповідно падаючих, заломлених та відбитих хвиль; N – вектор, нормальний до границі розділу, M – вектор, дотичний до границі розділу.

Рисунок 3.7 - Схема відбиття та заломлення височастотних хвиль на криволінійній межі розподілу

Ультразвуковий промінь може вводитися по нормалі або під різними кутами до поверхні виробу, що дозволяє збуджувати в ньому хвилі різних типів (нормальні поздовжні, поперечні поздовжні, головні та інші) і виявляти дефекти будь-якої орієнтації на різній глибині. Чутливість методу з використанням існуючої апаратури (дефектоскопи УД2-70, УД3-71, УД4-Т, ДЮ-70 та ін) на частотах від 1,2 до 5 МГц (для сталі) забезпечує виявлення дефектів площею від 1 мм² та більше.

При розробці методики дефектоскопії для кожного контрольованого об'єкту необхідно вибрати (дослідити) основні параметри акустичного контролю:

- а) кут введення УЗК (кут призми п'єзоперетворювача) в контрольований об'єкт та частоту акустичних коливань;
- б) траєкторію сканування п'єзоперетворювачем;
- в) бракувальні критерії – тип та розміри штучних дефектів, які найбільш точно відповідають реальним дефектам, що підлягають виявленню;
- г) місця ймовірного виникнення дефектів в конкретному об'єкті контролю.

Розглянемо способи ультразвукового контролю гладкої частини трубних виробів. Для розробки способів ультразвукового контролю тіла труб нафтового сортаменту на наявність корозійно-втомних тріщин необхідно визначити характер їх розвитку. Дослідженнями вітчизняних [67, 68] та закордонних [69, 70] вчених встановлено, що корозійно-втомні тріщини розвиваються як в поперечній відносно осі труби площині, так і під кутом до неї. Відмічено також, що найбільш важливим параметром при контролі на наявність дефектів є спрямованість фронту розповсюдження втомних тріщин, тобто кута нахилу площини дефекту (втомної тріщини) до осі труби залежно від його глибини. Розглянемо способи ультразвукового контролю тіла труб при розташуванні дефектів перпендикулярно та під деяким кутом до осі труби (рисунок 3.8).

Відомо [46], що найкращими умовами виявлення дефектів є умови, при яких УЗК нормально падають на площину дефекту. Виходячи з цього припущення, побудуємо хід променів УЗК (побудови тут і далі показані для центрального променя пучка ультразвукових коливань).

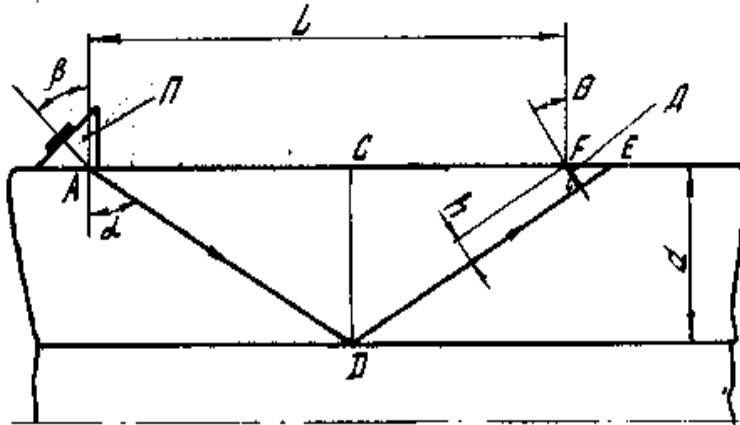


Рисунок 3.8 – Схема поширення центрального променя пучка УЗК за їх нормального падіння на площину дефекту

УЗК, що випромінюються п'єзоперетворювачем Π з кутом призми θ в точці A під кутом α вводяться в тіло труби і після однократного відбиття в точці D від внутрішньої поверхні і нормально падають в точці B на площину дефекту, відбиваються від неї і тим же шляхом повертається на п'єзоперетворювач Π . В результаті елементарних математичних перетворень параметри ультразвукового контролю визначаються з таких виразів:

- кут вводу УЗК в тіло труби

$$\alpha = 90^\circ - \theta; \quad (3.17)$$

- кут призми п'єзоперетворювача

$$\beta = \arcsin \left[\frac{C_{11}}{C_{12}} \sin(90 - \theta) \right]; \quad (3.18)$$

- відстань між точкою вводу УЗК та дефектом

$$L = 2AC - FE = \frac{2d \cos \theta - h}{\sin \theta}, \quad (3.19)$$

де: θ - кут нахилу площини дефекту, градуси; C_{11} , C_{12} -

відповідно швидкості розповсюдження УЗК, поздовжніх в призмі і поперечних - в контрольованому виробі, м/с; d - товщина стінки труби, м; h - глибина дефекту, м.

Однак можливі випадки, коли УЗК падають на площину дефекту під кутом, відмінним від прямого. Приклад побудови ходу променів для цього випадку показаний на рисунку 3.9. Параметри ультразвукового контролю визначаються з виразів:

- кут вводу УЗК в тіло труби

$$\alpha_1 = 90 - (\theta + \psi); \quad (3.20)$$

- кут приймання УЗК

$$\alpha_2 = 90 + (\theta - \psi); \quad (3.21)$$

- кут призми випромінюючого п'єзоперетворювача

$$\beta_1 = \arcsin \left[\frac{C_{п1}}{C_{т2}} \cos(\theta + \psi) \right]; \quad (3.22)$$

- кут призми приймаючого п'єзоперетворювача

$$\beta_2 = \arcsin \left[\frac{C_{п1}}{C_{т2}} \cos(\theta - \psi) \right]; \quad (3.23)$$

- віддаль між приймаючим перетворювачем та дефектом

$$L = 2K * D + EC = \frac{h \cos \psi}{\sin(\theta - \psi)} - \frac{2d}{\operatorname{ctg}(\theta - \psi)}; \quad (3.24)$$

- віддаль між випромінюючим та приймаючим п'єзоперетворювачами

$$l = \frac{5d}{\operatorname{ctg}(\theta + \psi)} + \frac{2}{\operatorname{ctg}(\theta + \psi)} + \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta + \psi)} - h \frac{\cos \psi}{\cos(\theta - \psi)}, \quad (3.25)$$

де ψ - кут падіння УЗК на площину дефекту, градуси.

З виразів (3.22) та (3.23) видно, що значення кутів призми обох п'єзоперетворювачів залежить від величини кута ψ . У зв'язку з цим доцільно розглянути питання вибору величини кута ψ .

Відомо [29], що трансформація хвиль призводить до різкого зменшення амплітуди відбитого сигналу, а це значною

мірою знижує чутливість контролю. Тому чисельні значення кута ψ і відповідних їм величин кута вводу УЗК слід вибирати такими, щоб уникнути явищ трансформації УЗК.

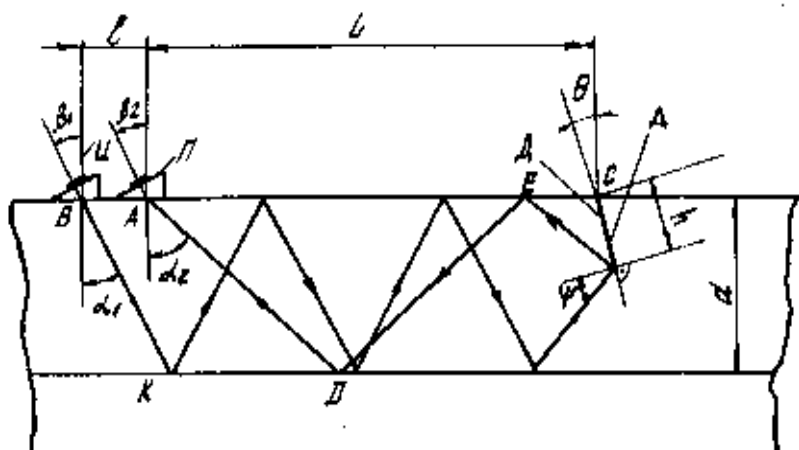


Рисунок 3.9 - Схема поширення центрального променя пучка УЗК при їх падінні на площину дефекту під кутом Ψ

Для дефектоскопії труб нафтового сортаменту переважно використовують поперечні хвилі [36], а це означає, що кут призми п'єзоперетворювача повинен бути більшим від першого критичного (в цьому випадку заломлена поздовжня хвиля не буде проникати в друге середовище)

$$\beta_1 > \beta_{кр1} = \arcsin \frac{C_{п1}}{C_{т2}}, \quad (3.26)$$

або

$$\psi > \arcsin \frac{C_{т2}}{C_{п1}} + \theta. \quad (3.27)$$

Також слід визначити умови, за яких відсутнє явище трансформації поперечних хвиль в поздовжні при падінні

пучка УЗК на площину дефекту. Ця умова буде виконуватись, якщо кут ψ буде більшим за третій критичний [32]

$$\psi > \beta_{кр3} = \arcsin \frac{C_{l2}}{C_{l2}}, \quad (3.28)$$

де C_{l2} - швидкість розповсюдження поздовжніх хвиль у контрольованому виробі, м/с.

Аналізуючи вирази (3.26) та (3.27), можна зробити висновок, що кут падіння поперечної хвилі на площину дефекту необхідно вибирати з умови

$$\psi > \arcsin \frac{C_{l2}}{C_{l2}} + \theta. \quad (3.29)$$

У відповідності з нормами [71] труби, що мають в тілі дефекти глибиною понад 3 мм, підлягають відбракуванню. На основі проведених авторами експериментальних досліджень встановлено, що кут нахилу площини втомної тріщини становить в середньому 22° . Тому, приймаючи $h = 3$ мм, $\psi = 22^\circ$, за формулами визначені параметри ультразвукового контролю тіла бурильних труб на наявність дефектів поперечної орієнтації, які наведені в таблиці 3.2.

На практиці часто зустрічаються випадки, коли дефекти орієнтовані під прямим кутом до осі труби. При цьому площина дефекту і зовнішня або внутрішня поверхня труби залежно від того, з якої сторони розвивається дефект, утворюють двогранний кут, який є нормованим відбивачем, і теорія відбиття від якого достатньо добре розроблена [29]. У цьому випадку відстань між випромінюючим та приймаючим п'єзоперетворювачами визначається з виразу

$$l = \frac{2h}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (3.30)$$

а решта параметрів - за формулами, наведеними вище.

Таким чином, розглянуті основні способи ультразвукового контролю тіла труб нафтового сортаменту на

наявність дефектів поперечної орієнтації і визначені їх основні параметри.

Таблиця 3.2 - Параметри ультразвукового контролю тіла бурильних труб на наявність дефектів поперечної орієнтації

Умовний діаметр труби, мм	Товщина стінки, мм	Кут вводу УЗК, град	Кут призми ПЕП, град	Відстань між точкою вводу УЗК та дефектом <i>L</i> , мм
60	7	79	55.5	72.6
	9			93.2
89	7	79	55.5	72.6
	9			93.2
	11			113.8
114	9	79	55.5	93.2
	10			103.5
127	9	79	55.5	93.2
	11			113.8
140	9	79	55.5	93.2
	11			113.8

Примітка. ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач.

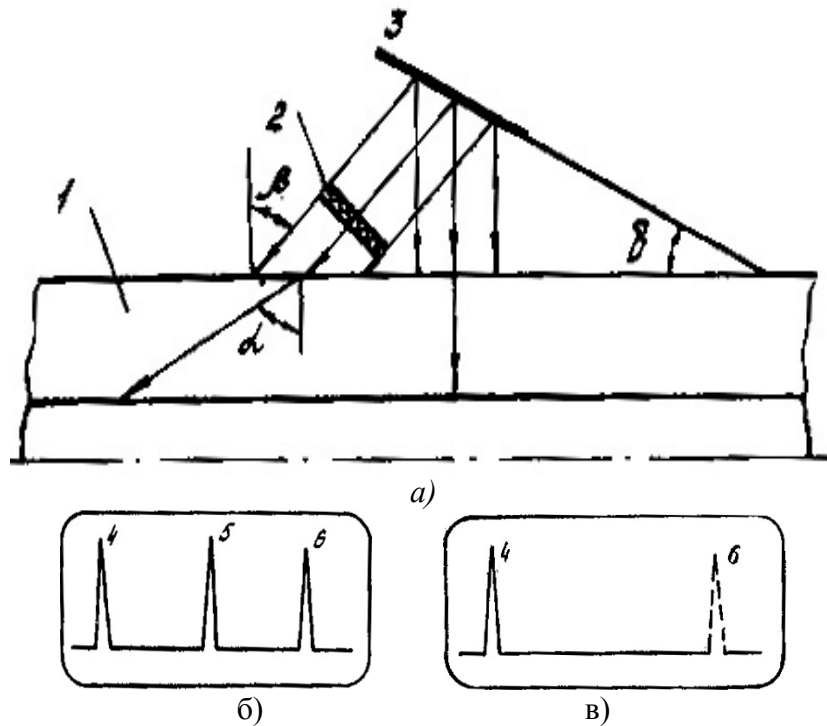
При проведенні контролю цими способами у всіх випадках на екрані дефектоскопа спостерігається зондувальний імпульс, а за наявності дефекту - відбитий від нього луно-імпульс. Інтерпретація результатів контролю в даному випадку неоднозначна, оскільки амплітуда імпульсу, відбитого від дефекту, значною мірою залежить від стану зовнішньої поверхні труби, температури оточуючого середовища, якості акустичного контакту та ін. Вплив цих факторів може бути усунений або значно зменшений, якщо існуватиме можливість порівняння амплітуди імпульсу,

відбитого від дефекту, з амплітудою деякого опорного сигналу, тобто при оцінці розмірів дефекту не за абсолютною величиною відбитого від нього імпульсу, а за співвідношенням амплітуд [72]. Тому був розроблений спосіб контролю, при якому забезпечується наявність опорного сигналу.

Для цього способу використовуються обидві випромінювальні сторони п'єзоелемента. УЗК, випромінювані однією стороною п'єзопластини 2 (рисунок 3.10 а), вводяться, як звичайно, в контрольований виріб 1 під певним кутом, а УЗК, випромінювані її протилежною стороною, попадають на дзеркальний відбивач 3, виготовлений з матеріалу з більшим питомим акустичним опором, ніж питомий акустичний опір матеріалу контрольованого виробу. Відбиті від відбивача 3 УЗК вводяться в об'єкт контролю по нормалі - це забезпечується орієнтацією відбивача під певним кутом до поверхні контрольованого виробу. Кут нахилу відбивача дорівнює половині кута нахилу п'єзопластини до тієї ж поверхні

$$\beta = 2\delta . \quad (3.31)$$

Ця умова повинна виконуватись постійно при зміні кута нахилу п'єзопластини. На екрані дефектоскопа спостерігається картина, показана на рисунку 3.10, б, де 4 – зондувальний імпульс, 5 - опорний імпульс (луно-імпульс від донної поверхні), 6 - луно-імпульс від дефекту. Реалізація цього способу дає змогу постійно контролювати якість акустичного контакту, визначати місцеположення дефекту і вимірювати його розміри.



а) при дефектоскопії гладкої частини тіла труб; б) зображення, що спостерігається на екрані дефектоскопа в цьому випадку; в) при традиційному контролі

Рисунок 3.10 – Графічне зображення способу одержання опорного сигналу

Також було запропоновано та досліджено способи стабілізації кута вводу УЗК при коливаннях температур оточуючого середовища та контрольованого виробу [73]. Це особливо важливо при проведенні контролю труб в польових умовах. Найбільш ефективним і простим в реалізації є спосіб стабілізації кута вводу ультразвукових коливань шляхом зміни кута нахилу призми. При цьому закон зміни кута призми (рівняння термостабільності) описується виразом

$$\theta = \pm \arcsin \frac{\sin \alpha \frac{C_p}{C_\theta} - \sin \beta \frac{C_p}{C_{np}}}{\sqrt{1 - \left(\sin \beta \frac{C_p}{C_{np}} \right)^2}} . \quad (3.32)$$

Аналогічні способи контролю різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту [74, 75]. Методика дефектоскопії нафтогазового устаткування передбачає попереднє настроювання апаратури на взірцях з штучними дефектами. Типова схема на лаштування показана на рисунку 3.11.

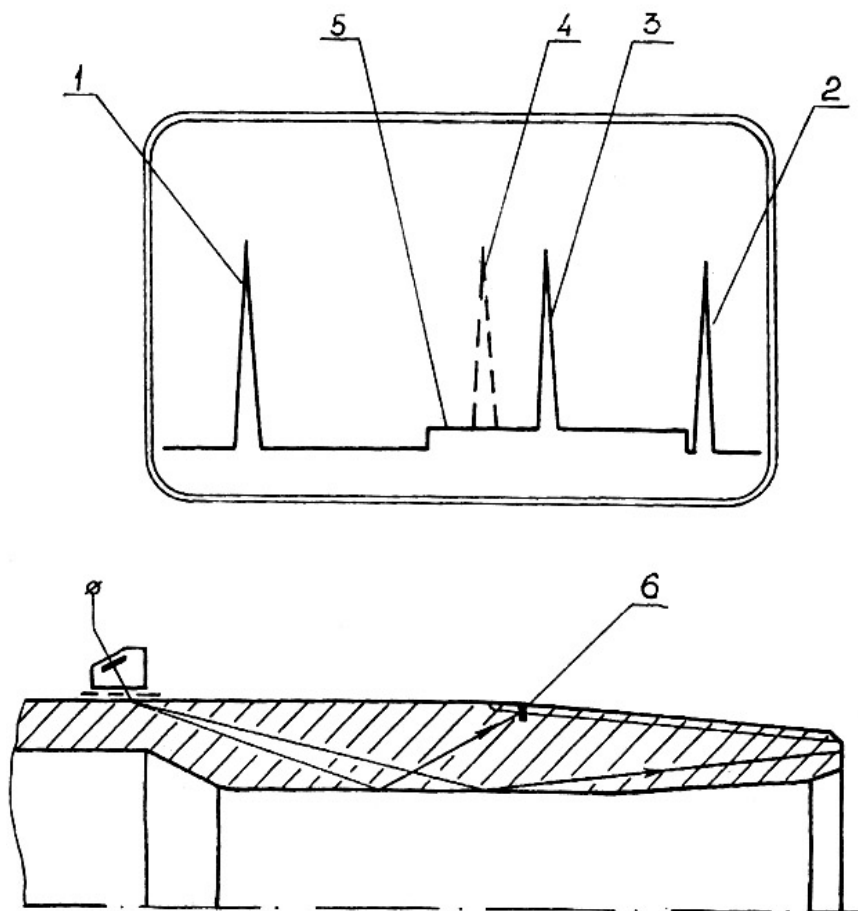
Особливий інтерес представляє собою контроль замкових різьбових з'єднань, за допомогою яких з'єднуються між собою обважненні бурильні труби, замки, перевідники, деякі конструкції бурильних труб і т.п. Існуюча методика контролю різьб ОБТ ультразвуковим імпульсним методом відлуння з торця за допомогою прямих п'єзоперетворювачів зі спеціально підбраною діаграмою напрямленості є досить недосконалою і небезпечною при її використанні безпосередньо над гирлом свердловини. До того ж, під час спуско-підймальних операцій не всі замкові з'єднання бурильної колони підлягають розгвинчуванню. У зв'язку з цим постала необхідність проведення дефектоскопії замкових з'єднань без їх попереднього розгвинчування .

Складність вирішення цього завдання зумовлена конструктивними особливостями замкових з'єднань: великими товщинами стінок обважнених бурильних труб і значною глибиною залягання дефектів; висотою упорного виступу в ніпельній частині тощо.

Наприклад, для УБТС-2 товщина стінки змінюється від 28 мм (для УБТС-2-120) до 99,5 мм (для УБТС-2-299).

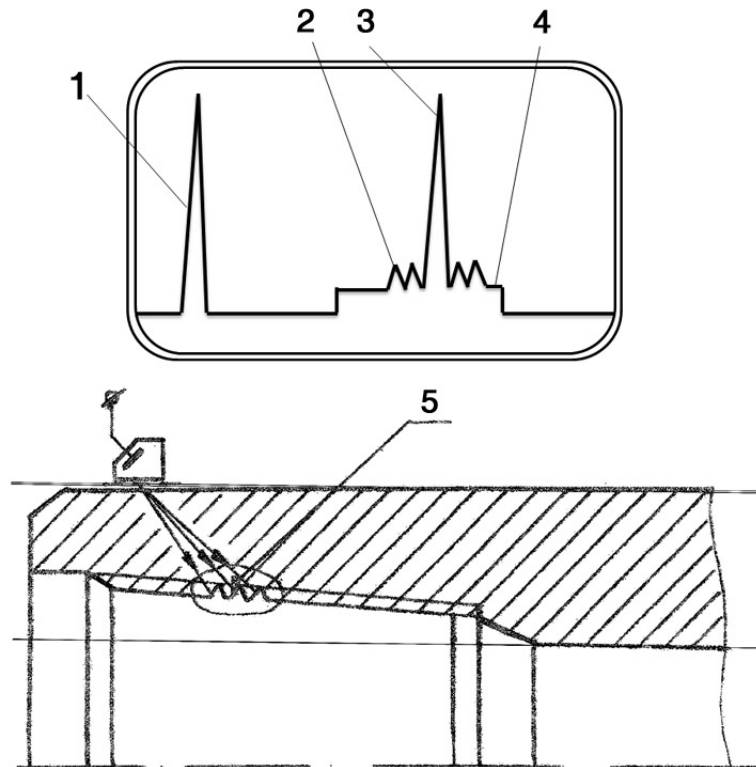
Контроль різьби муфтової частини не викликає особливих проблем – його можна здійснити за допомогою одного похилого п'єзоперетворювача, встановленого на

зовнішній поверхні муфти так, щоб УЗК випромінювались в напрямку меншої основи конуса різьби (рисунок 3.12).



1 – зондувальний імпульс; 2 – луно-імпульс від торця;
 3 – луно-імпульс від дефекту в западині п'ятої нитки різьби; 4 –
 луно-імпульс від дефекту в западині першої нитки різьби; 5 – строб-
 імпульс зони АСД; 6 – штучний дефект

Рисунок 3.11 – Дефектоскопія різьбових частин труб



1 – зондувальний імпульс; 2 – луно-імпульси, відбиті від витків різьби (“гребінка”); 3 – луно-імпульс від дефекту; 4 – строб-імпульс зони АСД; 5 – дефект

Рисунок 3.12 – Дефектоскопія муфтової частини замкового з’єднання

Кут введення УЗК і відповідно кут призми п’єзоперетворювача визначається з умови нормального падіння центрального променя пучка УЗК на тріщину втомі на початковому етапі її розвитку. За відсутності дефекту на екрані дефектоскопа спостерігається характерна “гребінка” луно-імпульсів, відбитих від граней різьби, які

“переливаються” під час переміщення п’єзо-перетворювача вздовж осі муфти. При появі дефекту на фоні гребінки з’являється відбитий від нього луно-імпульс 3 (рисунок 3.12). Це пояснюється тим, що час проходження відстані між сусідніми витками в напрямі розповсюдження хвилі УЗК більший від тривалості зондувального імпульсу. Отже, дефектоскопія замкової різьби муфтової частини може проводитись як при згвинченому, так і при розгвинченому з’єднаннях.

Для розробки способу контролю ніпельної частини зібраного замкового з’єднання були опрацьовані теоретично й досліджені експериментально декілька способів.

1) Спосіб контролю головними хвилями за допомогою суміщеного призматичного перетворювача з використанням луно-методу базується на тому, що поздовжня хвиля УЗК, спрямована вздовж вільної поверхні тіла труби, спричинює появу головної хвилі. Головна хвиля поширюється на границі з поверхнею труби і швидко затухає з глибиною. Встановлено, що амплітуда головної хвилі A зменшується за степеневою залежністю $A = R^{-3/2}$ (R – радіус), і тому відстань її поширення становить порядку 300 мм. Оптимальним кутом збудження й приймання головних хвиль є перший критичний, який визначається із закону Снелліуса:

$$\beta_{\text{кр}} = \arcsin \frac{C_{11}}{C_{12}} = \arcsin \frac{2670}{5847} = 27^{\circ}30', \quad (3.32)$$

де C_{11}, C_{12} - відповідно швидкості поширення поздовжніх хвиль в матеріалі призми перетворювача (оргскло, $C_{11}=2650$ м/с) та в матеріалі контрольованої труби (сталь, $C_{12}=5847$ м/с).

Процес контролю за цим способом полягає в тому, що короткі імпульси ультразвукових коливань, збуджені в п’єзоперетворювачі, посилаються із зовнішньої поверхні ніпельної частини з’єднання в напрямі від більшої до меншої

основи конуса різьбової частини. Після відбиття від дефекту луно-імпульс приймається тим же перетворювачем, підсилюється і виводиться на екран дефектоскопа. Недоліком способу є відсутність додаткових, так званих опорних сигналів сталої величини, порівняння яких з луно-імпульсами від дефекту дало б можливість локалізувати місце розташування дефекту та оцінити розміри.

2) Спосіб контролю поперечними хвилями за допомогою суміщеного призматичного перетворювача з використанням луно-методу за схемою реалізації принципово не відрізняється від попереднього. Здійснення дефектоскопії з'єднання "ніпель – муфта" цим способом значно підвищує інформативність контролю за рахунок більш повного використання [67] ультразвукового поля пучка УЗК по всьому перерізу його діаграми спрямованості. Поле пучка УЗК в дальній зоні набуває форми зрізаного конуса, половина кута розходження якого визначається з формули

$$\theta = \arcsin 0.61 \frac{C}{af}, \quad (3.33)$$

де: C – швидкість УЗК в матеріалі труби, м/с; a - радіус п'єзопластини перетворювача, м; f - частота УЗК, Гц.

Тому виявлення дефектів в різьбовій частині ніпеля, кут нахилу твірної різьби якого становить (залежно від конусності різьби) приблизно 5° або 7° може здійснюватись центральним променем пучка, при цьому крайні бокові промені використовуватимуться для отримання базових луно-імпульсів від упорного виступу та від торця. Співставлення між собою всіх трьох луно-імпульсів (від упорного виступу, від дефекту та від торця) дає підстави судити про місце розташування й розміри виявленого дефекту. Результати розрахунків показали, що для реалізації цього способу (на частоті 2.5 МГц при радіусі п'єзоелемента 9 мм) кут призми п'єзоперетворювача повинен становити 53° (при конусності

1:4) або 54° (при конусності 1:6). Суттєвим недоліком способу є його невисока чутливість, зумовлена розсіюванням хвиль внаслідок багатократного відбиття в товщі металу.

3) Спосіб контролю поперечними хвилями за допомогою двох роздільних призматичних п'єзо-перетворювачів з використанням методу відлуння. Спосіб реалізується завдяки тому, що певним чином орієнтовані п'єзоперетворювачі, установлені на зовнішній поверхні ніпельної частини з'єднання, синхронно переміщують по гвинтовій лінії з кроком, який дорівнює кроку різьби, в напрямі до упорного виступу [66].

Для реалізації пропонованого способу акустичні осі п'єзоперетворювачів повинні лежати в одній площині, паралельній поздовжній осі труби, і перетинатись в точці, розташованій в площині очікуваного дефекту (рисунок 3.13). Ця умова виконується тільки при певних кутах введення УЗК і при деякій фіксованій відстані між точками їх введення, причому обидва параметри залежать від типорозміру з'єднання.

Показані на рисунку 3.14 позначення відповідають наступному

$$BC = L, \quad (3.34)$$

де L - відстань від лінії, що з'єднує точки введення та приймання УЗК, до площини розташування дефекту,

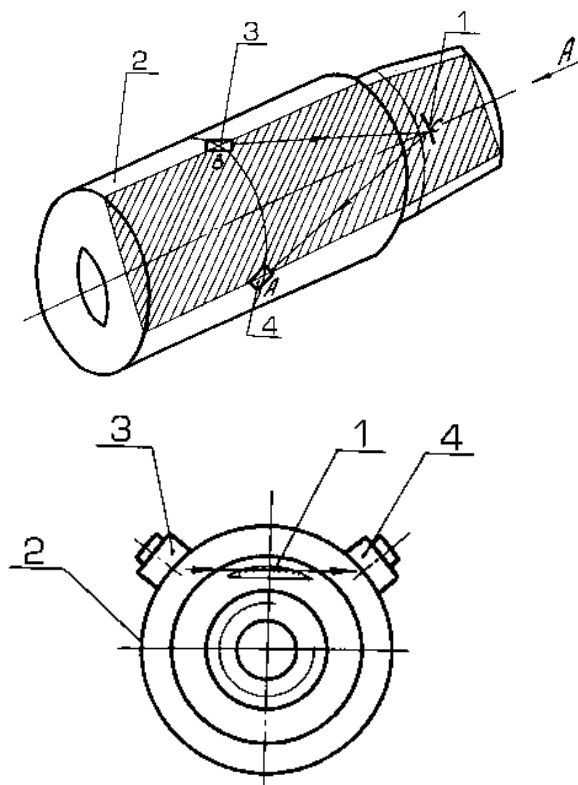
$$O_1B_1 = R - H, \quad (3.35)$$

де: R - радіус труби,

$$R = A_1O_1, \quad (3.36)$$

H - глибина залягання дефекту в різьбовій частині відносно зовнішньої поверхні гладкої ніпельної частини труби; A, A_1, A_2 - точки введення ультразвукових коливань на різних проекціях контрольованої ділянки труби; MN - нормаль, проведена до дотичної D_2C_2 до точки вводу A_2 ; γ - кут між нормаллю до дефекту в точці C та напрямом поширення

падаючого центрального променя УЗК, які лежать в площині, що паралельна поздовжній осі труби і проходить через дефект.



Вид А

1 – дефект; 2 – контрольована труба;
3, 4 – відповідно випромінювальний та приймальний
п'єзоперетворювачі

**Рисунок 3.13 - Схема реалізації способу контролю
різьбових з'єднань двома перетворювачами:**

Під таким же кутом γ в цій площині має місце відбиття ультразвукових коливань від дефекту в точці C , які поширюються в напрямку приймаючого п'єзоперетворювача (на рисунку 3.13 не показаний).

Для визначення кута α падіння ультразвукових коливань на поверхню труби здійснимо необхідні геометричні побудови (рисунок 3.14), які мають місце при реалізації пропонованого способу.

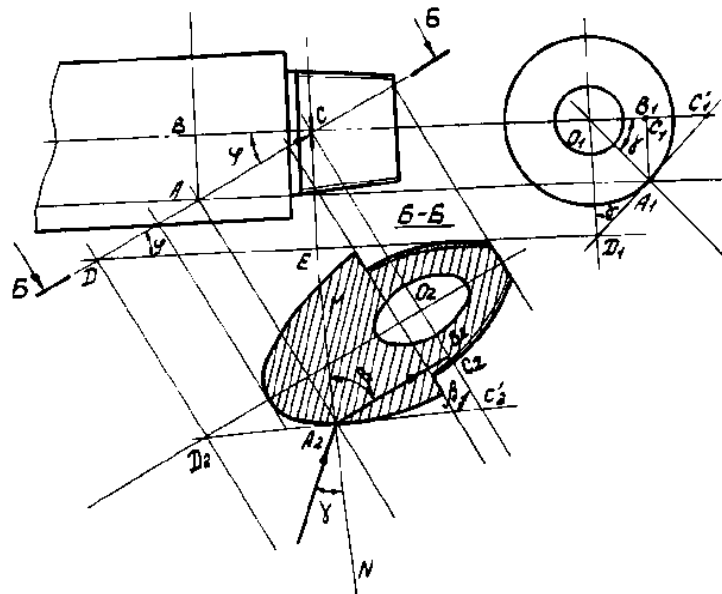


Рисунок 3.14 - Графічні побудови для визначення параметрів способу контролю

Згідно із законом заломлення хвиль УЗК на границі розподілу двох середовищ, кут падіння α визначаємо за рівнянням Снелліуса

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{C_1}{C_2} \sin \beta\right), \quad (3.37)$$

де C_1, C_2 - відповідно швидкості розповсюдження УЗК в першому та другому середовищах.

Використовуючи тригонометричні залежності, знаходимо кут заломлення ультразвукових коливань β в стінці труби, тобто з прямокутного трикутника $D_2C_2O_2$ визначаємо

$$D_2O_2 / O_2C_2 = \operatorname{tg} \beta, \quad (3.38)$$

де $O_2C_2 = O_1C_1$.

Визначаємо складову

$$O_2C_2 = O_1C_1. \quad (3.39)$$

З прямокутного трикутника $A_1C_1O_1$ маємо

$$O_1C_1 = O_1A_1 / \cos \gamma = R / \cos \gamma. \quad (3.40)$$

Значення $\cos \gamma$ через відомі параметри труби визначаємо з прямокутного трикутника $A_1B_1O_1$ як

$$\cos \gamma = O_1B_1 / O_1A_1 = (R - H) / R. \quad (3.41)$$

Підставляючи значення $\cos \gamma$ (10) у вираз (9), знаходимо

$$O_2C_2 = R^2 / (R - H). \quad (3.42)$$

Визначаємо складову

$$D_2O_2 = DC. \quad (3.43)$$

З прямокутного трикутника DCE записуємо

$$DC = CE / \sin \varphi, \quad (3.44)$$

де

$$CE = O_1D_1. \quad (3.45)$$

В свою чергу, O_1D_1 може бути визначене з прямокутного трикутника як

$$O_1D_1 = A_1O_1 = R / \sin \gamma. \quad (3.46)$$

Значення $\sin \gamma$ також може бути визначене через відомі параметри труби з прямокутного трикутника $A_1B_1O_1$, тобто:

$$\begin{aligned} \sin \gamma &= A_1B_1 / A_1O_1 = A_1B_1 / R = \sqrt{A_1O_1^2 - O_1B_1^2} / R = \\ &= \sqrt{R^2 - (R - H)^2} / R \end{aligned} \quad (3.47)$$

Підставляючи у (3.45) замість $\sin \gamma$ його вираз (3.47), знаходимо

$$CE = O_1D_1 = R^2 / \sqrt{R^2 - (R - H)^2} \quad (3.48)$$

Значення $\sin \varphi$ через відомі параметри труби знаходимо з прямокутного трикутника ABC

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= AB / BC = \\ &= \sqrt{R^2 - (R - H)^2} / \sqrt{L^2 - R^2 - (R - H)^2}, \end{aligned} \quad (3.49)$$

де:

$$AB = A_1B_1 = \sqrt{R^2 - (R - H)^2}, \quad (3.50)$$

$$AC = \sqrt{L^2 + AB^2} = \sqrt{L^2 + R^2 - (R - H)^2}. \quad (3.51)$$

Після підстановки виразів (3.48) та (3.49) у вираз (3.35) знаходимо згадувану складову

$$D_2O_2 = DC = \frac{R^2 \sqrt{L^2 - R^2 - (R - H)^2}}{R - (R - H)^2}. \quad (3.52)$$

Провівши відповідні підстановки, отримуємо

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= D_2O_2 / O_2C_2 = \frac{R^2 \sqrt{L^2 - R^2 - (R - H)^2}}{R^2 - (R - H)^2} \cdot \frac{R - H}{R^2} = \\ &= \frac{(R - H) \sqrt{L^2 - R^2 - (R - H)^2}}{R^2 - (R - H)^2}. \end{aligned} \quad (3.53)$$

З виразу (3.53) отримуємо формулу для визначення кута заломлення:

$$\beta = \operatorname{arctg} \left[\frac{(R-H)\sqrt{L^2 + R^2 - (R-H)^2}}{R^2 - (R-H)^2} \right], \quad (3.54)$$

яка після підстановки у (3.42) дає вираз для визначення кута падіння α , тобто:

$$\alpha = \arcsin \left\{ \frac{C_1}{C_2} \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{(R-H)\sqrt{L^2 + R^2 - (R-H)^2}}{R^2 - (R-H)^2} \right] \right\}, \quad (3.55)$$

де: C_1 - швидкість поширення поздовжніх хвиль ультразвукових коливань в матеріалі призми похилого п'єзоперетворювача; C_2 - швидкість поширення поперечних хвиль ультразвукових коливань в матеріалі контрольованої труби; R - радіус контрольованої труби; H - глибина залягання дефекту в різьбовій ділянці ОБТ відносно зовнішньої поверхні гладкої ніпельної частини труби; L - відстань від лінії, що з'єднує точки вводу та приймання УЗК, до площини розташування дефекту.

Відстань l між випромінюючим та приймаючим перетворювачами вибирають зі співвідношення

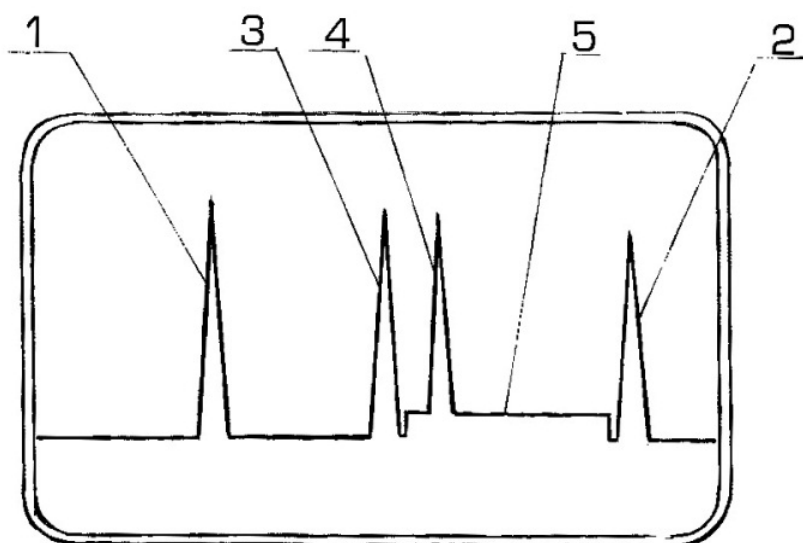
$$l = 2Ltg\varphi, \quad (3.56)$$

де: L - відстань від лінії, що з'єднує точки вводу та приймання УЗК, до площини розташування дефекту; φ - кут падіння центрального пучка променя УЗК на поверхню очікуваного дефекту.

За описаних виразами (3.55) та (3.56) умов досягається нормальне падіння центрального променя пучка УЗК на площину дефекту, що забезпечує найкращі умови для їх відбиття і відповідно максимальну амплітуду луно-імпульсу 4 (рисунок 3.15).

Підвищенню якості контролю сприяє використання опорних сигналів 2, 3. За їх одночасною наявністю можна судити про стабільність акустичного контакту між

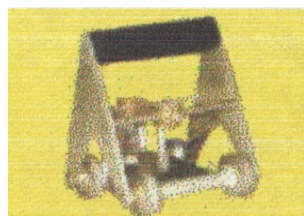
п'єзоперетворювачами та об'єктом контролю, а співвідношення амплітуд луно-імпульсів 2, 3, 4 дає змогу визначити місце розташування та оцінити розміри дефекту.



1 – зондувальний імпульс; 2, 3 – відповідно луно-імпульси від торця та від упорного виступу; 4 – луно-імпульс від дефекту, 5 – строб-імпульс зони АСД

Рисунок 3.15 – Зображення на екрані дефектоскопа під час контролю ніпельної частини замкового з'єднання в зібраному стані

Детально методики неруйнівного контролю викладені в нормативних документах. Для реалізації методики та способів контролю були розроблені спеціалізовані п'єзоперетворювачі та пристрої (держачи, сканери) для їх утримання та переміщення по поверхні контрольованих виробів [76]. На рисунках 3.16, 3.17 показані найбільш широко застосовані спеціалізовані п'єзоперетворювачі та їх тримачі.



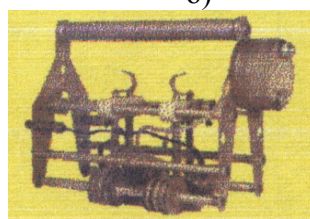
а)



б)



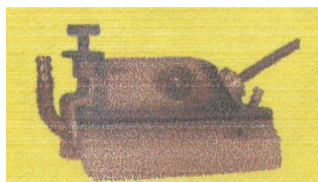
в)



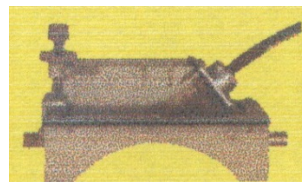
г)

а) – сканер магнітний; б) – держак “Гном”; в) – сканер для дефектоскопії кінця ОБТ; г) – сканувальний блок УКГ

Рисунок 3.16 – Сервісні пристрої та прилади



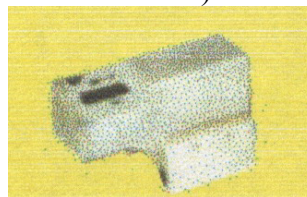
а)



б)



в)



г)

а) – акустичний блок П121Ф-2,5-70-*; б) – акустичний блок П121Ф-2,5-65-*; в) – акустичний блок АБ-ТТ; г) – акустичний блок АБ-ТТ-М

Рисунок 3.17 – Первинні перетворювачі

Розроблені методики та засоби (п'єзоперетворювачі, сканери) для їх реалізації є складовою частиною пересувних та переносних установок.

3.3 Методи контролю конструкцій, виконаних з натягом

При дослідженні нових інформаційних ознак якості різьбових з'єднань доцільно також розглянути фізичну суть процесів, що відбуваються при контактуванні елементів різьбового з'єднання.

Контактування твердих тіл проходить дискретно [77], виступами шорсткостей, внаслідок чого утворюються мікрозазори. При пружному контакті кожен мікрозазор можна розглядати як частину гранично тонкого і безмежно протяжного екрану (рисунок 3.18). Плями дотику виглядають як отвори в цьому екрані. При збільшенні навантаження та зближенні поверхонь, що контактують, безмежний екран ділиться на множину екранів з кінцевими розмірами, які утворюють так звану фактичну площу дотику (ФПД). Фактична площа дотику складається із зон схоплювання та щільного контакту, які характеризуються лінією контакту шириною, як правило, від 0,1 до 2 мкм. Результати досліджень, одержані різними дослідниками — М.Б.Дьомкіним [77], М.В.Хімченко [78], Л.Б.Березовським [79], Г.Вігандом [80] доводять наявність зв'язку між ФПД та величиною навантаження контактних поверхонь.

Було встановлено [80], що в загальному вигляді залежність між фактичною площею дотику S_{ϕ} та величиною контактного тиску P_{κ} можна описати такою залежністю:

$$S_{\phi} = b \cdot P_{\kappa}^c \cdot n \cdot H, \quad (3.57)$$

де: b - максимально можлива сумарна довжина зон щільного схоплювання та контакту, характерна для даного типорозміру з'єднання, становить 8-10 мм залежно від P_{κ} ; c - показник

ступеня, який враховує умови контактування, $c = 0,5$ при контактуванні металевих поверхонь; n - коефіцієнт, що враховує шорсткість контактуючих поверхонь, при $R_a < 0,16$ мкм $n = 0,43$ мм²/Н; H — значення товщини охоплюючої деталі, мм

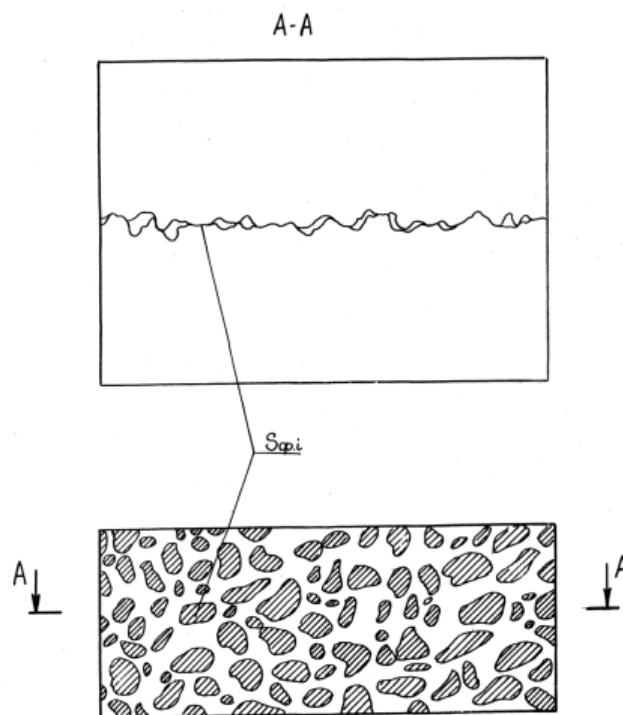


Рисунок 3.18 – Стан контактної зони при контактуванні твердих поверхонь $S_{\phi i}$ - площа дотику плям

Як ілюстрацію до приведених викладок можна привести результати досліджень, проведених М.В.Хімченко та Л.Б.Березовським [79] на з'єднаннях вал - втулка,

виготовлених із сталі 50, при контактних тисках в діапазоні від 30 до 2400 МПа. Дослідження проводились на штучних зразках. Встановлено, що найбільша кількість плям утворюється при значеннях тисків 120-140 МПа, що відповідає зоні найбільшої пластичної деформації. Подальше збільшення величини контактного тиску не викликає ні росту числа плям, ні збільшення їх розмірів. На рисунку 3.19 показана залежність зміни фактичної площі дотику від величини контактного тиску, одержана Л.Б. Березовським.

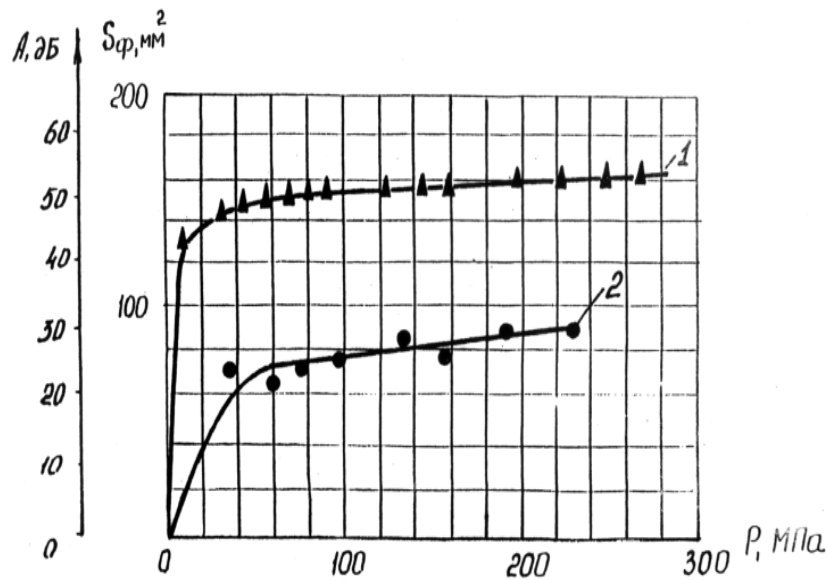


Рисунок 3.19 — Залежність фактичної площі дотику S_{ϕ} (1) [81] та амплітуди ультразвукових коливань (2) від контактної тиску P

Таким чином, є всі підстави вважати, що значення фактичної площі дотику можна прийняти за інформативну діагностичну ознаку якості різбових з'єднань, зібраних з натягом.

Виходячи з результатів проведеного аналізу, необхідно запропонувати та дослідити методи та способи вимірювання запропонованих нових інформативних діагностичних ознак.

Перспективним напрямком вирішення даної проблеми є застосування акустичних методів неруйнівного контролю [82, 83]. Так, для вимірювання величини радіальних напружень було запропоновано застосувати метод акустичної тензометрії, в основу якого покладено явище акустопружності - залежності швидкості поширення пружних хвиль від величини механічних напружень. Вперше ефект акустопружності був відкритий дослідниками Р.Бенсоном та В.Раельсоном [84]. Вони встановили, що швидкість поляризованих поперечних хвиль, що поширюються в напруженому твердому тілі, не є постійною і залежить від величини напруження, напряму коливання частинок (поляризації) і напряму поширення хвиль. За допомогою цього методу можна визначати не лише прикладені, але й залишкові напруження, які виникають в деталях в процесі їх виробництва та експлуатації. Акустопружність дає змогу використовувати уже відомі акустичні методи контролю, що базуються на різних способах вимірювання їх параметрів. Зокрема, залежність зміни швидкості поширення пружних хвиль від величини механічних напружень описується таким рівнянням:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta_\sigma \cdot \sigma, \quad (3.58)$$

де: V_0 - швидкість у вихідному ненапруженому стані, м/с;
 β_σ - коефіцієнт, що характеризує зміну властивостей досліджуваного об'єкта, м²/Н; σ - напруження в матеріалі, МПа;

Пропонований метод порівняно з відомими методами, такими як рентгенівський, тензометричний, голографічний, крихких покриттів, має суттєві переваги. Він дає змогу

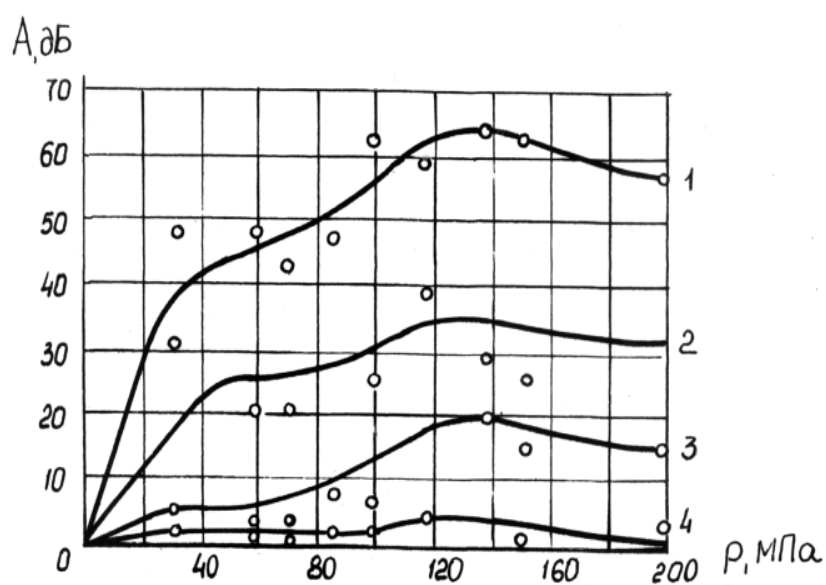
виконувати вимірювання напружень, в тому числі залишкових, як за величиною так і за напрямом в об'ємі матеріалу, тоді як решта методів обмежуються вимірюванням поверхневих напружень. Окрім того, його перевага в оперативності контролю та можливості одержання інтегральної оцінки напружень по всьому з'єднанню в процесі експлуатації.

Однак при спробі практичної реалізації даного методу дослідники зіткнулися з рядом серйозних труднощів. Головна складність полягає в наявності так званих “нелінійних ефектів”, що виникають в твердому тілі при поширенні і взаємодії в ньому пружних хвиль, що не можуть бути пояснені за допомогою лінійних теорій. Ще складніші явища мають місце в твердих тілах із складним неоднорідним навантаженням, якими є різьбові з'єднання. Тому це питання вимагає проведення серйозних досліджень із застосуванням нових підходів.

Вимірювання ФПД було запропоновано здійснювати за допомогою ультразвукових коливань [82]. Однак огляд науково-технічної інформації в цьому напрямку показав, що акустичні ефекти в контактній зоні досліджені недостатньо повно. Дослідження проводились тільки для випадків пружного контактування при невеликих рівнях навантажень. Не були проведені дослідження при значному навантаженні і наявності між контактуючими поверхнями мастила, що виступає демпфером для пружних хвиль.

Суть процесів, пов'язаних з проходженням пружних хвиль через зону контакту, найкращим чином пояснюється з позиції стаціонарної задачі дифракції [85]. Ультразвукова хвиля дифрагує при її падінні на пляму дотику. Проведені дослідження [79] підтвердили наявність зв'язку між акустичними властивостями з'єднань з натягом і ФПД, яка визначає їх якість (рисунок 3.20). З рисунка видно, що криві за характером подібні до кривої з рисунку 3.19 і мають свій

максимум, що відповідає значенню контактному тиску 140 МПа. Це свідчить про пропорційність кількості енергії УЗК, що проходить через контактну зону, фактичній площі контакту і, таким чином, може характеризувати якість з'єднання.



1 - 0,7 МГц; 2 - 2,5 МГц; 3 - 3,0 МГц; 4 - 4,0 МГц [79]

Рисунок 3.20 - Залежність амплітуди ультразвукових коливань від контактної тиску P на різних частотах

Але в літературі з цього питання є обмежені дані, яких недостатньо для практичного використання при контролі якості різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту. Тому необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження для розробки способів, технічних засобів,

методик визначення міцності та герметичності конкретних типорозмірів різьбових з'єднань трубних колон.

Також були проведені дослідження по визначенню залежності між амплітудою УЗК та значенням діаметрального натягу. Експерименти проводились на 10 зразках з'єднань труб ВК групи міцності Л діаметром 140 мм з товщиною стінки 11 мм, зібраних з замками шляхом селективного підбору з метою забезпечення діаметрального натягу по стабілізуючому пояску в діапазоні від 0 до 0,8 мм [86].

Ввід УЗ хвиль здійснювався за допомогою нормальних п'єзоперетворювачів з робочими частотами 0,6; 1,25; 2,5 та 5,0 МГц із діаметром п'єзоелементів 10 мм. П'єзоперетворювачі працювали по суміщеній схемі. Амплітуда луно-імпульсів, відбитих від поверхні спряження, вимірювалась за допомогою серійного дефектоскопа УД-10УА. В якості контактної рідини використовувалось автомобільне масло АС-8. Внаслідок неточності виготовлення труби і замка (відхилення зовнішнього і внутрішнього діаметрів, овальності, шорсткості поверхні від номінальних їх значень), контактний тиск на спряжених поверхнях розподіляється нерівномірно. Для з'ясування характеру розподілу контактного тиску по поверхні спряження амплітуда відбитих луно-імпульсів вимірювалась на кожному з'єднанні у 18 точках по шести твірним при трьох положеннях п'єзоперетворювачів (рисунок 3.21).

Для підвищення точності експерименту амплітуда луно-імпульса, відбитого від поверхні спряження, порівнювалась з амплітудою луно-імпульса, відбитого від внутрішньої вільної циліндричної поверхні замка.

В результаті обробки експериментальних даних було встановлено, що зв'язок між амплітудою УЗК та величиною контактного тиску з достатньою точністю (коефіцієнт кореляції 0,85) можна описати рівнянням регресії, яке для частоти УЗК 5 МГц має вигляд $A = 21.63 + 0.06P$, де A - амплітуда УЗК, дБ; P - контактний тиск, МПа [83].

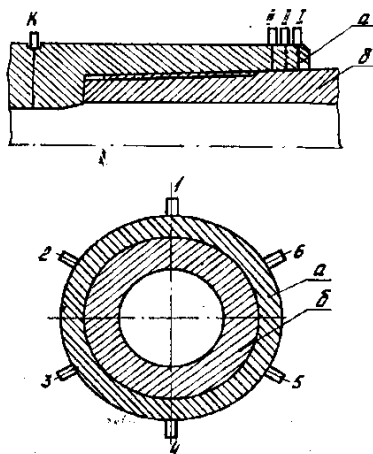


Рисунок 3.21 - Схема проведення експерименту для встановлення залежності амплітуди УЗ хвиль від радіального натягу

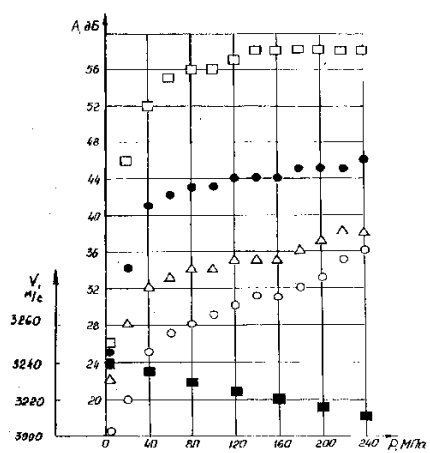


Рисунок 3.22 - Залежність амплітуди УЗК різних частот (○ - 0.6 МГц, △ - 1.25 МГц, ● - 2.5 МГц, □ - 5.0 МГц) та швидкості розповсюдження УЗ хвиль від величини контактного тиску

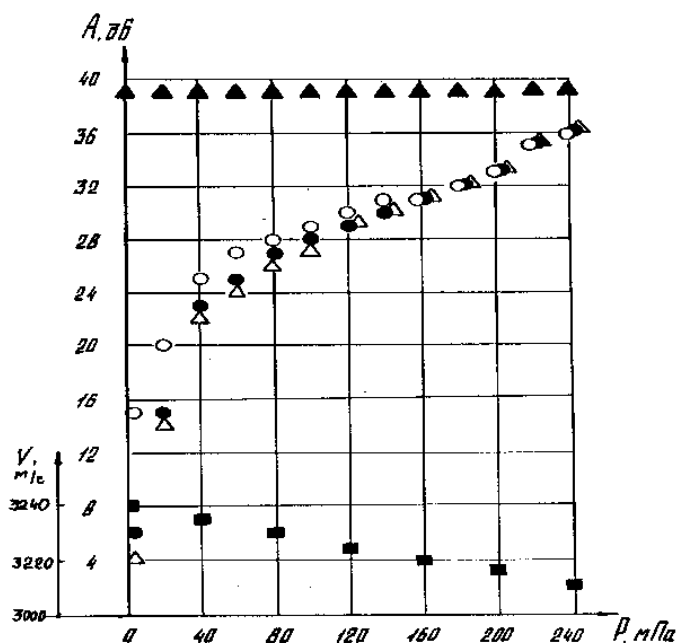


Рисунок 3.23 - Залежність амплітуди УЗ хвиль від величини контактного тиску за різних шорсткостей контактних поверхонь (○ - 20 мкм, ● - 40 мкм, Δ - 60 мкм) та навантаження суцільного зразка (Δ)

Аналіз залежності амплітуди УЗК від величини контактного тиску (рисунок 3.22) показує, що:

- амплітуда УЗК при збільшенні контактного тиску зростає до певного значення (80 МПа), далі її ріст практично припиняється. Такий характер зміни залежності підтверджує правильність висновків про можливість використання фактичної площі дотику як інформаційної ознаки якості різьбового з'єднання;
- шорсткість контактуючих поверхонь практично не впливає на характер залежності (рисунок 3.23), а відсутність мастила між контактуючими поверхнями приводить до

помітного (в середньому на 11 дБ) зменшення амплітуди УЗК (рисунок 3.24).

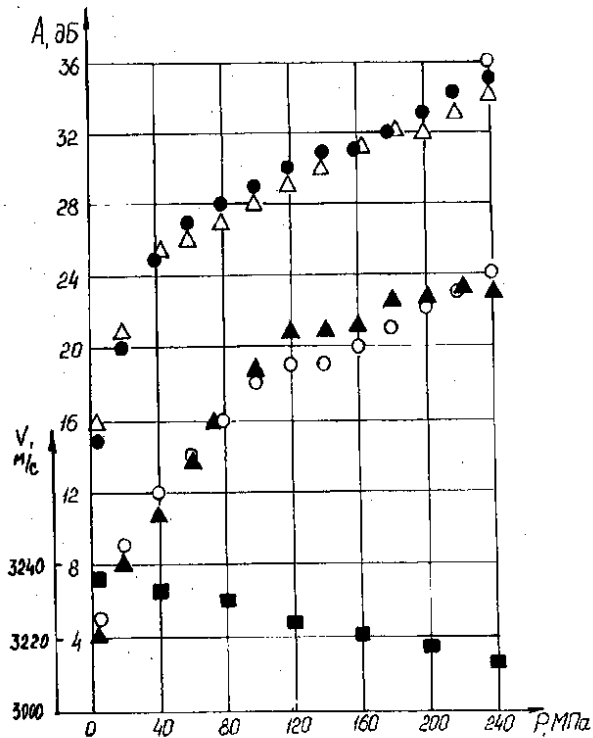


Рисунок 3.24 - Залежність амплітуди УЗК від величини контактного тиску при різних типах мастил (Δ - P-416, \bullet - графітно-гліцеринове, Δ - графіт) і без мастила (\circ)

Також були проведені експерименти по встановленню залежності між амплітудою УЗК і діаметральним натягом по стабілізуючому пояску. Обробка даних стандартним методом показала, що між амплітудою A УЗК і діаметральним натягом d існує кореляційний зв'язок, який також описується рівнянням регресії виду $A = 5.13 - 7.98d$. Найбільш тісний

зв'язок між амплітудою УЗК і діаметральним натягом та крутизна прямої регресії (рисунок 3.25) мають місце на частотах 2,5 та 5,0 МГц. Для цих частот з вірогідністю $P = 0,95$ обчислені довірчі інтервали величин натягу, визначені по даній методиці для зразків труб з натягами 0,3; 0,4 та 0,5 мм.

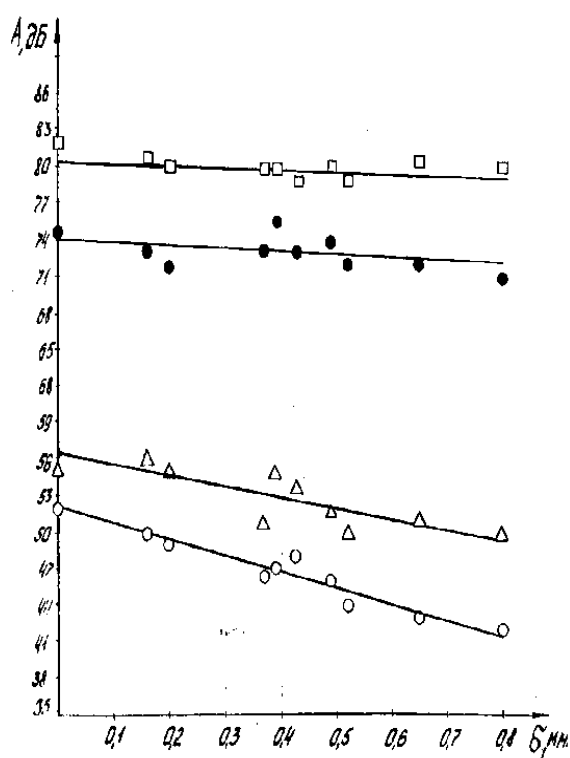


Рисунок 3.25 - Залежність амплітуди УЗК різних частот (○ - 5.0 МГц, △ - 2.5 МГц, ● - 1.25 МГц, □ - 0.6 МГц) від величини діаметрального натягу

Слід зауважити, що вимірювання контактного тиску акустичним методом є непрямыми (діаметральний натяг залежить від контактного тиску, величина якого оцінюється

по амплітуді УЗК), і його точність залежить від величини методичної, інструментальної та випадкової похибок. Методична похибка виникає внаслідок неточності метода вимірювання, і в даному випадку може бути обумовлена тим, що принципова схема вимірювання контактного тиску не забезпечує точного відтворення функціональної залежності, яка пов'язує вимірювану величину з тією, на яку реагує чутливий елемент (п'єзопластина), тобто з амплітудою ультразвукових коливань, залежною, в свою чергу, від якості акустичного контакту, шорсткості і форми контактуючих поверхонь, типу використовуваного мастила, частоти УЗК, схеми контролю. Причиною інструментальної похибки є неточність виготовлення п'єзоперетворювачів (кут призми та кривизна її випромінюючої поверхні) і з'єднання "труба - муфта", що впливає на інформаційний параметр (амплітуду УЗК). При визначенні інструментальної похибки необхідно також враховувати наступні фактори: старіння п'єзокераміки, яка є чутливим елементом; відсутність в дефектоскопі атенюатора, який дозволяв би плавно (з дискретністю порядку 0,1 дБ) послабити вхідний сигнал. Випадкова похибка виникає внаслідок суб'єктивності оцінки результатів вимірювань оператором в залежності від його індивідуальних якостей. Ця похибка заздалегідь невідома і тому не може бути оцінена, але її можна усунути або звести до мінімуму шляхом багатократного проведення вимірювань, а також застосуванням диференційних методів вимірювання амплітуди [87].

У процесі вимірювання контактного тиску акустичним методом мають місце всі вищенаведені похибки. Вони можуть набувати різних значень, тобто врахувати всі зміни, а тим більше повністю виключити їх вплив на результати вимірювань неможливо. Однак вплив систематичної похибки може бути усунений або зменшений за допомогою відомих прийомів або шляхом введення відповідних поправок. Відомо,

що для такого типу вимірювань вірогідність P , з якою встановлюється довірчий інтервал і яка відповідає подвоєній середньоквадратичній помилці не повинна перевищувати $P=0,95$. Проведена з такою вірогідністю оцінка точності вимірювання показала, що похибка вимірювання контактного тиску ультразвуковим методом не перевищує більше 7% [88].

За результатами статистичної обробки даних експериментальних досліджень отримані кореляційні залежності амплітуди A відбитих ультразвукових коливань від контактних тисків P_k на стику поверхонь з застосуванням мастила і без нього. Згадані залежності наведені на рисунку 3.26.

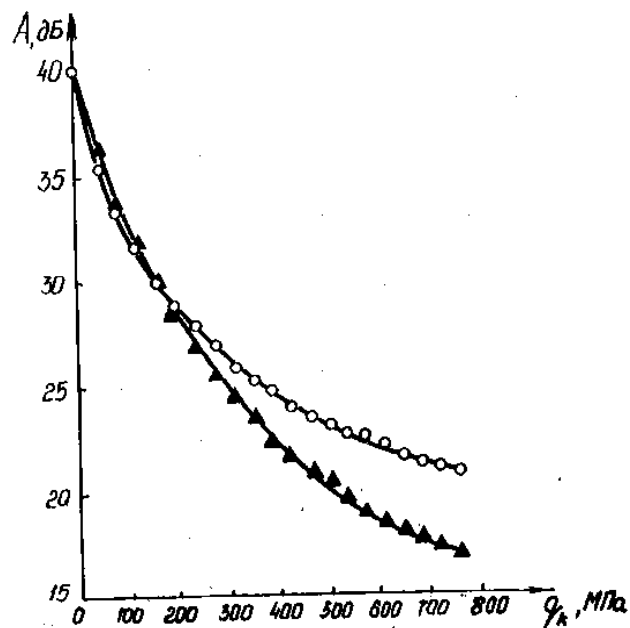


Рисунок 3.26 - Залежність амплітуди відбитих УЗК від контактних тисків при навантаженні без мастила (Δ) та з графітно-гліцеринним мастилом (\circ)

Обробка отриманих даних на ЕОМ дозволила підібрати математичні залежності, які найбільш задовільно описують одержані залежності $A=f(P_k)$ із застосуванням мастила і без нього. Для випадку застосування мастила залежність описується виразом $A = 56,67 - 5,45LnP_k$ при коефіцієнті парної кореляції $r=0,949$. За знятими профілограмами були виконані розрахунки параметру R_a , які наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Розрахунки параметру R_a

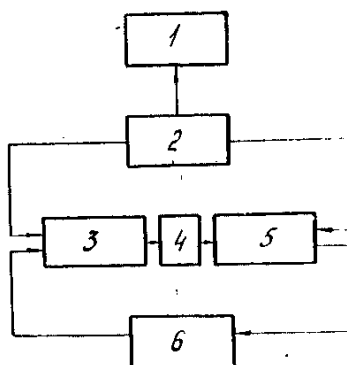
Кількість циклів навантаження	Параметри шорсткості R_a , мкм	
	зразок 1	зразок 2
0	2,54	2,60
100	2,42	2,09
200	1,76	2,19
300	1,91	2,29
400	1,73	2,13
500	1,81	2,06

Аналізуючи результати проведених експериментальних досліджень, можна зробити такі висновки:

- існує кореляційна залежність між амплітудою відбитих ультразвукових коливань та величиною контактних тисків на стику контактуючих поверхонь;
- мастило, яке вводиться в стик контактуючих поверхонь, суттєво впливає на характер залежності $A = f(P_k)$;
- параметр шорсткості R_a стабілізувався в процесі досліджень після двохсот навантажень, і до кінця досліджень зберігав середнє значення: для зразка 1 - $R_a = 1,8$ мкм, а для зразка 2 - $R_a = 2,06$ мкм (таблиця 3.3). Останнє добре узгоджується з ствердженням М.Б.Дьомкіна, про те, що на поверхнях тертя формується оптимальний самовідновлюючийся мікрорельєф, який відповідає стану

поверхневих шарів і процесам формування вторинних структур першого і другого типів.

Видається доцільним провести оцінку точності вимірювання діаметрального натягу, контактної тиску, фактичної площі дотику акустичним методом. Такого роду вимірювання, як відомо, відносяться до непрямих, і їх точність визначається методичною, інструментальною та випадковою похибками. Розглянемо узагальнену схему вимірювання (рисунок 3.27, 3.28), яка складається з гідравлічного пресу 2 зі стрілочним індикатором 1, випробувальних зразків 3 та 5, в яких розміщені випромінююча та приймаюча п'єзопластини (між випробувальними зразками існує шар контактної рідини 4), та ультразвукового дефектоскопа 6.

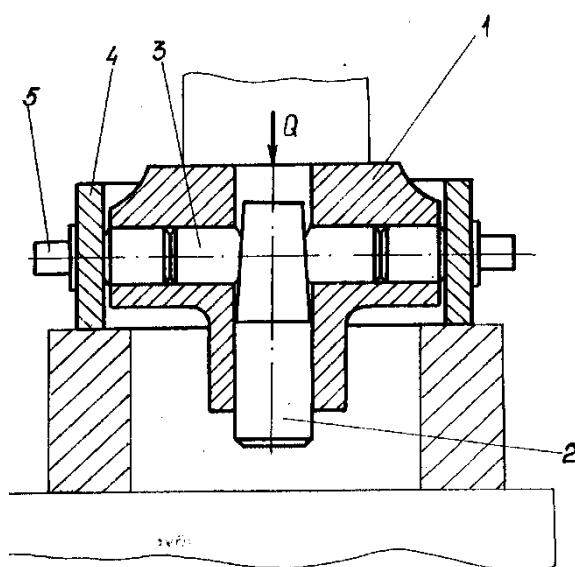


1 – стрілковий індикатор; 2 – гідравлічний прес; 3, 5 – випробувальні зразки; 4 – контактна рідина; 6 – ультразвуковий дефектоскоп

Рисунок 3.27 - Узагальнена схема вимірювання контактної тиску акустичним методом

Проаналізуємо згадані види похибок. Методична похибка є наслідком неточності методу вимірювання, і в

даному випадку може бути обумовлена тим, що принципова схема вимірювання контактної тиску не забезпечує точного відтворення функціональної залежності, пов'язуючої вимірювану величину з тією, на яку реагує чутливий елемент (п'єзопластина) – тобто з амплітудою ультразвукових коливань.



1 – корпус; 2 – плунжер; 3 – циліндричний палець;
4 – обойма; 5 – п'єзоперетворювачі

Рисунок 3.28 - Схема пристрою для моделювання контактних тисків в різьбових з'єднаннях

Амплітуда ультразвукових коливань залежить від якості акустичного контакту, шорсткості та кривизни контактуючих поверхонь та поверхні, з якої вводяться УЗК, контрольованого матеріалу, типу використовуваного мастила, частоти УЗК та схеми контролю. Причинами інструментальної похибки є неточність виготовлення п'єзоперетворювачів (кут призми, кривизна випромінюючої поверхні) і з'єднання “бурильна

труба – замок”, що впливає на інформаційний параметр (амплітуду УЗК). При визначенні інструментальної похибки необхідно також враховувати такі фактори: старіння п’єзокераміки, похибка послаблення вхідного сигналу атенюатором дефектоскопа і відсутність в дефектоскопі атенюатора, який дозволяє послабити вхідний сигнал до 0,1 дБ [89].

Випадкова похибка виникає внаслідок суб’єктивної оцінки результатів вимірювання оператором і залежить від його індивідуальних якостей. Вказана похибка невідома наперед і тому не може бути оціненою, але вона може бути усунена або зведена до мінімуму шляхом багатократного проведення вимірювань. В процесі вимірювань згадуваних параметрів присутні всі наведені похибки, числові значення яких бувають різними, врахувати всі їх зміни і повністю виключити неможливо. Але вплив систематичної похибки усувається за допомогою різних прийомів або введенням поправок. Точність при цьому буде визначатись ступенем вірогідності результатів вимірювань, яка оцінюється довірчою вірогідністю, середньоквадратичною помилкою або критеріями похибок, встановлених теорією помилок. Довірча вірогідність P , з якою встановлюється довірчий інтервал, відповідаюча подвоєній середньоквадратичній помилці $2B$, для подібного роду вимірювань не повинна перевищувати 0,95. Для вірогідності $P=0,95$, використовуючи дані обробки результатів експериментів на ЕОМ, за відомими виразами була проведена оцінка точності вимірювання контактного тиску і діаметрального натягу, в результаті якої було встановлено, що акустичним методом діаметральний натяг можна вимірювати з похибкою не більше 7%.

На основі одержаних результатів теоретичних та експериментальних досліджень були розроблені способи контролю міцності та герметичності різьбових з’єднань.

Дослідження з підвищення точності вимірювань контактного тиску в різьбових з'єднаннях акустичним методом

На сьогоднішній день для визначення контактних тисків застосовуються акустичні інформаційно-вимірювальні системи (АІВС), які використовують властивість ультразвукових коливань поширюватись в пружних середовищах і змінювати свої параметри залежно від параметрів середовища, яке контролюється [92]. Об'єкти вимірювання, п'єзоелектричні перетворювачі і решта субсистем АІВС перебувають під впливом внутрішніх і зовнішніх збурюючих факторів, а тому в таких системах виникають спотворення і неконтрольовані затримки вимірювальних сигналів, що призводить до дуже великих похибок вимірювань (50% і більше).

В теорії і практиці розробки АІВС відомі різні способи підвищення точності процесу вимірювання. Наприклад, щоб виключити внутрішні динамічні похибки в каналі "випромінювач - об'єкт вимірювання - приймач", застосовуються інверсні фільтри. Проте на даний час відсутні надійні й ефективні технічні засоби пригнічення неконтрольованих зовнішніх завад, якими у випадку вимірювання контактних тисків в різьбових з'єднаннях труб є: якість акустичного контакту, шорсткість спряжених поверхонь, неоднорідність хімічного і структурного складу матеріалів цих деталей, ступінь їх пружних і пластичних деформацій, наявність дефектів в контрольованих деталях, зміни температурного режиму різьбових з'єднань та інші [83].

З точки зору усунення зовнішніх завад при визначенні корисного сигналу можна було б використати смугові фільтри. Однак, як свідчить аналіз частотних діапазонів зовнішніх збурюючих впливів і корисних сигналів, ці діапазони перекриваються, і тому для покращання точності вимірювання корисного сигналу доцільно використовувати

методи цифрової обробки сигналів із застосуванням оптимальних алгоритмів.

Множина перелічених вище неконтрольованих випадкових впливів призводить до стохастичного характеру вихідного інформаційного сигналу АІВС. Тому намічену мету підвищення точності оцінки амплітуди ультразвукового сигналу (УЗС) під час контролю контактних тисків треба вирішувати за допомогою існуючих АІВС з використанням методів оптимальної фільтрації випадкових сигналів нестационарних процесів [92].

Конкретним завданням даного розділу є аналіз сучасних методів покращання оцінки вимірювальних параметрів і розробка способу оптимальної оцінки амплітуди УЗС під час контролю контактних тисків в різьбових з'єднаннях труб нафтового сортаменту.

В найпростішому випадку для оцінки амплітуди УЗС, що характеризує контактний тиск в процесі згвинчування труб, можна використовувати електричні залежності як результат статистичної обробки сукупності попередніх тестових вимірювань [93].

На підставі графіків середніх значень амплітуд m_l УЗС за умови репрезентативної вибірки реалізацій, що характеризують даний процес вимірювань, можна рекомендувати для інтерполяції оцінки амплітуди l^* УЗС таку залежність:

$$l^* = a \cdot e^{\alpha x} + b \cdot x \cdot \sin \beta(x - 10), \quad (3.59)$$

де: a та b - параметри, що підлягають визначенню на підставі конкретних тестових вимірювань (a - в міліметрах, b - безрозмірна величина); x - відлік в міліметрах на діаграмній стрічці, що відповідає кількості обертів; α, β - рекомендовані коефіцієнти, $\alpha = 8 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 0,146$.

Використовуючи як критерій точності апроксимації мінімум середньоквадратичної помилки, можна показати, що параметри a та b обчислюються за формулами

$$b = \frac{\sum m_i \psi \cdot \sum \psi \varphi - \sum m_i \varphi \cdot \sum \varphi^2}{(\sum \psi \varphi)^2 - \sum \psi^2 \cdot \sum \varphi^2}, \quad (3.60)$$

$$a = \frac{\sum m_i \psi - b \sum \psi \varphi}{\sum \psi^2}, \quad (3.61)$$

де $\psi = e^{0.008x}$ $\varphi = x \cdot \sin 0.146(x-10)$.

Зокрема, на підставі конкретних експериментальних даних одержана апроксимуюча функція

$$l^* = 12.86 \cdot e^{0.008x} + 0.3 \sin 0.146(x-10), \quad (3.62)$$

що має вигляд синусоїди, амплітуда якої зростає за експонентою.

Отриману емпіричну залежність (3.59) можна також використовувати для прогнозування оцінки амплітуди УЗС. Для цього на підставі деякої кількості попередніх значень амплітуд за формулами (3.60) і (3.61) визначаються параметри a та b . Наприклад, для конкретних експериментальних даних отримана апроксимуюча функція

$$Z(x) = 17.82 \cdot e^{0.008x} + 0.1976 \cdot x \cdot \sin 0.146(x-10), \quad (3.62)$$

яка з певною дисперсією згладжує дані на 10 відліках діаграмної стрічки. В подальшому залежність (3.62) можна використовувати для прогнозування значень амплітуд УЗС до кінця процесу згвинчування труб. Експериментальна перевірка підтвердила досить добре наближення прогнозованих за цим способом значень амплітуд до графіка зміни їх середніх значень m_l на вибірці реалізацій.

Така процедура відносно швидкого згладжування і прогнозування за формулою (3.62) мала б повністю влаштовувати спеціалістів з контролю різьбових з'єднань

труб, проте тут мають місце сильно зашумлені вимірювання. Тому процедуру прогнозування треба вдосконалити шляхом врахування інших статистичних характеристик випадкових збурюючих впливів як самого об'єкта контролю, так і вимірювальної апаратури [89].

На підставі отриманих експериментальних даних видно, що задачу підвищення точності оцінки і прогнозування контактних тисків можна розглядати як задачу статистичного відновлення сигналів, що недоступні безпосередньому вимірюванню.

З результатів експериментів щодо згвинчування сталевих обсадних труб випливає, що графіки як окремих реалізацій амплітуд УЗС, що записані на діаграмну стрічку, так і їх середніх значень із вибірки носять майже періодичний коливний характер. Однак, з точки зору отримання корисної інформації для спеціалістів з контролю якості згвинчування різьбових з'єднань труб, інтерес являють величини максимальних значень контактних тисків. Тому розглянемо послідовність максимальних значень амплітуд УЗС A_m . Ця послідовність має монотонний зростаючий характер. Її можна завжди апроксимувати такою залежністю:

$$A_m = A_n (1 - e^{-bl}), \quad (3.63)$$

де: A_n — параметр, що дорівнює граничному значенню A_m в кінці процесу згвинчування; b — параметр, який вибирається з умови мінімуму суми квадратів відхилень експериментальних значень A_m від апроксимованих значень A'_m для заданих відліків; l — просторова координата, значення якої визначається кількістю обертів (зростання l відповідає нагвинчуванню муфти на трубу).

При цьому

$$B = -\frac{\sum_{k=1}^n l_k y_k}{\sum_{k=1}^n l_k^2}, \quad (3.64)$$

де

$$y_k = l_n \frac{A_n - A_{mk}}{A_n}. \quad (3.65)$$

Залежність (3.63) можна інтерпретувати як розв'язок деякого лінійного диференціального рівняння першого порядку при стрибкоподібній зміні його правої частини. Таке диференціальне рівняння непрямым чином (через амплітуду УЗС) описує в першому наближенні зміну приросту контактних тисків за просторовою координатою l . Цілком очевидно, що зміна амплітуди УЗС на виході АІВС при постійній величині вхідних зондуючих сигналів залежить тільки від внутрішніх властивостей системи, які в даному випадку здебільшого визначаються величиною контактних тисків. Таким чином, припускається, що з точністю, необхідною для інженерних розрахунків, процес зміни величини контактних тисків за координатою l характеризується деяким постійним параметром B .

З урахуванням цього процес зміни амплітуди УЗС при визначенні контактних тисків в АІВС представимо гомоморфною моделлю (рисунок 3.29) у вигляді різницевого рівняння першого порядку

$$A_{k+1} = \varphi A_k + q_k, \quad (3.66)$$

де: A_k, A_{k+1} — значення амплітуди радіоімпульсу на k -му та $(k+1)$ відліках, мкВ; φ — коефіцієнт, що залежить від параметра B і періоду дискретизації координати l , тобто проміжку h , через який здійснюються відліки значень амплітуди радіоімпульсу; q_k — незалежна випадкова

послідовність типу гаусового білого шуму з відомою дисперсією σ_{qk}^2 , мкВ² і нульовим математичним очікуванням.

Коефіцієнт j для заданого періоду дискретизації h можна розрахувати за відомим способом визначення матричної експоненти при квантуванні неперервних систем

$$\varphi \approx 1 - hB \quad (3.67)$$

Для математичного опису процес акустичного визначення контактних тисків був представлений у вигляді еквівалентної моделі, що зображена на рисунк 3.29. Тут АІВС розглядається як послідовне з'єднання динамічної (ДС) і вимірювальної (ВС) систем, які взаємодіють між собою у відповідності з прийнятою схемою акустичного контролю.

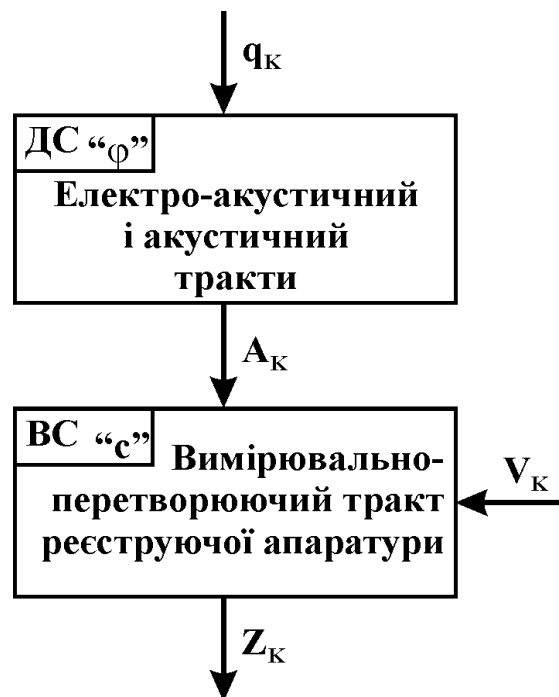


Рисунок 3.29 – Еквівалентна модель АІВС визначення

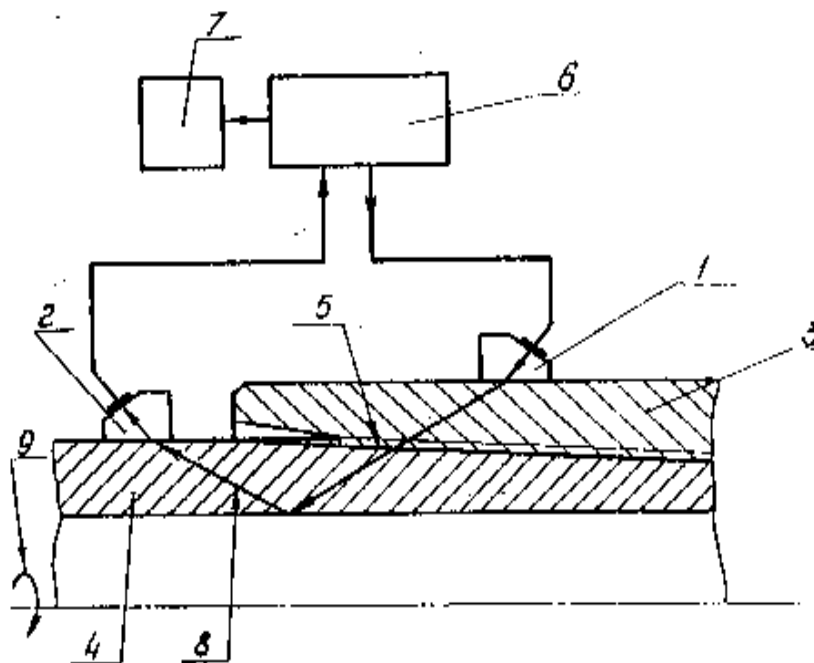
Експериментально встановлено, що амплітуда УЗС Z_k має випадковий характер, тобто є випадковою функцією кількості обертів або просторової координати l , і її закон розподілу практично співпадає з нормальним, або Гаусовим, законом розподілу (рисунок 3.30). В процесі експерименту на кожному з трьох попередньо прокаліброваних з'єднань по 18 разів зі сталою швидкістю було здійснено згвинчування та роззгвинчування різьбового з'єднання зі зміною крутного моменту від 0 до 24 кН*м (оптимальний крутний момент для даного типу з'єднання становить 15,2 кН*м). Рівномірність згвинчування та необхідний крутний момент згвинчування забезпечувався технічними можливостями стенда РСТ. Амплітуда УЗС, пропорційна зміні контактного тиску (крутного моменту, кількості обертів) після її обробки та перетворення в аналоговий сигнал 0-4 В записувалась на діаграмній стрічці. Всі вимірювання здійснювались за допомогою апаратури, яка входить в комплект установки для контролю якості згвинчування УКС-1 [94]. Одержана залежність показана на рисунку 3.31.

Експериментально встановлено, що амплітуда УЗС Z_k (рисунок 3.32) має випадковий характер, тобто є випадковою функцією кількості обертів або просторової координати l , і її закон розподілу практично збігається з нормальним (гаусовим) законом розподілу.

За допомогою дефектоскопа УД2-12 і підключеного до нього самопишучого приладу Н3091 були виміряні і записані на діаграмну стрічку зміни контактних тисків в різьбовому з'єднанні обсадних труб ОТТМ умовним діаметром 245 мм в процесі їх згвинчування на стенді РСТ. В таблиці 3.4 наведені значення амплітуди УЗС для двох реалізацій останніх одинадцяти відліків процесу згвинчування труб.

У процесі статистичної обробки цього експериментального матеріалу вищеописаним способом для

конкретного різьбового з'єднання були одержані параметр $B = 8,946 \cdot 10^{-3}$, коефіцієнт $j = 0,955$, а також послідовності емпіричних значень дисперсій σ_q^2 , які наведені в тій же таблиці. Одержані результати підтверджують можливість використання обчислювальної процедури фільтра Калмана для підвищення точності вимірювання контактної тиску акустичним методом [87].



1 – ПЕП-випромінювач; 2 – ПЕП-приймач; 3 – муфта; 4 – труба; 5 – поверхня спряження; 6 – дефектоскоп; 7 – самописець; 8 – хід центрального променя; 9 – напрям обертання труби

Рисунок 3.30 – Схема проведення експерименту щодо зняття залежності між амплітудою УЗС та контактним тиском

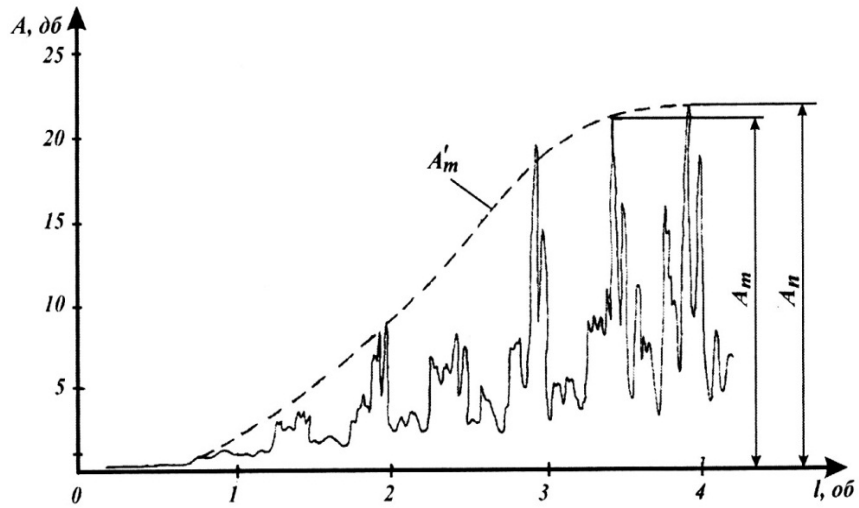


Рисунок 3.31 – Залежність амплітуди УЗС від величини контактного тиску

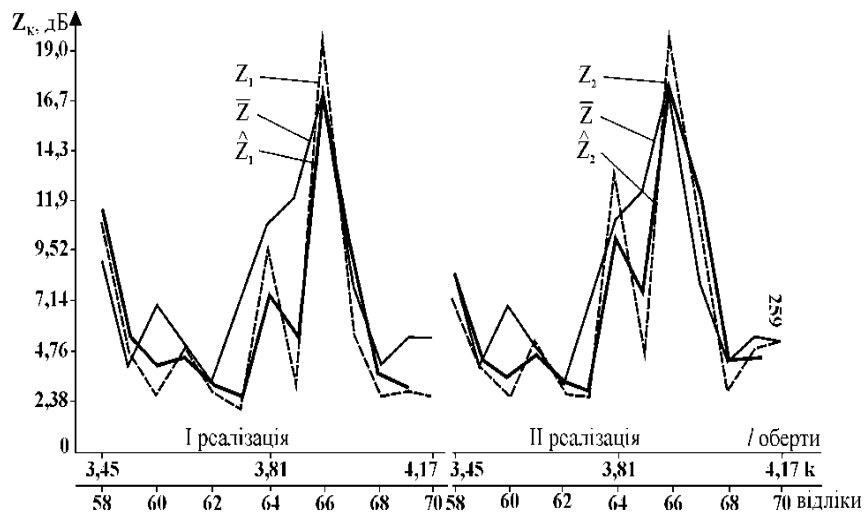


Рисунок 3.32 — Ілюстрація процедури цифрової фільтрації амплітуд УЗК на прикладі двох реалізацій

Таблиця 3.4 - Значення амплітуди УЗК при проходженні через різьбове з'єднання СОТ діаметром 245 мм

Номер відліку	Значення параметрів			
	Z_1 , дБ	Z_2 , дБ	σ_q^2 , дБ ²	σ_v^2 , дБ ²
69	4,76	4,05	1,53	0,95
60	2,62	2,74	4,49	7,62
61	4,89	5,24	2,32	2,64
62	2,86	2,86	0,95	1,38
63	1,90	2,62	4,90	6,80
64	9,65	13,45	10,79	5,80
65	19,99	4,76	13,78	21,95
66	5,71	19,99	26,92	9,42
67	2,74	10,47	5,78	6,65
68	2,86	2,86	1,53	1,02
69	5.0	2,69	2,69	1,79

Якщо представити ефект впливу всіх випадкових збурюючих факторів на амплітуду радіоімпульсу A_k у вигляді сумарної завади q_k , яка називається шумом об'єкта контролю, то можна одержати рівняння (3.66). Тобто можна припустити, що зміна амплітуди радіоімпульсу відбувається тільки під впливом адитивної випадкової послідовності q_k , оскільки зондуючий вхідний сигнал весь час залишається постійним, і ефект від його впливу враховується коефіцієнтом j . Беручи до уваги дискретний характер процесу акустичного контролю, доречно модель процесу представляти у вигляді різницевого рівняння, а випадкову функцію q розглядати як випадкову послідовність q_k типу гаусового білого шуму.

Для отримання повної моделі АІВС в просторі станів необхідно мати математичний опис вимірювальної системи (рисунок 3.29), який можна представити у вигляді лінійної комбінації змінної стану A_k і завади V_k

$$Z_k = CA_k + V_k, \quad (3.68)$$

де: Z_k — вихідне значення сигналу реєструючої апаратури, дБ; C — розмірний коефіцієнт, дБ/мкВ; V_k — незалежна випадкова послідовність, яка є шумом вимірювальної реєструючої апаратури типу гаусового білого шуму з відомою дисперсією $\sigma_{v_k}^2$, дБ², і нульовим математичним очікуванням.

У підсумку отримуємо повну модель в просторі станів, в якій описується перехідний процес за просторовою координатою l , а коефіцієнт j переходу з одного стану A_k в другий стан A_{k+1} залежить від параметра B , що визначається вищезазначеним способом.

Стосовно одержаної моделі (3.67), (3.67) можна записати структуру і параметри калманівського оптимального дискретного цифрового фільтру:

$$\begin{aligned} A_k &= \varphi A_{k-1} + S_k (Z_k - C\varphi A_{k-1}), \\ S_k &= \eta_{k,k-1} * C^{-1} (\eta_{k,k-1} + \sigma^2 V_k)^{-1}, \\ \eta_{k,k-1} &= \eta_{k,k-1} + \sigma^2 q_k, \\ \eta_{k,k} &= \eta_{k,k-1} - S_k * C * \eta_{k,k-1}. \end{aligned} \quad (3.69)$$

де: A_k, A_{k-1} — оцінка амплітуди радіоімпульсу на k -му та $(k-1)$ -му відліках; S_k — коефіцієнт кореляції помилки фільтрації; $\eta_{k,k-1}$; $\eta_{k,k}$; $\eta_{k-1,k-1}$ — помилка фільтрації у перехідному стані для k -го та $(k-1)$ -го відліків.

Після деяких перетворень з урахуванням того, що $CA_k = Z_k$ та $CA_{k-1} = Z_{k-1}$, рівняння оптимального фільтра набувають вигляду:

$$Z_k = \varphi \left(1 - \frac{\eta_{k,k-1}}{\eta_{k,k-1} + \sigma^2 V_k} \right) * Z_k + \frac{\eta_{k,k-1} \eta_{k,k-1}}{\eta_{k,k-1} + \sigma^2 V_k},$$

$$\eta_{k,k-1} = \eta_{k-1,k-1} + \sigma^2 q_k . \quad (3.70)$$

В результаті виконання рекурентної обчислювальної процедури (3.70) на кожному відліці k значення амплітуди Z_k (дБ) УЗС коректується з урахуванням статистичних характеристик $\sigma_{q_k}^2$, $\sigma_{v_k}^2$ неконтрольованих випадкових збурюючих впливів. Причому отриманий алгоритм має оптимальну структуру в розумінні мінімуму середньоквадратичної помилки оцінки амплітуди УЗС.

В кожному конкретному випадку реалізації фільтра необхідно задавати початкову оцінку амплітуди Z_0 , початкову помилку фільтрації η_{00} , а також послідовності дисперсій $\sigma_{q_k}^2$, $\sigma_{v_k}^2$.

Підвищення точності оцінки амплітуди УЗС при визначенні контактних тисків за допомогою розглянутого оптимального фільтра суттєво залежить від достовірності визначення параметра B , а також дисперсій шумів об'єкта контролю і шумів вимірювальної та реєструючої апаратури. Останні можуть бути і постійними, що спрощує обчислювальний процес.

Таким чином, в результаті проведення досліджень, одержані такі результати:

1. Вперше обґрунтована з точки зору неруйнівного контролю і здійснена класифікація різьбових з'єднань трубних колон за конструктивними й функціональними ознаками. Завдяки такій класифікації будь-яке з різьбове з'єднання можна представити як комбінацію типових елементів, для кожного з яких може бути розроблена типова методика контролю. Це створює умови для агрегування методик і зменшення кількості зразків для настроювання.

2. Підтверджено можливість використання нових інформативних ознак оцінки якості різьбових з'єднань:

- рівня напружень (деформацій) в тілі замка (муфти);
- фактичної площі дотику в елементах різьбового з'єднання;
- контактного тиску в різьбових з'єднаннях.

3. Встановлений взаємозв'язок між характеристиками, що визначають якість різьбових з'єднань, та параметрами акустичного методу контролю. Похибка акустичного методу контролю якості різьбових з'єднань не перевищує 8%.

4. На основі одержаних аналітичних виразів розроблені нові і вдосконалені існуючі способи контролю якості діаметральних та торцевих ущільнень типу “метал – метал”, а також технічні засоби, необхідні для реалізації цих способів. Все це забезпечує можливість контролю нових типів різьбових з'єднань, для яких якість додаткових ущільнень є безпосередньою умовою ефективного функціонування.

5. Вперше розроблений, технічно забезпечений і практично реалізований спосіб акустичного контролю всіх типорозмірів замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб, який суттєво зменшив непродуктивні витрати часу в процесі спуско-підймальних операцій та підвищив безпеку виконання робіт.

6. Підтверджена можливість використання обчислювальної процедури оптимальної фільтрації Калмана для підвищення точності визначення контактного тиску в різьбових з'єднаннях акустичним методом.

7. На основі сучасних підходів до вирішення проблем якості сформульовані вимоги до проведення неруйнівного контролю й розроблені технології проведення контролю різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту, реалізовані в ГСТУ 320.02829777.002-95 “Інструкція по проведенню неруйнівного контролю труб нафтового сортаменту в процесі їх експлуатації” та технічних умовах, пов'язаних з наданням послуг з неруйнівного контролю.

3.4 Контроль напружено-деформованого стану

Напружений стан трубопроводів при діагностуванні зручно розглядати як суму технологічних напружень. Основними з цих напружень є:

- залишкові зварювальні напруження $\sigma_{зв}$;
- робочі напруження, які викликані виконанням конструкцією свого функціонального призначення, $\sigma_{роб}$;
- експлуатаційні напруження, які виникають під дією різних непередбачених факторів у процесі експлуатації конструкції, наприклад, у результаті просідання землі $\sigma_{екс}$.

Сумарні напруження

$$\sigma = \sigma_{зв} + \sigma_{роб} + \sigma_{екс}. \quad (3.71)$$

Якщо робочі напруження досить повно враховуються під час проектування конструкції, то технологічні і експлуатаційні напруження, як правило, не враховуються. У той час саме вони визначають працездатність конструкції. Діагностика напруженого стану трубопроводу у зв'язку з цим повинна бути направлена в першу чергу на визначення особливостей розподілу і зміни технологічних і експлуатаційних напружень.

Технологічні напруження виникають як наслідок нерівномірної пластичної деформації в окремих зонах конструкції, і, в першу чергу, в зварних з'єднаннях. Існування залишкових зварних напружень зв'язано з наявністю напружених зон, у цих зонах максимальний рівень напружень розтягу може досягати границі міцності.

Схему формування напруженого стану трубопроводу можна представити у такому взаємозв'язку (рисунок 3.33)

З метою обліку технологічних напружень необхідно визначити найбільш напружені зони конструкції. Для реалізації цієї задачі необхідно виміряти сумарні напруження на всій поверхні конструкції і побудувати топографію

напруженого стану, тобто графічне відображення розподілу напружень на поверхні. Технологічні напруження проявляються у вигляді появи локальних зон, рівень напружень в яких перевищує рівень напружень у сусідніх ділянках. Рівень визначається для даного класу конструкцій галузевою нормативною документацією. У випадку відсутності нормативних документів допустимі напруження для прийняття рішення про можливість безаварійної експлуатації можуть бути визначені, виходячи з досвіду діагностики напруженого стану.

Виконується це таким чином. Якщо рівень напружень у напружених зонах у 1,5 рази вище рівня напружень в основній частині конструкцій – при проведенні вимірювань при робочому тиску або рівень напружень у напружених зонах перевищує 40 % від межі плинності – при проведенні вимірювань без робочого тиску, то необхідно використати методи зниження технологічних (залишкових зварювальних) напружень на цих ділянках. Такий підхід забезпечує рівень сумарних напружень, як правило, не вище $0,8 \sigma_{пл}$ ($\sigma_{пл}$ – границя плинності матеріалу, який контролюється).

Причинами виникнення експлуатаційних напружень може бути просідання свайної основи, фундаменту обв'язки трубопроводів, зміна геометрії конструкції (магістральні трубопроводи на заболочених ділянках). У результаті з'являються згинаючі моменти.

Характерною ознакою виникнення експлуатаційних напружень є поява асиметрії розподілу і зміна рівня напружень у часі. Виявляти такі зміни зручно шляхом відображення характеру поздовжніх (відносно осі стінок) напружень у поперечному перерізі конструкції – на кільцевих опорах [86]. Для встановлення причин виникнення експлуатаційних напружень необхідно визначити характер навантажень, які їх викликають.

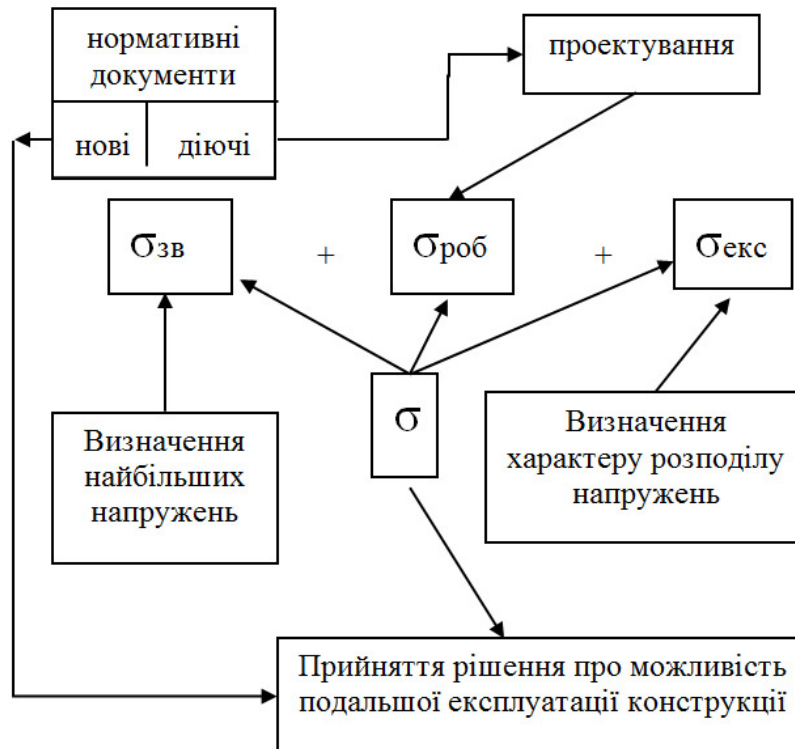


Рисунок 3.33 – Взаємозв'язок складових напруженого стану трубопроводу

Підготовку до діагностики напруженого стану трубопроводів починають із зовнішнього огляду (для наземних трубопроводів) і ознайомлення з технічною документацією. У результаті підготовки визначають найбільш небезпечні ділянки:

- переходи через річки;
- заболочені ділянки;
- ділянки, на яких ґрунт просідає або сповзає;
- переходи через автомобільні і залізничні дороги.

Діагностика напруженого стану трубопроводів базується на визначенні характеру експлуатаційних навантажень і рівня технологічних напружень у кільцевих монтажних швах і в основному металі.

Характер експлуатаційних навантажень визначається шляхом побудови кільцевих епюр поздовжніх, відносно осі труби напружень на небезпечних ділянках. Попередньо на небезпечних ділянках копають шурфи. Бажано проводити вимірювання в 8 точках поперечного перерізу, які рівномірно розподілені по колу. Досвід діагностики напруженого стану показав, що найбільш поширеними є згин або згин із розтягом.

Для ліквідації причин, які викликають появу технологічних напружень, необхідно розвантажити трубопровід, забезпечити йому можливість вільно деформуватися.

Діагностування напруженого стану трубопроводу дозволяє приймати рішення про проведення ремонтних робіт на трубопроводах і попередження аварійних ситуацій на об'єктах.

Практично важливому додатку нелінійної динамічної теорії пружності, який грає суттєву роль при неруйнівному контролі міцності - проблемі розповсюдження пружних хвиль в напружено-деформованих тілах - присвячена велика кількість досліджень [95, 96]. Але практично всі вони обмежуються розглядом однорідних навантажень, що в ряді випадків відповідає значному спрощенню та ідеалізації практичних задач. Природно, що актуальним кроком в нелінійній динамічній теорії пружності, яка розвивається досить швидко, є дослідження особливостей розповсюдження хвиль в неоднорідно деформованих тілах.

Один з підходів до дослідження розповсюдження хвиль в тілах з неоднорідними початковими напруженнями досліджено в роботах Е.В. Зароченцева, С.М. Орла та

Ю.С.Степанчука [97], зокрема одержано рівняння розповсюдження пружних хвиль малої амплітуди в неоднорідно деформованих кристалах, і на його основі, як частковий випадок, розглянута задача про розповсюдження плоскої хвилі в неоднорідно деформованому ізотропному стержні. В даному розділі здійснений подальший розвиток зазначеного підходу для випадку плоских та просторових задач для високочастотних пружних хвиль в ізотропних тілах. Можливість застосування променевої теорії для випадку початкових напружень, які описуються функціями обмеженого зростання розглянемо на прикладі моделі пружного анізотропного середовища (рисунок 3.6).

Виходячи з раніше одержаних результатів [97], (формули 3.6, 37), наведемо скорочений вивід рівняння руху хвилі малої амплітуди в неоднорідно напруженому середовищі. Для цього спершу розглянемо пружні сталі неоднорідно напруженого середовища. Термодинамічний потенціал одиниці маси $W(x)$ з густиною ρ (в ізотермічних процесах W - вільна енергія F , в адіабатичних - внутрішня енергія U) може бути представлена розкладом:

$$\begin{aligned} \rho(\bar{X})W(X) = \rho(\bar{X})W(\bar{X}, \bar{n}) = \rho(\bar{X})W(\bar{X}, 0) + \\ + t_{ij}(\bar{X})n_{ij} + \frac{1}{2}C_{ijkl}(\bar{X})n_{ij}n_{kl} + \dots \end{aligned} \quad (3.72)$$

де пружні сталі визначаються виразом

$$C_{ijkl}(\bar{X}) = \rho(\bar{X}) \left[\frac{\partial^{(r)} W(X)}{\partial n_{ij} \cdot \partial n_{kl} \dots} \right]_{\bar{n}=0} \quad (3.73)$$

а $t_{ij}(X)$ - компоненти напруження в стані $\{X\}$. Пружні сталі для станів $\{X\}$ та $\{x\}$ визначаються аналогічно. Розклад термодинамічного потенціала, подібно до (3.72), можна здійснити по деформаціях η або n :

$$\rho(\bar{X})W(x) = \rho(\bar{X})W(\bar{X}, 0) + t_{ij}(X)n_{ij} + \frac{1}{2}C_{ijkl}(\bar{X})n_{ij}n_{kl} + \dots \quad (3.74)$$

$$\rho(X)W(x) = \rho(X)W(X,0) + t_{ij}(X)n'_{ij} + \frac{1}{2}C_{ijkl}(X)n'_{ij}n'_{kl} + \dots \quad (3.75)$$

В стані $\{X\}$, який характеризує ненапружене ідеальне середовище, тензор напружень $t_{ij}(X)$ дорівнює нулю, а $C_{ijkl}(X)$ та $\rho(X)$ сталі по всьому об'єму. Надалі ці величини будуть позначатись C^0_{ijkl} та ρ^0 . Використовуючи загальне визначення пружних сталей (3.74), а також співвідношення

$$\eta_{mn} = \left(n'_{ij} + \frac{1}{2}\delta_{ij} \right) a_{im}a_{jn} - \frac{1}{2}\delta_{mn} \quad (3.76)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial n_{ij}} = a_{im}a_{jn} \quad (3.77)$$

пружні сталі $C_{ijkl}(X)$ з (3.75) можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} C_{ijkl}(X) &= \rho(X) \left[\frac{\partial^{(r)} W(x)}{\partial n'_{ij} \partial n'_{kl} \dots} \right] = \\ &= I^{-1} a_{im} a_{jn} a_{kp} a_{lq} \dots \left[\rho^0 \frac{\partial^{(r)} W(x)}{\partial \eta_{mn} \partial \eta_{pq} \dots} \right]_{\bar{\eta} = \bar{n}} \end{aligned} \quad (3.78)$$

де

$$I = \rho^0 / \rho(x) = \det |a_{ij}| \quad (3.79)$$

$$I = 1 - n_{ij} + \dots \quad (3.80)$$

З цього можна одержати вираз для констант пружності другого порядку в неоднорідному напруженому середовищі в лінійному наближенні по дисторсіях U_{mn} :

$$C_{ijkl}(X) = C^0_{ijkl} U_{mn} \left(C^0_{nykl} \delta_{im} + C^0_{inkl} \delta_{jm} + C^0_{ijnl} \delta_{km} + \right. \\ \left. + C^0_{ijkn} \delta_{lm} - C^0_{ijkl} \delta_{mn} + C^0_{ijklmn} \right) \quad (3.81)$$

Аналогічно можуть бути одержані вирази для пружних констант вищих порядків. З (3.81) випливає, що пружні властивості однорідного, але неоднорідно деформованого середовища можуть змінюватись від точки до точки, і залежність їх від місцезрешування точки визначається відповідними ком-понентами неоднорідного тензора дисторсій U_{mn} . Показано [97], що за рахунок значної величини констант пружності третього порядку, які в загальному випадку на порядок більші за константи другого порядку, при $U_{mn} \sim 10^{-2}$ їх зміна може досягати 10%. У випадку, коли U_{mn} мають незначну величину і ними можна знехтувати, $C_{ijkl}(X) = C_{ijkl}^0$.

Перейдемо до виводу рівняння руху в зручному для подальшого використання вигляді. Нехай пружне тіло, зазначаючи пружної деформації, переходить з ідеального ненапруженого стану $\{X\}$ (рисунок 3.6) в статичний стан $\{X\}$. Стан $\{x\}$ відрізняється від стану $\{X\}$ малими динамічними пружними деформаціями, які виникають внаслідок розповсюдження пружних хвиль. Пружні деформації, що переводять стан $\{X\}$ в $\{x\}$, будемо вважати відомими.

Рівняння руху в стані $\{x\}$ має вигляд:

$$\rho(x)\ddot{x}_i = \frac{\partial t_{ij}(x)}{\partial x_j} + \rho(x)f_i \quad (3.82)$$

де f_i - компоненти об'ємної сили. Напруження, відповідно до рівняння стану, яке має такий же вигляд, як і при однорідних деформаціях [98]

$$t_{ij}(x) = \rho(x)a_{im}a_{jn} \left[\frac{\partial W(x)}{\partial n_{mn}} \right] \quad (3.83)$$

можуть бути також записані для стану $\{x\}$:

$$t_{ij}(x) = \frac{\rho(x)}{I'} a'_{iq} a'_{jp} \left[\frac{\partial W(x)}{\partial n'_{qp}} \right], \quad (3.84)$$

де

$$I' = \rho^o / \rho(x) = \det|\alpha_{ij}|. \quad (3.85)$$

За допомогою відомих співвідношень [25, 197]

$$\partial(a'_{ij} / I') \partial x_i = 0; \quad (3.86)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} = \gamma'_{ki} \frac{\partial}{\partial X_k}, \quad (3.87)$$

де

$$\gamma'_{ki} = \frac{\partial X_k}{\partial x_i}; \quad (3.88)$$

$$\gamma'_{ij} a'_{jk} = \delta_{ik}, \quad (3.89)$$

одержуємо рівняння

$$\frac{\partial t_{ij}(x)}{\partial x_j} = \frac{1}{I'} \left(\frac{\partial}{\partial X_p} \right) \left[\left(\rho(X) \frac{\partial W(x)}{\partial n'_{qp}} \right) a'_{iq} \right]. \quad (3.90)$$

Враховуючи розклад (3.77), похідну (3.90), лінеаризовану до другого порядку по $\omega_{ik} = \delta(x_i - X_i) / \delta X_k$, можна представити у вигляді [97]

$$\frac{\partial t_{ij}(x)}{\partial x_j} = \frac{1}{I'} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial t_{ip}}{\partial X_p} + \omega_{mn} \left[\frac{\partial t_{np}(X)}{\partial X_p} \delta_{im} + \frac{\partial}{\partial X_p} C_{ipmn}(X) \right] + \\ \frac{\partial a'_{mn}}{\partial X_p} [t_{np}(x) \delta_{im} + C_{ipmn}(X)] + \frac{\partial a'_{mn}}{\partial X_p} \omega_{st} \times \\ \times \left[\begin{array}{l} C_{npst}(X) \delta_{im} + C_{ipnt}(X) \delta_{ms} + \\ + C_{ipmn}(X) \delta_{is} + C_{ipmnst}(X) \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (3.91)$$

Підставивши одержаний результат у (3.82), домножимо обидві частини результуючого рівняння на I' , враховуючи рівняння рівноваги

$$\frac{\partial t_{ij}(x)}{\partial x_j} + \rho(X)f_i = 0 \quad (3.92)$$

одержуємо:

$$\begin{aligned} \rho(X)\ddot{x}_i &= \frac{\partial^2 \omega_m}{\partial X_p \partial X_n} A_{ipmn}(X) + \frac{\partial \omega_m}{\partial X_n} \frac{\partial}{\partial X_p} \times \\ &\times \left[A_{ipmn}(X) + \frac{\partial^2 \omega_m}{\partial X_p \partial X_n} \frac{\partial \omega_s}{\partial X_i} A_{ipmnst}(X) \right] \end{aligned} \quad (3.93)$$

де

$$A_{ipmn}(X) = t_{np}(X)\delta_{im} + C_{impn}(X) \quad (3.94)$$

$$A_{impnst}(X) = C_{npst}(X)\delta_{im} + C_{ipnt}(X)\delta_{ms} + C_{tpmn}(X)\delta_{is} + C_{ipmnst}(X) \quad (3.95)$$

Для приведення рівнянь руху (3.93) до кінцевого вигляду необхідно записати всі величини в координатах ненапруженого стану $\{X\}$. Це дасть можливість одержати диференціальні рівняння в часткових похідних відносно шуканих динамічних переміщень ω_j , які включають ідеальні константи пружності і неоднорідні початкові переміщення U_j ,

які вважаємо відомими. Для цього спершу за допомогою співвідношень (3.86), (3.87) запишемо допоміжні рівняння:

$$\omega_{mn} = \frac{\partial \omega_n}{\partial X_n} = \frac{\partial \bar{X}_g}{\partial X_n} \frac{\partial \omega_n}{\partial \bar{X}_g} = Y_{gn} \omega'_{mg} \quad (3.96)$$

$$\frac{\partial \alpha'_{mn}}{\partial X_n} = Y_{jp} \left[Y_{gn} \frac{\partial d_{mg}}{\partial \bar{X}_j} - Y_{gk} Y_{sn} \frac{\partial d_{mg}}{\partial \bar{X}_j} \alpha_{mg} \right] \quad (3.97)$$

за допомогою яких, а також з урахуванням співвідношень (3.78), (3.83), (3.86), (3.87) отримаємо кінцеве рівняння [46]:

$$\rho^0 \omega_i = \frac{\partial^2 \omega_m}{\partial \bar{X}_g \partial \bar{X}_p} \left\{ C_{iqmp}^0 + \frac{\partial U_s}{\partial X_t} A_{iqmpst}^0 \right\} + \frac{\partial \omega_s}{\partial X_t} \frac{\partial^2 U_s}{\partial \bar{X}_g \partial \bar{X}_p} A_{iqmpst}^0 \quad (3.98)$$

$$A_{ijklpq}^0 = C_{jlpq}^0 \delta_{ik} + C_{ijpq}^0 \delta_{kp} + \quad (3.99)$$

У випадку відсутності неоднорідних дисторсій U_{mn} рівняння (3.98) переходить в рівняння генерації гармонік для ідеального ненапруженого кристалу [97]. Для однорідних деформацій одержуємо рівняння, подібне до рівняння генерації гармонік для однорідно напруженого кристалу з перенормованим, але сталим коефіцієнтом при першому члені. Другий доданок в цих часткових випадках дорівнює нулю.

Для переходу від рівняння (3.98), записаного для загального випадку анізотропії, до відповідного рівняння для випадку ізотропного середовища, який буде розглянутий

нижче, скористаємось виразами для тензора пружних сталих другого порядку [86]

$$C_{klmn} = \lambda \delta_{kl} \delta_{mn} + \mu (\delta_{km} \delta_{ln} + \delta_{kn} \delta_{lm}) \quad (3.100)$$

і тензора пружних сталих третього порядку

$$\delta_{lr} \delta_{ns} + \delta_{ls} \delta_{nr} \quad (3.101)$$

де λ та μ - сталі Ламе; ν_1, ν_2, ν_3 , - вибрані згідно з Тупіним та Бернштейном в якості незалежних модулів пружності третього порядку (в позначеннях Фойгта C_{123} , C_{144} та C_{456} відповідно) [99].

З урахуванням формул (3.100), (3.101) рівняння (3.98) приводиться до вигляду:

$$\rho^0 \left(\ddot{\omega}_1 = \mu^* \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial X_2^2} + \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial X_3^2} \right) +$$

$$[(\lambda + \mu)]^* \frac{\partial}{\partial X_1} \left(\frac{\partial \omega_1}{\partial X_1} + \frac{\partial \omega_2}{\partial X_2} + \frac{\partial \omega_3}{\partial X_3} \right) + \varepsilon_1 = 0 \quad (3.102)$$

$$\rho^0 \left(\ddot{\omega}_2 = \mu^* \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial X_2^2} + \frac{\partial^2 \omega_2}{\partial X_3^2} \right) +$$

$$[(\lambda + \mu)]^* \frac{\partial}{\partial X_2} \left(\frac{\partial \omega_1}{\partial X_1} + \frac{\partial \omega_2}{\partial X_2} + \frac{\partial \omega_3}{\partial X_3} \right) + \varepsilon_2 = 0 \quad (3.103)$$

$$\rho^0 \left(\ddot{\omega}_3 = \mu^* \frac{\partial^2 \omega_3}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 \omega_3}{\partial X_2^2} + \frac{\partial^2 \omega_3}{\partial X_3^2} \right) +$$

$$([\lambda + \mu]^* \frac{\partial}{\partial X_3} \left(\frac{\partial \omega_1}{\partial X_1} + \frac{\partial \omega_2}{\partial X_2} + \frac{\partial \omega_3}{\partial X_3} \right) + \varepsilon_3 = 0 \quad (3.104)$$

де μ^* та $(\lambda + \mu)^*$ - усереднені ефективні значення констант пружності, що визначаються виразами:

$$\mu^* = \mu + \frac{\partial U_1}{\partial X_1} (\lambda + 2\mu + \nu_2 + 2\nu_3) +$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial X_2} \left(\frac{\nu_1 + \nu_2 + 2(\nu_2 + \nu_3)}{3} \right) + \frac{\partial U_3}{\partial X_3} (\nu_2 + \nu_3) \quad (3.105)$$

$$(\lambda + \mu)^* = \lambda + \mu + \frac{\partial U_1}{\partial X_1} \left(\frac{4\lambda + 6\mu + 3\nu_1 + 9\nu_2 + 10\nu_3}{3} \right) + \frac{\partial U_2}{\partial X_2} \left(\frac{2\lambda + \mu + 2\nu_1 + 5\nu_2 + 2\nu_3}{3} \right) \quad (3.106)$$

а величини ε_1 , ε_2 , ε_3 визначаються виразом

$$\frac{\partial \omega_s}{\partial X_t} \frac{\partial^2 U_m}{\partial X_q \partial X_p} = A_{iqmpst}^0 \quad (3.107)$$

при $i = 1, 2, 3$ відповідно. Як показав аналіз рівняння (3.98) для випадку плоскої хвилі і початкового переміщення виду $U = U_0 \cos KX$ з амплітудою, що досягає для більшості металів границі міцності на розрив [59], функція, яка відповідає ε_1 , є малою величиною ($\sim 1\%$). Тому, обмежувачись класом початкових напружень, які відповідають зміщенням U_m , що описуються плавними функціями обмеженого зростання,

величинами $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ в рівняннях (3.101) - (3.104) без відчутного зниження точності можна знехтувати. Тоді, згортаючи рівняння (3.102) - (3.104), приходимо до стандартного рівняння руху пружного середовища в інваріантному відносно системи координат вигляді

$$\rho^0 \ddot{\vec{w}} = \mu \nabla^2 \vec{w} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \times \vec{w}) \quad (3.108)$$

з пружними константами, що мають слабку залежність від координат. Таким чином, приходимо до моделі дослідження розповсюдження пружних хвиль в тілах з неоднорідними початковими напруженнями, яка зводиться до задачі про розповсюдження хвиль в плавно неоднорідному пружному середовищі.

Перейдемо до розгляду випадку високочастотних, з гармонічною залежністю від часу, пружних хвиль, який має значний практичний інтерес для задач неруйнівного контролю міцності. Як відомо, в цьому випадку досить зручно використовувати променеві методи, які вигідно відрізняються простотою та наочністю [82] і досить вдало апробовані на задачах про розповсюдження акустичних та електромагнітних хвиль малої амплітуди в неоднорідних середовищах [82, 115, 190]. Тут також може знайти застосування більш універсальний, узагальнюючий променеві методи, метод еквівалентних систем [106], але він ще недостатньо розвинений для випадку пружних хвиль. Променевий метод дослідження розповсюдження пружних хвиль в неоднорідному середовищі, розвинутий в роботі [185], неможливо використати безпо-середньо, оскільки він виходить з рівняння руху, яке має, в порівнянні з (3.108), додаткові члени (в прийнятих тут позначеннях):

$$\vec{\nabla} \lambda (\nabla \times \vec{w}) + \vec{\nabla} \mu (\nabla \times \vec{w}) + 2 (\vec{\nabla} \mu \times \vec{\nabla}) \vec{w} \quad (3.109)$$

Тому скористаємось підходом, який є загальноприйнятим для дослідження хвиль в неоднорідних

акустичних та електромагнітних середовищах [96] і забезпечує цілком задовільну точність при досить високих частотах.

Приймаючи в рівнянні (3.108) залежність від часу у вигляді $e^{-i\omega t}$ ($\omega = 2\pi\nu$ - кругова частота, $\omega = W e^{-i\omega t}$), приходимо до виразу

$$\mu \nabla^2 \vec{W} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{W}) = -\omega^2 \rho \vec{W} \quad (3.110)$$

яке при використанні представлення

$$(3.111)$$

перетвориться в систему приведених хвильових рівнянь

$$(3.112)$$

$$\nabla^2 \vec{\psi}(\vec{x}) + k_{oz}^2 n_z^2(\vec{x}) \vec{\psi}(\vec{x}) = \mathbf{0} \quad (3.113)$$

де φ та ψ - скалярний та векторний пружні потенціали,

$$k_{ol} = \frac{\omega}{C_{ol}}, \quad k_{ot} = \frac{\omega}{C_{ot}}, \quad n_l(\vec{x}) = \frac{C_{ol}}{C_l(\vec{x})}, \quad n_z(\vec{x}) = \frac{C_{oz}}{C_z(\vec{x})}$$

C_{ol} , C_{ot} - деякі фіксовані, характерні для області, що розглядається, швидкості поздовжніх та поперечних пружних хвиль відповідно, а $C_l(x)$ та $C_z(x)$ - їх локальні значення. Тут і далі через x будемо позначати координати незбуреного стану.

Шукані рішення для пружних потенціалів можуть бути представлені у вигляді слідуєчих рядів Дебая:

$$\Phi(\vec{x}) = e^{ik_{ol}z} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_m(x)}{(ik_{ol})^m} \quad (3.114)$$

$$\vec{\psi}(\vec{x}) = e^{ik_{ot}z} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\vec{B}_m(\vec{x})}{(ik_{ot})^m} \quad (3.115)$$

Відмітимо, що деяке спрощення рівнянь (3.113) та (3.115) можна одержати в плоских та осесиметричних задачах, якщо ввести представлення

$$\vec{\Psi} = \Psi \vec{q} \quad (3.116)$$

де q - одиничний вектор, перпендикулярний до площини вирішення задачі [99].

Для одержання відповідних рівнянь, які визначають невідомі фази s , s та амплітуди A_m , B_m рівнянь ейконала і переноса, після підстановки рядів (4.3.114), (3.115) у вихідні рівняння (3.112), (3.113) знаходимо:

$$(\vec{\nabla} S)^2 = n_1^2 \quad (3.117)$$

$$(\vec{\nabla} \bar{S})^2 = n_2^2 \quad (3.118)$$

$$2 \vec{\nabla} A_m \vec{\nabla} S + A_m \vec{\nabla}^2 S = -\vec{\nabla}^2 A_{m-1}, \quad A_m = 0, m < 0$$

(3.119)

$$2 \vec{\nabla} B_m \vec{\nabla} \bar{S} + B_m \vec{\nabla}^2 \bar{S} = -\vec{\nabla}^2 B_{m-1}, \quad B_m = 0, m < 0$$

(3.120)

Оскільки рішення для поперечної хвилі (S -хвилі) буде аналогічним, рішення рівнянь ейконала розглянемо на прикладі поздовжньої хвилі (P -хвилі). Рівняння (3.117), (3.118) відносяться до класу нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку Гамільтона-Якобі. За допомогою відповідного гамільтоніана [100]

$$H = \frac{1}{2} [p^2 - n_1^2(x)] = 0, \quad \vec{P} = \vec{\nabla} S \quad (3.121)$$

та рівнянь характеристик

$$\frac{d\vec{x}}{d\tau} = \frac{\partial H}{\partial \vec{P}}, \quad \frac{d\vec{P}}{d\tau} = \frac{\partial H}{\partial \vec{x}}, \quad \frac{dS}{d\tau} = \frac{\vec{P} \partial H}{\partial \vec{P}} \quad (3.122)$$

отримуємо рівняння P -променів у гамільтоновій формі:

$$\frac{d\vec{x}}{d\tau} = \vec{P}; \quad \frac{d\vec{P}}{d\tau} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} n_1^2(x) \quad (3.123)$$

звідки, виключивши P , знаходимо:

$$\frac{d^2 \vec{x}}{d\tau^2} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} n_1^2(\vec{x}) \quad (3.124)$$

або

$$\frac{d}{d\sigma} \left(n \frac{d\vec{x}}{d\sigma} \right) = \vec{\nabla} n_1 \quad (3.125)$$

де параметр τ пов'язаний з довжиною дуги променю σ співвідношенням

$$d\tau = \frac{d\sigma}{|p|} = \frac{d\sigma}{n_1(x)} \quad (3.126)$$

Аналогічно записуються відповідні рівняння для S -хвилі:

$$\frac{d^2 \vec{x}}{d\tau^2} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} n_t^2(\vec{x}) \quad (3.127)$$

$$\frac{d}{d\sigma} \left(n_t \frac{d\vec{x}}{d\sigma} \right) = \vec{\nabla} n_t \quad (3.128)$$

Рівняння (3.127), (3.128) та (3.133) або (3.134) разом з рівняннями, які визначають зміну ейконалів вздовж променів P - та S -хвиль

$$S = S^0 + \int_{\sigma_0}^{\sigma} n_t d\sigma; \quad (3.129)$$

$$\bar{S} = \bar{S}^0 + \int_{\bar{\sigma}_0}^{\bar{\sigma}} n_t d\bar{\sigma}; \quad (3.130)$$

(S^0 , S^0 - початкові ейконали у вихідних точках променів P – та S -хвиль відповідно) визначають закон розповсюдження криволінійних променів в неоднорідному середовищі і аналогічні ньютонівському рівнянню руху матеріальної точки в силовому полі $U(x)$, що дозволяє використовувати для знаходження променів результати траєкторних розрахунків з механіки.

Для знаходження амплітуд A_m , B_m хвильового поля, яке розповсюджується вздовж променів, розглянемо рішення рівнянь переносу.

Оскільки

$$\vec{\nabla} A_0 \vec{\nabla} S = \frac{dA_0}{d\sigma} |\vec{\nabla} S| = \frac{dA_0}{d\tau} \frac{d\tau}{d\sigma} n_t = \frac{dA_0}{d\tau} \quad (3.131)$$

внаслідок того, що

$$\vec{\nabla} S = n_t \vec{l}, \quad \vec{\nabla} l = \frac{d}{d\tau}, \quad d\tau = \frac{d\sigma}{n_t} \quad (3.132)$$

рівняння переносу для A_0 (рівняння (4.51) при $m = 0$) приймає вигляд

$$(3.133)$$

або

$$\frac{dA_0^2}{d\tau} + A_0^2 \vec{\nabla}^2 S = 0 \quad (3.134)$$

звідки, після інтегрування, одержуємо:

$$A_0(\tau) = A_0(\tau^0) \sqrt{\exp \left\{ \int_{\tau^0}^{\tau} \vec{\nabla}^2 S d\tau \right\}} \quad (3.135)$$

де $A_0(\tau^0)$ - початкове значення амплітуди хвилі у вихідній точці променю.

Для визначення величини $\nabla^2 S$ використовується формула Ліувілля [100]. В загальному випадку, коли промені виходять від поверхні $x=x^0(\xi, \eta)$, де ξ, η - деякі координати на ній (рисунок 3.34) і описуються рішенням

$$\vec{x} = \vec{x}(\xi, \eta, \tau) \quad (3.136)$$

формула Ліувілля дає

$$\nabla^2 S = \frac{d}{d\tau} \ln D(\tau), \quad (3.137)$$

де

$$D(\tau) = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(\xi, \eta, \tau)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \tau} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \tau} \\ \frac{\partial z}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \tau} \end{vmatrix} \quad (3.138)$$

- якобіан переходу від декартових координат X, Y, Z до променевих ξ, η, τ , який зручно обчислювати через змішаний добуток векторів

$$D(\tau) = ([\vec{x}_\xi \ \vec{x}_\eta] \ \vec{x}_\tau) = \vec{x}_\xi \ \vec{x}_\eta \ \vec{x}_\tau = \vec{x}_\xi \ \vec{x}_\eta \ \vec{P} \quad (3.139)$$

де

$$\vec{x}_\xi = \frac{\partial \vec{x}}{\partial \xi}, \quad \vec{x}_\eta = \frac{\partial \vec{x}}{\partial \eta}, \quad \vec{x}_\tau = \frac{\partial \vec{x}}{\partial \tau} = \vec{P} \quad (3.140)$$

Підставляючи (3.139) в (3.135), кінцево знаходимо

$$A_0 = A_0^0 \left[\frac{D(\tau_0)}{D(\tau)} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{A_0^0}{\sqrt{F}} \quad (3.141)$$

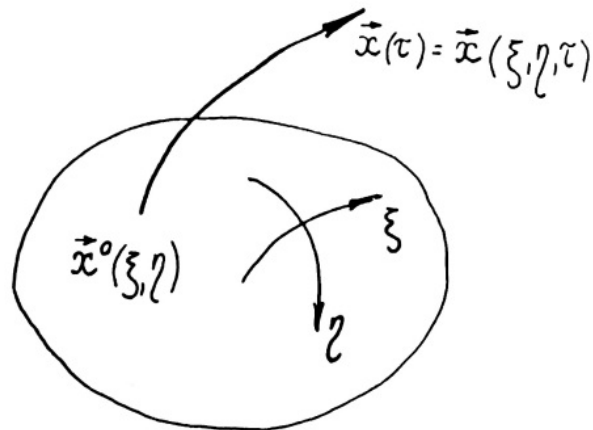


Рисунок 3.34 – Геометрія випромінюючої поверхні

Величину $F = D(\tau)/D(\tau_0) = x_{\xi} x_{\eta} p / (x_{\xi} x_{\eta} p)_0$, яка дорівнює відношенню січення нескінченно вузької трубки променів в точці спостереження до січення у вихідній точці називають розходженністю променів. Аналогічно вирішуючи послідовні рівняння переносу для амплітуд A_m ($m = 1, 2, 3 \dots$), приходимо до виразу

$$A_m = \frac{A_m^0}{\sqrt{F}} - \frac{1}{2\sqrt{D(\bar{\tau})}} \int_{\tau_0}^{\tau} \vec{v}^2 A_{m-1}(\tau') \sqrt{D(\tau')} d\tau' \quad (3.142)$$

Наявність векторних величин в рівняннях переносу для амплітуд S -хвилі B_m не вносить суттєвих відмінностей у формальні вирази для їх рішення в порівнянні з вищенаведеними. Ці рішення, які відповідають рівнянням (3.141), (3.142), для P -хвилі записуються у вигляді:

$$\vec{B}_0 = \frac{\vec{B}_0^0}{\sqrt{F}} \quad (3.143)$$

$$B_m = \frac{B_m^0}{\sqrt{F}} - \frac{1}{2\sqrt{D(\bar{\tau})}} \int_{\tau_0}^{\tau} \vec{v}^2 B_{m-1}(\tau') \sqrt{D(\tau')} d\tau' \quad (3.143)$$

Наведені рішення для амплітуд A_m , B_m , як і будь-які рішення пружних хвильових задач, пов'язані за допомогою відповідних граничних та початкових умов, які визначають величини A_m^0 , B_m^0 та ейконали S^0 , S^0

Слід також відмітити, що у всіх практичних дослідженнях хвильових полів у неоднорідному середовищі, як це відмічають різні автори [96, 100], обмежуються тільки визначенням амплітуд нульового наближення, які дають достатньо точні рішення при високих частотах хвиль (критерії застосовуваності такого наближення викладені в [100]).

3.5 Контроль неметалевих трубних конструкцій

Використання пластмасових труб нараховує більше 50 років. Вперше вони були використані в країнах Західної Європи при будівництві каналізаційних систем і водогонів. Європейські країни і сьогодні займають одне з перших місць по використанню труб з пластмаси. Тільки Німеччина, Італія, Франція і Англія споживають 80% всього їх виробництва. Поступово використання цієї технології розростається, все більше захоплюючи ринок України і витісняючи труби, які виготовляються із традиційних матеріалів (чавун, сталь, мідь).

Сьогодні труби з поліетилену використовуються при будівництві водогонів, артезіанських свердловин, систем меліорації, протічних і напірних каналізаційних колекторів, газопроводів, а також для обігріву теплиць і підлог та захисту електричних кабелів.

Широкий спектр використання поліетиленових труб обумовлений наявністю у них цілого ряду переваг в порівнянні з трубами з інших матеріалів:

- висока опірність корозії, інкрустації осаду, що збільшує термін експлуатації трубопроводів до 50 років;

- менша питома вага в порівнянні зі сталевими трубами, що полегшує транспортування й монтаж трубопроводів;
- опірність блукаючим струмам;
- низька теплопровідність;
- відсутність конденсації на зовнішній поверхні труби;
- можливість з'єднання із трубопроводами з інших матеріалів;
- висока гнучкість, що дозволяє зберігати та транспортувати труби в скрученому виді;
- низька вартість їхнього монтажу та прокладки в порівнянні з сталевими, що й залучає все більше коло споживачів до їх використання.

За відсутності на підприємствах приладів, які б забезпечували чіткий контроль товщини стінки труби, здебільшого продукція випускається з товщиною стінки з додатним допуском (відповідно до нормативного документу), що призводить до перевитрати сировини та відповідно до збільшення собівартості виготовлення продукції.

На даний момент існує проблема контролю геометричних параметрів труб з полімерних матеріалів в процесі їх виготовлення. На Україні, зокрема, існує стандарт ДСТУ Б.В.2.7-73-98, який регламентує параметри, характеристикам яких повинні відповідати труби з полімерних матеріалів (товщина стінки труби, зовнішній діаметр, овальність).

Сьогодні на світовому ринку ряд підприємств пропонують свою продукцію з надання таких послуг, одним з яких є російське підприємство *Інтротест*, що представило пристрій *УИР-4П*. Дана установка призначена для імерсійного контролю товщини стінок поліетиленових труб ультразвуковим методом в процесі їх виготовлення.

УИР-4П забезпечує неперервне вимірювання в чотирьох точках в певному перерізі труби в процесі формування труби. Результат вимірювання виводиться у виді абсолютного

значення товщини стінки труби в міліметрах на чотири світодіодних дисплеї (по кожній з точок заміру). Установка має режим визначення відхилення товщини стінки труби від встановленого рівня.

Також над даною проблемою працювала американська фірма *BETA LaserMike*, яка запропонувала установку *Betascan 1000*. Ультразвуковий сканер приймає сигнали з 8-ми перетворювачів і видає на екран повне січення труби, що контролюється, відображаючи при цьому значення товщини стінки у 8-ми контрольованих точках та мінімальне значення і автоматично регулює значення товщини стінки при його відхиленні від заданих значень. Даний прилад може вимірювати зовнішній діаметр труби оптичним методом. Проте наведений пристрій відносно дорогий.

Вищенаведені установки не набули широкого використання на теренах України через ряд причин, зокрема через невідповідність їхніх контрольованих параметрів параметрам, які регламентовані у ДСТУ Б.В.2.7-73-98 [101].

Останнім часом (на сучасному етапі) спостерігаються тенденція до збільшення використання, а, отже, й виготовлення труб з полімерних матеріалів, тому постало питання їх повноцінного контролю на вимоги відповідного (вищезазначеного) стандарту.

НВФ “ЗОНД”, що має понад 10-ти річний досвід роботи на ринку неруйнівного контролю та технічної діагностики (НК і ТД), пропонує установку “ПОЛІМЕР-4К”, для контролю якості поліетиленових труб в процесі їх виготовлення. Даний прилад призначений для чотирьох канального контролю товщини стінки, зовнішнього діаметру та овальності поліетиленових труб ультразвуковим методом.

Основною перевагою установки “ПОЛІМЕР-4К” є можливість контролю зовнішнього діаметру та овальності труб. Технічні характеристики установки наведено в таблиці 3.5.

**Таблиця 3.5 - Технічні характеристики установки
“ПОЛІМЕР-4К”**

Характеристика	Значення
Діапазон діаметрів труб, що контролюються, мм	<i>20 - 400</i>
Діапазон вимірювання товщини стінки труб, мм	<i>2,0 - 22,8</i>
Відносна похибка вимірювання товщини стінки, не більше %	<i>3</i>
Діапазон вимірювання овальності, мм	<i>1,0 - 14,0</i>
Максимальна швидкість поздовжнього переміщення труби, що контролюється, м/хв	<i>6,5</i>
Температура зовнішньої поверхні труби, °С	<i>10 - 30</i>

Пристрій забезпечує автоматичну світлову, звукову та мовну сигналізацію виявлених відхилень контрольованих параметрів від нормованих значень. Установка дозволяє здійснювати безеталонне налаштування вимірювальних каналів. Цифрова та графічна індикація результатів вимірювань здійснюється на екрані комп'ютера за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

В склад такої установки входять наступні блоки: блок збору та попередньої обробки інформації, дефектоскоп, персональний комп'ютер та акустичний блок (рисунок 3.35).

Принцип роботи приладу базується на використанні ультразвукового імерсійного ехо-імпульсного методу неруйнівного контролю із застосуванням повздовжніх хвиль.

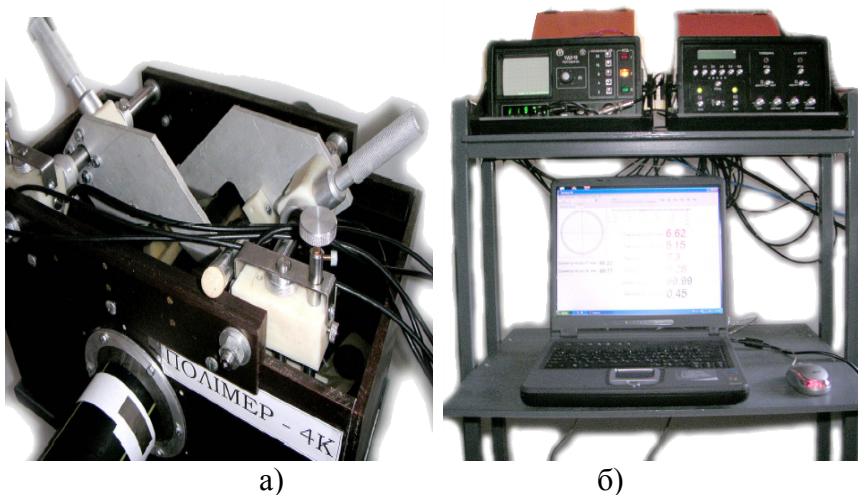
Контроль проводять за допомогою 6-ти давачів, розміщення яких відносно труби зображене на рисунку 3.36.

Метод вимірювання товщини стінки полягає у вимірюванні часу проходження ультразвукових коливань між

імпульсами 2 та 3 - τ_T (рисунок 3.36). Вимірний час прямопропорційний величині товщини стінки у відповідній точці:

$$h = \frac{V_{vз} \cdot \tau_T}{2}, \quad (3.144)$$

де h - товщина стінки труби у відповідній точці;
 $V_{vз}$ - швидкість поширення ультразвукових коливань у поліетилені; τ_T - час проходження ультразвукових коливань між 2 та 3 імпульсами та в зворотному напрямку.



а) акустичний блок, б) приставка ПОЛІМЕР-4К, дефектоскоп, ПК

Рисунок 3.35 – Загальний вигляд установки для контролю поліетиленових труб

Такі розрахунки проводять по відношенні до кожного з чотирьох датчиків, зміщених один відносно одного на кут 90° у площині перпендикулярній до руху труби (рисунок 3.36).

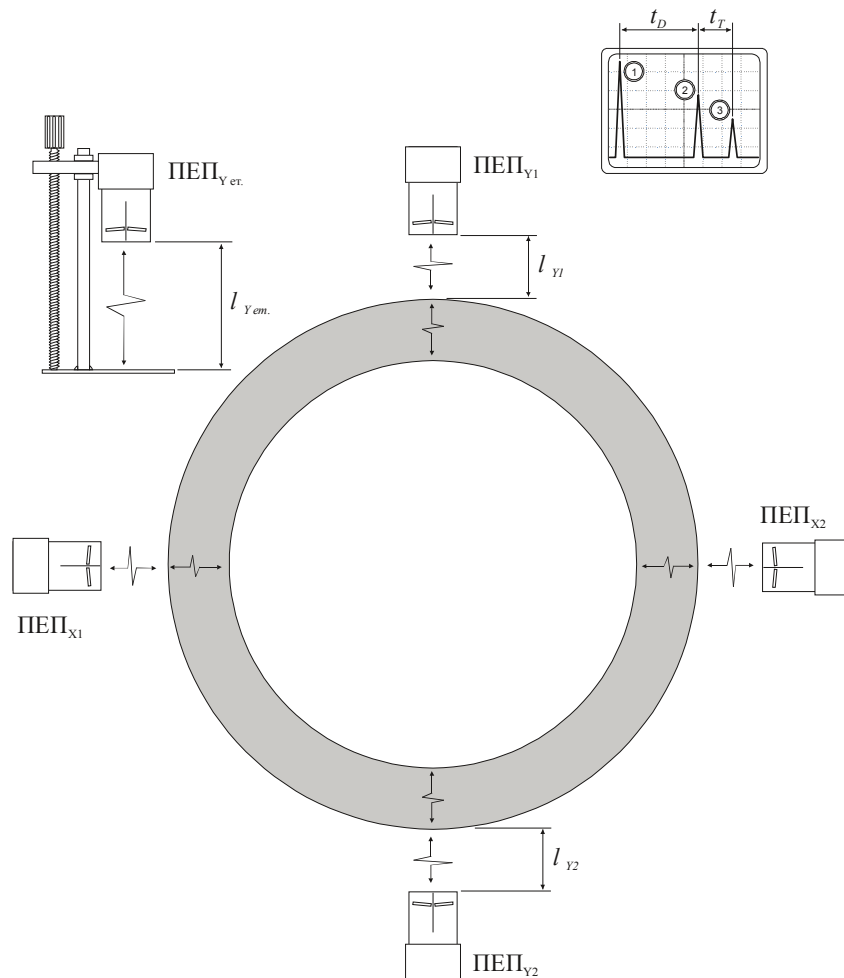


Рисунок 3.36 – Метод вимірювання геометричних параметрів поліетиленових труб

Принцип вимірювання зовнішнього діаметру зображений на рисунку 3.36. П'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) 3 розміщений на віддалі h_3 від штучного відбивача 4. ПЕП 1 та 2 розміщені на віддалі h_1 та h_2 відповідно від

зовнішньої поверхні труби 5. Причому ПЕП 3 та штучний відбивач 4 розміщені в одному середовищі з ПЕП1, ПЕП2 та трубою 5. Перед проведенням контролю віддаль h_3 налаштовують таким чином, щоб виконувалась рівність:

$$h_3 = h_1 + h_2 \quad (3.145)$$

причому необхідне виконання рівності:

$$h_1 = h_2 \quad (3.146)$$

Віддалі h_1 та h_2 налаштовують при контролі зразка з еталонним діаметром $D_{\text{еталон}}$ (діаметром, який записаний в паспорті на продукцію).

Суть вимірювання зовнішнього діаметру полягає у вимірюванні віддалей h_1 , h_2 , h_3 та перевірка їх на відповідність рівності (3.145).

Послідовність розрахунків наступна. За виміряними проміжками часу τ_{D1} , τ_{D2} та τ_{D3} (рисунок 3.36) та наперед заданим значенням еталонного діаметру $D_{\text{еталон}}$ розраховують значення зовнішнього діаметру згідно формули:

$$D = D_{\text{еталон}} + \frac{V_{\text{УЗ}} \cdot [\tau_{D3} - (\tau_{D1} + \tau_{D2})]}{2} \quad (3.146)$$

де D - діаметр труби у певному січенні; $D_{\text{еталон}}$ - еталонний діаметр труби; $V_{\text{УЗ}}$ - швидкість поширення ультразвукових коливань у контактному середовищі; τ_{D3} - час проходження ультразвукових коливань між імпульсами 3.1 та 3.2 і в зворотному напрямі (рисунок 3.36); τ_{D1} - час проходження ультразвукових коливань між імпульсами 1.1 та 1.2 і в зворотному напрямі; τ_{D2} - час проходження ультразвукових коливань між імпульсами 2.1 та 2.2 і в зворотному напрямі.

Вимірювання зовнішнього діаметру проводять у двох взаємо перпендикулярних площинах (рисунок 3.36), як правило, вертикальній та горизонтальній.

Про овальність труби судять виходячи з порівняння вертикального D_B та горизонтального D_G зовнішніх діаметрів:

$$\Delta D = |D_B - D_G| \quad (3.147)$$

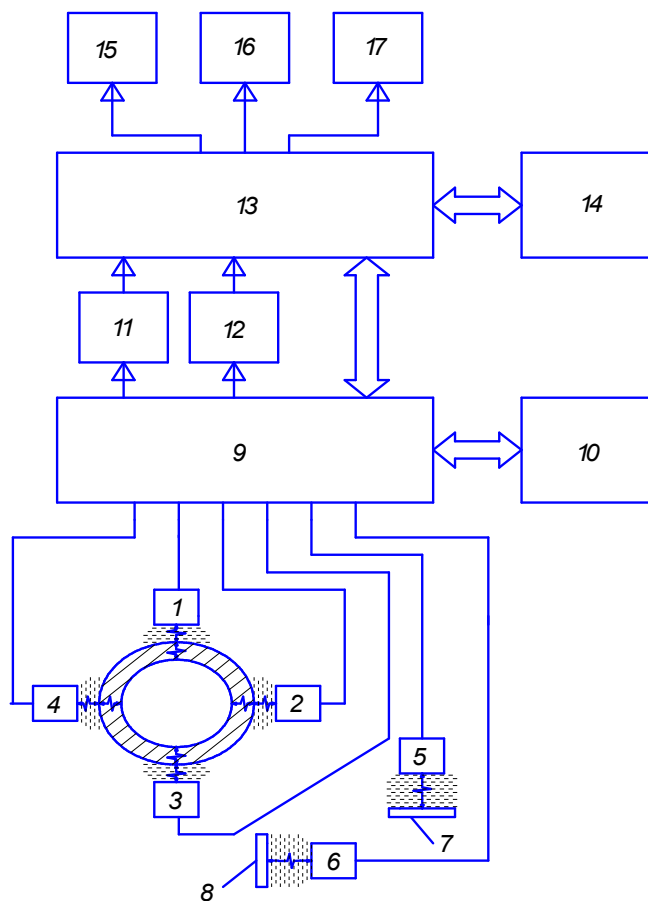
Функціональна схема установки ПОЛІМЕР-4К зображена на рисунку 3.37. Установка працює наступним чином. Генератор ультразвукових коливань почергово (під керуванням мікроконтролера) збуджує один з шести перетворювачів.

Ультразвукові коливання (УЗК) від роздільно-суміщеного п'єзоперетворювача, розміщеного зовні над трубою, через шар контактної речовини направляється в зону контролю.

УЗК на грані розділу двох середовищ (вода-поліетилен) зазнають часткового відбивання і заломлення, тобто промінь ультразвукових коливань, що пройшов через шар контактної рідини відбивається від зовнішньої поверхні труби, проходить зворотній шлях і попадає на ПЕП. Цей сигнал попадає на підсилювач.

Підсилений сигнал поступає на формувач прямокутних імпульсів по діаметру, де утворюється прямокутний імпульс, тривалість якого рівна проміжку часу між зондуємим та першим відбитим імпульсами. Потім даний прямокутний імпульс надходить до мікроконтролера. За тривалістю даного імпульсу судять про діаметр ОК згідно вище наведених формул.

Заломлений промінь УЗК, що пройшов крізь тіло труби, відбивається від внутрішньої поверхні труби і поширюється в зворотному напрямку через тіло труби і шар контактної речовини попадає на ПЕП. Цей сигнал попадає на підсилювач.



1,2,3,4,5,6 – п'єзоелектричний перетворювач; 7,8 – штучний
 відбивач; 9 – блок запуску давачів; 10 – генераторно-
 підсилювальний тракт; 11,12 – формувач прямокутних імпульсів; 13
 – пристрій керування; 14 – персональний комп'ютер; 15 – кнопки
 управління; 16 – цифровий індикатор; 17 – сигналізатор дефекту

Рисунок 3.37 – Схема функціональна

Підсилений сигнал поступає на формувач прямокутних імпульсів по товщині, де утворюється прямокутний імпульс тривалість якого рівна проміжку часу між зондуючим та прийшовшим імпульсами. Потім даний прямокутний імпульс надходить до мікроконтролера. За тривалістю даного імпульсу судять про товщину ОК в певній точці згідно вище наведених формул.

Управління установкою здійснюється з персонального комп'ютера на екрані якого відображаються результати контролю (рисунок 3.38) згідно певного програмного забезпечення.

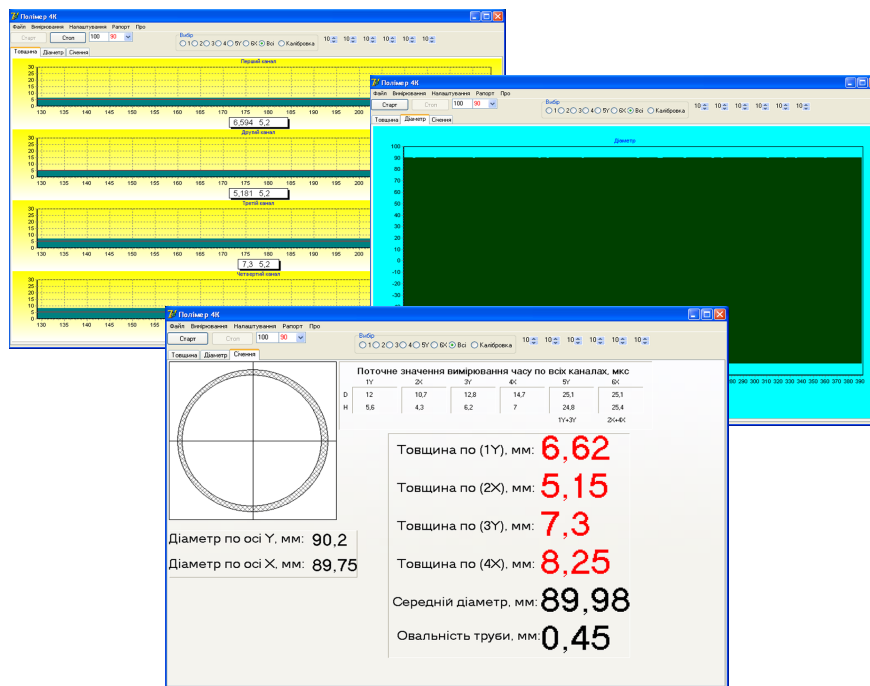


Рисунок 3.38 – Результати контролю

Програмне забезпечення установки працює наступним чином: з програми комп'ютера в мікроконтролер надходить сигнал готовності через інтерфейс *RS232*, мікроконтролер включає реле першого каналу, проводить по ньому вимірювання трьох луно-імпульсів і видає на інтерфейс *RS232* різницю між другим і першим, третім і другим імпульсами, після чого виключає реле першого каналу і включає реле другого каналу, проводячи все те саме, що і по першому каналу. Так само виконується по третьому і четвертому каналах. По п'ятому і шостому каналах виконується вимірювання перших двох луно-імпульсів і видається на інтерфейс *RS232* комп'ютера значення різниці між цими імпульсами.

Акустичний блок являє собою імерсійну ванну під певний типорозмір труби з жорстко закріпленими до неї тримачами перетворювачів. Для запобігання втрати контактної рідини використовують спеціальний ущільнювач під певний типорозмір труби.

При проведенні випробувань у виробничих умовах основну увагу було приділено акустичному блоку.

Попередньо було визначено два напрямки досліджень: з розміщенням перетворювачів у ванні для охолодження труби та в окремій імерсійній ванні.

При розміщенні перетворювачів у ванні для охолодження виникали наступні проблеми з акустичними сигналами:

- перетворювачі жорстко закріплені на ванні для охолодження. При витягуванні труби, вона вібрувала з іншою частотою ніж ванна, а отже і перетворювачі, що призводило до дезорієнтації акустичних сигналів відносно вертикального та горизонтального січення труби, а отже і до збільшення похибки вимірювань;

- перетворювачі закріплені безпосередньо після екструдера (температура поверхні труби $\approx + 160^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$).

Швидкість ультразвуку при різній температурі труби різна, а також присутній градієнт зміни температури по товщині труби, що спотворює результати вимірювань по відношенні до реальних;

При розміщенні перетворювачів у окремі імерсійні ванні виникали наступні проблеми:

- імерсійна ванна розміщена безпосередньо після екструдера. Негативний вплив температури труби та градієнта зміни температури по товщині труби на результати вимірювань;

- імерсійна ванна розміщена після двох ван охолодження (температура поверхні труби порядку $(+30 \div +35) ^\circ\text{C}$). В даному місці градієнт зміни температури по товщині практично відсутній, що найбільш сприятливо для вимірювання наших параметрів. Вплив вібрації труби на результати вимірювання практично відсутній.

3.6 Розроблення способів виявлення корозійно-томних тріщин в тілі бурильних труб

Враховуючи той факт, що єдиним методом контролю якості з'єднань з натягом є ультразвуковий, а також можливість створення технічних засобів неруйнівного контролю труб підвищеної міцності, що ґрунтуються на загальному методі контролю, можна зробити висновок, - найбільш ефективним методом неруйнівного контролю є ультразвуковий луно-метод. Даний метод ґрунтується на здатності ультразвукових хвиль розповсюджуватися на більшу товщину в багатьох речовинах, відбиватися від межі розподілу двох середовищ, а від інтенсивності і часу надходження відбитих хвиль роблять висновок про наявність, розмір, місцезнаходження і характер дефекту. Контроль здійснюється шляхом сканування п'єзоперетворювачем луно-дефектоскопа (п'єзоперетворювач містить п'єзоелемент, що

перетворює електричні коливання в ультразвукові і навпаки та слугує для випромінювання й приймання УЗК) поверхні підконтрольного виробу. При цьому ультразвуковий промінь може бути введений по нормалі і під різними кутами до поверхні виробу, що дає можливість збуджувати в ньому хвилі різних типів (повздовжні, поверхневі, рушійні, нормальні) та виявляти поверхневі й глибинні дефекти різної орієнтації. Чутливість луно-методу в оптимальних умовах контролю на частоті 2-4 МГц дає змогу виявити дефекти, відбиваюча поверхня яких має площу $0,5 - 1 \text{ мм}^2$.

Питанням застосування ультразвукового методу для контролю якості матеріалів і виробів, у тому числі складної форми, значну увагу приділяють у своїх роботах вітчизняні вчені Соколов, Єрмолов, Ключев, Гурвіч, Розенберг, Виборнов, Шрайбер, Праницький, Каневський, Мігаль, а також закордонні – Бергман, Матаушек, Крауткремер, Флінкбзут, Бойль та інші. Але питання контролю трубних виробів не знайшли належного освітлення в спеціальній літературі, і результати проведених досліджень не можуть бути використані для розроблення спеціалізованих засобів ультразвукового контролю бурильних труб підвищеної міцності. Також не вирішена основна проблема ультразвукового контролю труб на буровій в процесі спуско-підіймальних операцій – підвищення чутливості засобів.

Тому в даній роботі наведено теоретичне дослідження особливостей і способів ультразвукового контролю з метою створення технічних засобів виявлення дефектів у бурильних трубах із конічними стабілізуючими пасками.

Для розроблення способів ультразвукового контролю тіла бурильних труб на наявність корозійно-втомних тріщин необхідно визначити характер їх виникнення. Дослідженнями вітчизняних і закордонних учених встановлено, що корозійно-втомні тріщини переважно виникають у поперечній відносно до вісі труби площині. Зазначено також, що найважливішим

параметром під час контролю на наявність дефектів є спрямованість фронту розповсюдження втомних тріщин, тобто кут нахилу площини дефекту (втомної тріщини) до вісі труби залежно від його глибини. Тому розглядання способів ультразвукового контролю тіла бурильних труб із розміщення дефектів під різними кутами до вісі труби має значний інтерес. Загалом можливі два випадки розміщення дефектів відносно до вісі труби:

- дефект розміщений під будь-яким кутом θ до вісі труби;

- дефект розміщений під прямим кутом до вісі труби;

Розглянемо випадок ультразвукового контролю, коли дефект розміщений під кутом θ до вісі труби. Відомо, що найкращими умовами виявлення дефектів є умови, за яких УЗК нормально падають на площину дефекту. Виходячи з такого положення, побудуємо хід променів УЗК. Побудовані тут і в подальшому показані для центрального променя УЗК. За допомогою п'єзоперетворювача $П$, кут призми якого рівний β , промінь УЗК в точці A під кутом α вводиться в тіло бурильної труби і після неодноразового відбивання від внутрішньої стінки труби в точці D , під прямим кутом в точці β попадає на площину дефекту, відбивається від неї і на цьому ж шляху попадає на п'єзоперетворювач.

У результаті елементарних математичних перетворень параметри ультразвукового контролю визначаються з наступних виразів:

- кут введення УЗК у тіло труби

$$\alpha = 90^\circ - \theta,$$

- кут призми п'єзоперетворювача

$$\beta = \arcsin \left[\frac{Cl_1}{Cl_2} \sin(90^\circ - \theta) \right], \quad (3.148)$$

- відстань між п'єзоперетворювачем і дефектом

$$L=2AC-FE=\frac{2d \cdot \cos\theta - h}{\sin\theta}, \quad (3.149)$$

де : θ - кут нахилу площини втомної тріщини вертикальної до вісі труби, град; Cl_1, Cl_2 – відповідно швидкості розповсюдження УЗК, повздовжніх у призмі і поперечних у підконтрольному виробі, м/с; d – товщина виробу, мм; h – глибина дефекту, мм.

Відповідно до «Інструкції з експлуатації, ремонту та обліку бурильних труб» («ВИНИИТнефть») труби, що мають на тілі дефекти глибиною 3 мм і більше, підлягають відбракуванню. На основі експериментальних досліджень, встановлено, що кут нахилу площини втомної тріщини до вертикальної вісі труби становить у середньому 22° . Якщо $h=3\text{мм}$, $\theta = 22^\circ$, $\Psi = 57^\circ$, то за формулами були визначені параметри ультразвукового контролю тіла бурильних труб (Таблиця 3.6).

На практиці часто зустрічаються випадки, коли дефекти розташовані під прямим кутом до вісі труби. При цьому площина дефекту і зовнішня чи внутрішня поверхня труби, залежно від того, з якого боку розвивається дефект, утворюють двогранний кут, який є нормованим відбивачем, і теорія відбиття від такого відбивача добре розроблена.

УЗК випромінювані п'єзоперетворювачем, вводять у підконтрольний виріб під кутом d_1 , після одноразового відбиття від внутрішньої стінки виробу вони попадають на площину дефекту під кутом Ψ , відбиваються від нього, і після одноразового відбиття від внутрішньої стінки труби попадають на приймач під кутом α_2 . При цьому виконується рівняння:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ - \psi \quad (3.150)$$

Відстань між випромінювачем I та дефектом D визначається за таким виразом:

$$L=20C-AB=\frac{2d}{\operatorname{tg}(90^{\circ}-\alpha)}. \quad (3.151)$$

Таблиця 3.6 - Параметри ультразвукового контролю тіла бурильних труб на наявність дефектів поперечної орієнтації

Діаметр труби, мм	Товщина стінки, мм	α	β	L , мм
60	7	79	55,5	72,6
	9			93,2
89	7	79	55,6	72,6
	9			93,2
	11			113,8
114	9	79	55,5	93,2
	10			103,5
127	9	79	55,5	93,2
	11			113,8
140	9	79	55,5	93,2
	11			113,0

Відстань між випромінювачем і приймачем можна визначити з виразу:

$$l=\frac{2h}{\operatorname{tg}\alpha}. \quad (3.152)$$

Решта параметрів ультразвукового контролю можна визначити за наведеними вище виразами.

Отже розглянуто основні способи ультразвукового контролю тіла бурильних труб на наявність дефектів поперечної орієнтації та визначено їх основні параметри.

Під час проведення контролю вказаними способами в усіх випадках на екрані дефектоскопу спостерігається тільки

зондувальний імпульс, а з його появленям – луно-сигнал від дефекту. Інтерпретація результатів контролю у даному випадку ускладнена, так як амплітуда луно-сигналу, відбитого від дефекту, значною мірою залежить від стану зовнішньої поверхні труби, температури навколишнього середовища, властивостей акустичної рідини та інше. Також не є можливим контроль якості акустичного контакту й вимірювання розмірів дефекту.

Вплив вказаних чинників можна усунути за умови порівняння амплітуди луно-імпульсу, відбитого від дефекту, з амплітудою опорного луно-сигналу, тобто розміри дефекту оцінюються не за абсолютною величиною, а за співвідношенням амплітуд. Це дає можливість постійно контролювати якість акустичного контакту, а також визначити розташування дефекту (для вибору зони автоматичної сигналізації) і виміряти розміри дефектів (для встановлення критерію відбракування). Тому пропонується спосіб контролю, за якого, з метою підвищення якості ультразвукового контролю використовуються обидва випромінюючі боки п'єзоелемента. Ультразвукові коливання, що випромінюються п'єзоелементом від одного його боку, вводяться у виріб під кутом α , а УЗК, що випромінюються другим боком п'єзоелемента, попадають на дзеркальний відбивач, виконаний з матеріалу з великим питомим акустичним опором порівняно із середовищем, де розповсюджуються УЗК. Відбившись від відбивача УЗК по нормалі входять у виріб. Для здійснення нормального введення УЗК у виріб відбивач необхідно встановити під кутом δ до підконтрольного виробу, рівному половині кута нахилу п'єзопластини β до того самого виробу:

$$\beta = 2\delta . \quad (3.153)$$

Дана умова повинна виконуватися постійно під час зміни кута нахилу п'єзопластини.

4 ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ І ЧУТЛИВОСТІ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

4.1 Підвищення чутливості шляхом удосконалення конструкцій п'єзоелектричних перетворювачів

Основною характеристикою будь-якого методу неруйнівного контролю є його чутливість, яка визначає здатність методу виявляти дефекти мінімальних розмірів. Чутливість визначають за абсолютними чи відносними (по відношенню до товщини контрольованого матеріалу) розмірами виявлених дефектів. Чутливість контролю залежить від виду дефекту, його розмірів, орієнтації і розміщення у виробі.

Розрізняють декілька видів чутливості при ультразвуковому контролі, зокрема:

- *гранична чутливість дефектоскопа* – найменше або найбільше значення параметра об'єкта контролю або стандартного взірця, яке може бути зареєстроване акустичним дефектоскопом за визначених умов;

- *максимальна гранична чутливість акустичного дефектоскопу* – гранична чутливість акустичного дефектоскопа при максимальній чутливості приймача і потужності генератора та при даному відношенні сигнал-завада;

- *чутливість приймача акустичного приладу неруйнівного контролю* – найменше значення електричного сигналу на вході приймача акустичного приладу неруйнівного контролю, що забезпечує при визначених умовах заданий рівень амплітуди вхідного сигналу на індикаторі.

Саме про способи підвищення чутливості та точності акустичних методів неруйнівного контролю буде йти мова в даному розділі.

Вітчизняні й закордонні прилади, що застосовуються в нафтогазовій галузі при акустичному неруйнівному контролі (АНК) для генерування та прийому акустичних коливань використовують п'єзоелектричні перетворювачі, для нормальної роботи яких потрібна контактна рідина - вода, мастило, емульсія і т.п. Ультразвукові імпульси від поверхні п'єзопластики ПЕП під великими кутами до поверхні передаються в тіло труби й приймаються назад через тонкий шар контактної рідини. Незначні коливання товщини шару контактної рідини, перекося ПЕП відносно труби, порушення акустичного контакту через високу швидкість контролю наявність повітряних і жирових плівок призводять до появи сильних завад, які суттєво спотворюють результати контролю [102, 103]. Надриви металу, що не зменшують надмірно товщину стінки, хвилястість, забоїни, вдавлення, що є на поверхнях труб, виробництва країн СНД, призводять до появи сильних завад, які часто не дозволяють проводити контроль. Суттєві проблеми для виявлення дефектів створює наявність «мертвої» зони ПЕП. Для проведення надійного контролю необхідно застосовувати засоби очистки поверхні труб від жиру, болота, іржі, окалини, захисних покриттів і т.д. Похилі перетворювачі, що застосовуються, не дозволяють оцінювати товщину стінки труби. Суттєво ускладнюють роботу контактних дефектоскопів температура стінок труби й навколишнього середовища, особливо в польових умовах. Через швидке зношування ПЕП мають малу довговічність (при тому, що їх ціна досягає 50-70 євро за штуку). Значна частина вітчизняних контактних перетворювачів мають недостатню повторюваність метрологічних характеристик.

В [102] зазначається, що форма й шорсткість поверхні ОК відіграють вирішальну роль при ультразвуковому контролі. З однієї сторони, шорсткість обмежує чутливість методу до такого ступеня, що інколи може стати необхідною попередня обробка поверхні, а з іншого боку при контактному

методі шорсткість вирішальним чином визначає ступінь зносу перетворювача.

При імерсійному контакті, коли ПЕП контактує з поверхнею ОК через шар рідини, найбільший шкідливий вплив здійснюють сторонні частинки, через те що товщина шару акустичного контакту й відповідно його проникність можуть бути різними на різних ділянках. Частинки окалини, іржі або фарби на основному металі можуть утворювати повітряні зазори, що повністю припинить проходження ультразвуку. В залежності від початкового стану поверхні використовуються різні способи її покращення, наприклад протирання ганчіркою, очищення сталлюю щіткою, шабером, обробка наждачним кругом або піскоструменеве очищення. Але всі ці методи очистки не придатні для використання в умовах бурових під час СПО, оскільки вони різко зменшують продуктивність контролю.

На поверхнях з нерегулярними нерівностями, наприклад з хвилястістю, слідами вдавлювання від механічного інструменту, за розмірами близькими до розмірів ПЕП, шар акустичного контакту дуже несприятливо впливають на звуковий промінь: він нерегулярно відхиляється від нормалей, фокусується й розфокусується. Можливість оцінки амплітуди за таких умов сумнівна.

Проміжні шари (як, наприклад, вода у випадку імерсійного контролю) при роботі в луно-імпульсному режимі підвищують луно-імпульси від завад. Шар товщиною $0,1$ мм дає вже значно меншу чутливість, ніж при прямому контакті ПЕП з ОК. Крім того, спостерігається помітне розширення імпульсу, що посиляється та луно-імпульса, оскільки при помірно демпфованому ПЕП затухання зменшується під впливом акустичного контакту. Оскільки довжина хвилі звука в маслі або в воді при частоті 2 МГц приблизно рівна $0,8$ мм, шар товщиною $0,4$ мм відповідає половині довжини хвилі. На довжині шляху туди й назад при зигзагоподібному відбиванні

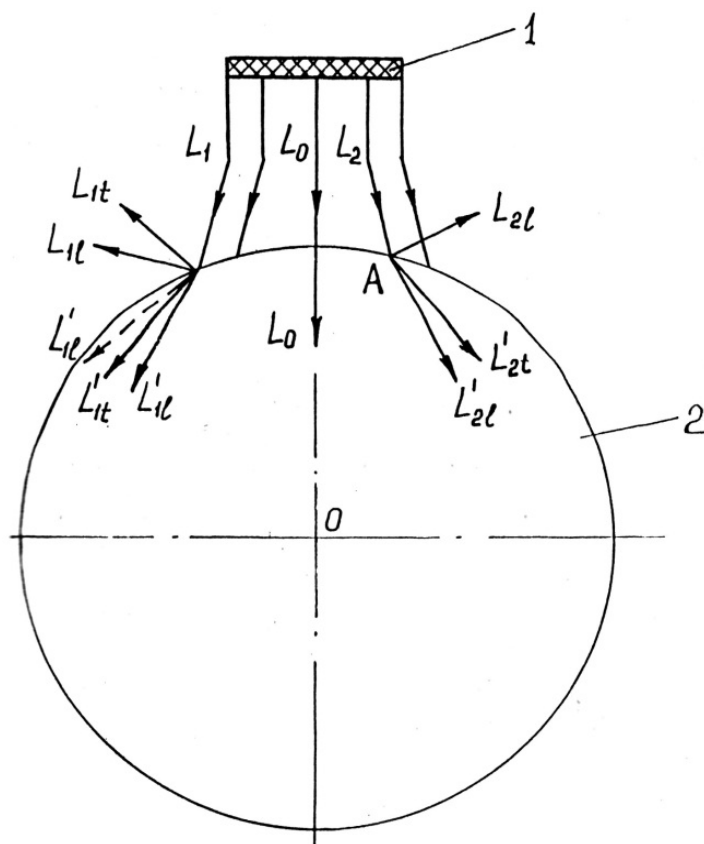
в хвилі отримується різниця в часі проходження, рівна довжині хвилі, що призводить до деструктивної інтерференції. При подвійній товщині шару через підсилюючу інтерференцію знову виходить приблизно така ж амплітуда луно-сигналу, як і у попередньому випадку. Однак перешкоджаючі коливання після імпульсу, що посиляється й після відбиттів підсилюється. Вже при шарі товщиною 1 мм отримується дуже неясне зображення; виявлення дефектів стає практично неможливим.

Стан акустичного контакту обумовлює енергію ультразвукових коливань, що збуджуються в ОК і в значній мірі впливає на результати вимірювань амплітуд луно-сигналів [104]. Це враховується при розрахунку акустичного тракту дефектоскопа шляхом врахування коефіцієнта прозорості по енергії межі ПЕП-ОК. Коефіцієнт прозорості характеризує стан акустичного контакту в певний момент часу при певному розташуванні перетворювача на поверхні досліджуваного об'єкту (контактної поверхні). В якості міри стабільності акустичного контакту в процесі сканування використовується, як основний параметр контролю луно-методом, дисперсія коефіцієнта прозорості.

Підвищення чутливості контролю трубних виробів шляхом удосконалення акустичної призми п'єзоперетворювача

За акустичного контролю трубних виробів внаслідок явища заломлення, відбиття і трансформації УЗК на межі розділу середовищ (рисунок 4.1), а також їх розфокусування зовнішньою і внутрішньою поверхнями труби сигнал, який випромінює п'єзоперетворювач, значно (до 98%) послаблюється. Це призводить до зниження достовірності контролю. Завдання щодо підвищення чутливості контролю можна вирішити збільшенням частки ультразвукової енергії, що вводиться в трубний виріб за умови, якщо всі елементарні

промені пучка УЗК будуть введені в контрольований виріб по нормалі до його зовнішньої поверхні (рисунок 4.2, тобто будуть відсутні явища відбиття, заломлення і трансформації УЗК [73].



1 – п'єзоелемент; 2 – циліндричний виріб; L_{1t} , L_{1l} – відповідно відбиті поперечна та поздовжня складові хвиль;

L'_{1t} , L'_{1l} – відповідно заломлені поперечна та поздовжня складові хвиль; L_{1p} – трансформована поверхнева хвиля

Рисунок 4.1 – Схема поширення акустичних хвиль при їх нормальному випромінюванні на циліндричну поверхню

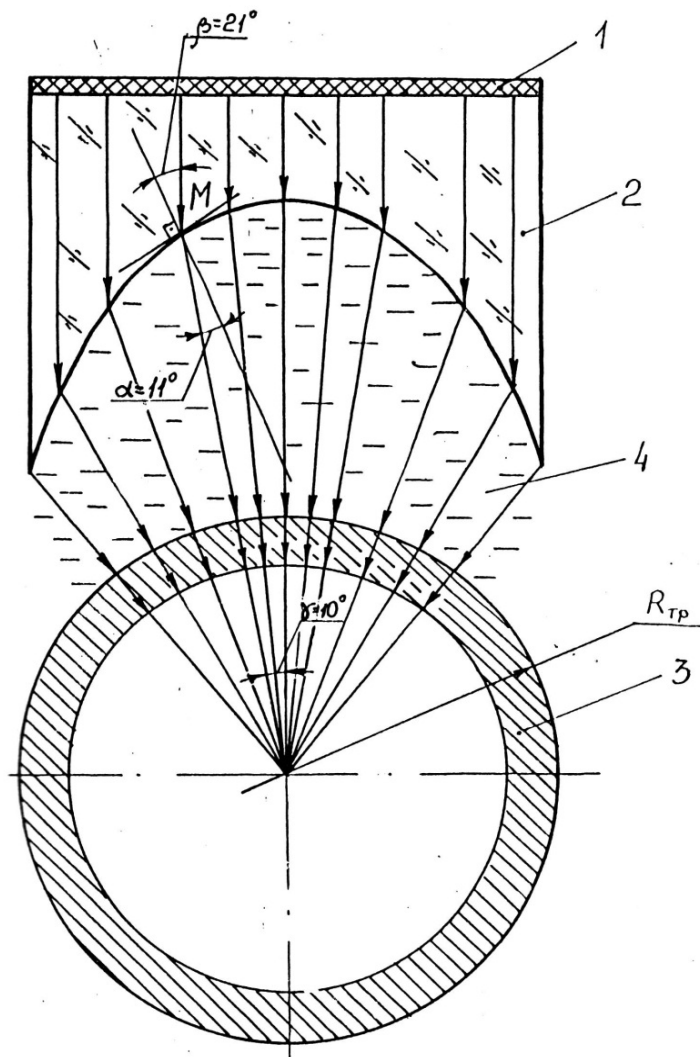


Рисунок 4.2 – Форма випромінюючої поверхні призми п'єзоперетворювача, для якої всі промені УЗК вводяться в виріб по нормалі

Досягається це за розташування осі контрольованого виробу у фокусі призми п'єзоперетворювача, випромінювальна поверхня якої виконана таким чином, що:

- кожний елементарний промінь, що виходить із випромінювальної поверхні, проходить через контактне середовище і входить у контрольований виріб циліндричної форми перпендикулярно до його зовнішньої поверхні і нормального введення УЗК;

- вертикальна складова кожного елементарного променя повинна бути перпендикулярною до зовнішньої поверхні циліндричного виробу під час введення УЗК під невеликим кутом і розміщенні перетворювача вздовж повздовжньої осі циліндричного виробу.

Для визначення виду аналітичної залежності, що визначає форму випромінювальної поверхні призми перетворювача, за якої всі елементарні УЗК будуть входити в контрольований виріб по нормалі, розглянемо систему "випромінююча поверхня призми - контактне середовище - виріб" (рисунк 4.3). Використовуючи побудови, зображені на рисунку 4.3, закон Снелліуса і теорему синусів, а також приймаючи допущення, що відстань КМ рівна (кратна) радіусу контрольованого виробу, що контролюється, після нескладних математичних перетворень отримаємо співвідношення, що визначає форму (радіус R_n) випромінюючої поверхні п'єзоперетворювача, за якої всі елементарні промені пучка УЗК будуть введені в контрольований циліндричний виріб з радіусом R_b по нормалі:

$$R_n = \frac{R_b}{\sqrt{1 + \frac{1}{n^2} - \frac{2}{n} \cos \gamma}} \quad (4.1)$$

де n - коефіцієнт заломлення УЗК на границі "матеріал призми п'єзоперетворювача - контактне середовище".

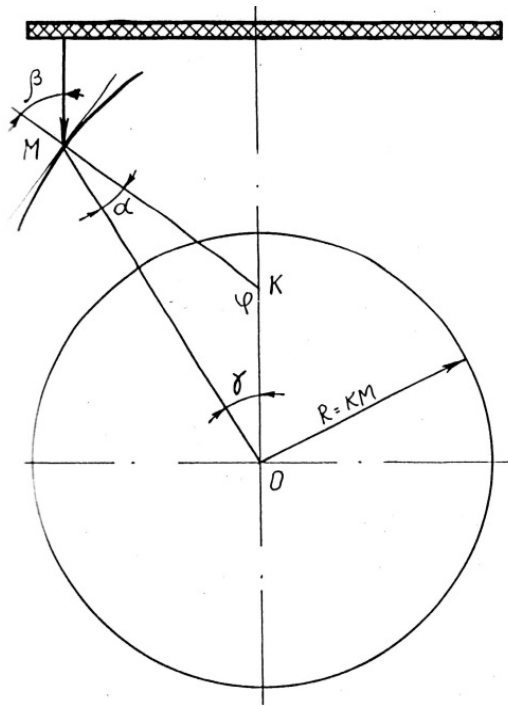


Рисунок 4.3 - Побудови для виведення залежності, яка визначає форму випромінюючої поверхні призми п'єзоперетворювача

Для побудови циліндричної або сферичної випромінюючої поверхні призми п'єзоперетворювача необхідно вираз (4.1) перевести з полярної в декартову систему координат:

$$R_e = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - \frac{2}{n} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (4.2)$$

Прийнявши відповідні позначення, одержимо:

$$A(x^2 + y^2) - B\sqrt{x^2 + y^2} - C = 0 \quad (4.3)$$

де $A = 1 + 1/n^2$; $B = 2/n$; $C = R^2\varepsilon$.

Циліндричну поверхню можна побудувати шляхом переміщення твірної, що паралельна осі OZ , по направляючій, яка описується кривою (4.3).

Сферичну поверхню отримаємо внаслідок обертання кривої (4.153) навколо осі OY . Для цього у рівнянні (4.3) змінну x слід замінити на $\sqrt{x^2 + y^2}$. Тоді одержимо рівняння еліпсоїда:

$$A(x^2 + 2y^2) - B(x^2 + 2y^2) - C = 0. \quad (4.4)$$

У випадку, коли розміри виробу значно перевищують розміри п'єзоелементу, тоді $\cos \gamma = 1$, і співвідношення (4.151) приймає вигляд:

$$R_n = R_u \left(\frac{n}{n-1} \right). \quad (4.5)$$

На рисунку 4.2 показано приклад побудови випромінюючої поверхні призми п'єзоперетворювача для конкретного випадку - контроль бурильної труби діаметром 114мм. УЗК, що випромінюються п'єзоелементом 1, який знаходиться у призмі 2, виготовленої з оргскла, через шар контактної рідини вводяться в бурильну трубу 1, причому форма випромінюючої поверхні така, що всі елементарні промені УЗК вводяться в тіло труби по нормалі, про що свідчить перевірка побудови: ($\beta = \alpha + \gamma$, $\beta = 21^\circ$, $\alpha = 11^\circ$, $\gamma = 10^\circ$). Отже, п'єзоперетворювачі, випромінююча поверхня яких виконана з врахуванням виразу (4.1), дають можливість вводити всі елементарні промені пучка УЗК по нормалі до поверхні контрольованого виробу, що призводить до значного поліпшення таких параметрів ультразвукового контролю, як чутливість та роздільна здатність, спрямованість випромінювання [73].

Залежність (4.1) справедлива для різних комбінацій "матеріал призми - контактна рідина" та різноманітних форм

контрольованих виробів (ввігнута, опукла), може бути застосованою при контролі сферичних виробів, а також при ультразвуковому контролі виробів з криволінійними поверхнями довільної форми (гофри, різноманітні посудини, кожухи реакторів тощо), при цьому кожен криволінійну поверхню можна розглядати як площину, яка має цілий ряд визначених радіусів кривизни.

З виразу (4.1) були визначені величини вектора R_n для різних типорозмірів бурильних труб (таблиця 4.1).

Вибрана за найбільшим коефіцієнтом кореляції залежність, що характеризує зв'язок між R_n та γ , має вигляд:

$$R_n = A + B\gamma^3. \quad (4.6)$$

Таблиця 4.1 - Результати аналітичного визначення форми випромінювальної поверхні призми п'єзоперетворювача для нормального вводу УЗК

Діаметр труби, мм	R_n , мм					
	$\gamma=0^\circ$	$\gamma=2^\circ$	$\gamma=4^\circ$	$\gamma=6^\circ$	$\gamma=8^\circ$	$\gamma=10^\circ$
60	33,95	33,89	33,44	33,43	33,04	32,56
89	50,36	50,27	49,61	49,56	49,01	48,30
114	64,51	64,39	63,54	63,51	62,78	61,87
127	71,86	71,73	71,79	70,75	69,94	68,93
140	79,44	79,07	78,03	78,00	77,11	75,98
168	95,06	94,89	93,64	93,15	91,10	89,61

У результаті досліджень поширення високочастотних пружних хвиль у напружено-деформованих середовищах зі складним неоднорідним розподілом напружень розроблено новий підхід, в якому використовується введення ефективного середовища зі зведеними модулями пружності, залежними від просторового розподілу поперечних напружень. Це дало змогу зводити завдання з поширення хвиль у середовищах з неоднорідним напружено-деформованим станом до

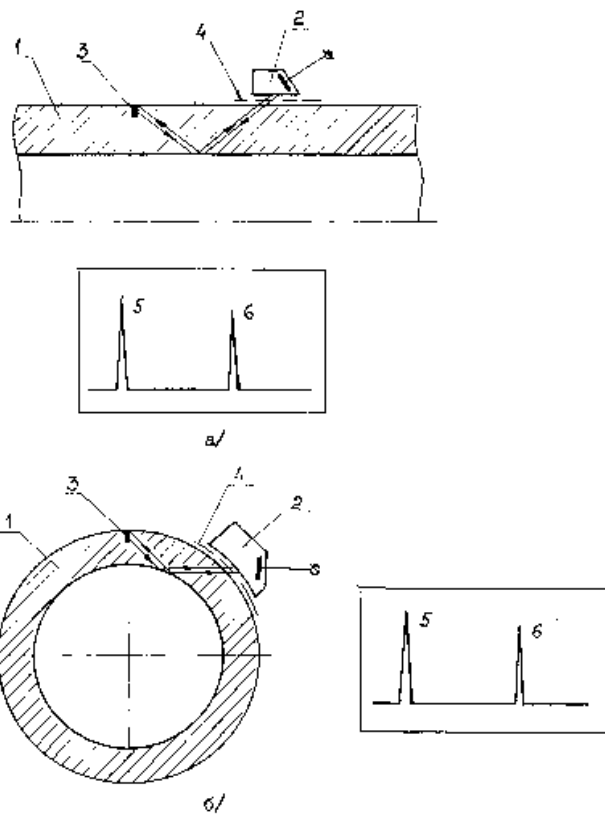
поширення хвиль у слабо неоднорідних середовищах, а також використовувати променевий метод для дослідження закономірностей поширення пружних хвиль у середовищах із плоско-та циліндрично-сферичним розподілом напружень.

Визначення оптимальних технічних характеристик п'єзоелектричних перетворювачів для підвищення чутливості ультразвукового методу контролю трубних виробів

Найбільш прийнятним для вирішення задач по НК сталевих обсадних труб є акустичний імпульсний луно-метод [38, 105, 106]. Цей метод ґрунтується на введенні в контрольовану ділянку труби коротких імпульсів акустичних коливань і прийманні відбитих луно-сигналів від дефекту або поверхні труби. По амплітуді відбитих сигналів судять орієнтовно про величину виявленого дефекту, а по часу від моменту посилки імпульсів акустичних коливань до моменту приймання луно-сигналів визначають віддаль до дефекту або товщину стінки труби. Висока стабільність акустичного контакту при цьому досягається завдяки імерсійному способу вводу і прийому УЗК [107].

Основними характеристиками імпульсного луно-методу, які визначають область та ефективність його застосування є: чутливість, розподільна здатність, протяжність мертвої зони, точність визначення координат і розмірів дефектів. Значна частина досліджень була пов'язана з розробкою способів дефектоскопії і товщинометрії тіла СОТ. В основу способу дефектоскопії тіла закладений імпульсний луно-метод при суміщеній схемі включення ПЕП, а в основі способу товщинометрії - імпульсний луно-метод при роздільно-суміщеній схемі включення ПЕП. Суть акустичного способу контролю тіла сталевих обсадних труб на наявність поперечних та поздовжніх дефектів полягає в наступному (рисунк 4.4 а, б). Акустичні коливання від п'єзопластини

ПЕП через шар контактної рідини і вводиться під певним кутом у тіло контрольованої труби 1. За наявності дефекта 3, акустичні коливання відбиваються від його поверхні і приймаються п'єзопластиною ПЕП 2, а на екрані ЕПТ дефектоскопа спостерігається чіткий луно-імпульс 6.



1- сталеві обсадна труба; 2- ПЕП; 3- дефект; 4- контактна рідина; 5- зондувальний імпульс; 6- луно-імпульс від дефекту

Рисунок 4.4 – Спосіб акустичного контролю тіла СОТ на наявність дефектів поперечної (а) та поздовжньої (б) орієнтації

Суть акустичного способу НК товщини стінки тіла СОТ полягає в тому, що акустичні коливання від п'єзопластини 3 (рисунок 4.5) через шар контактної рідини 5 вводяться в тіло контрольованої труби 1. Відбиті від донної поверхні II труби акустичні коливання приймаються п'єзопластиною 4 перетворювача 2. Про товщину стінки труби судять по величині часового інтервалу t між луно-імпульсом 7, відбитим від зовнішньої поверхні труби (поверхні I) і луно-імпульсом 8, відбитим від донної поверхні (поверхні II).

Для контролю трубних виробів в основному застосовують поперечні хвилі, які розповсюджуються по зигзагоподібному шляху (рисунок 4.5). Вони звичайно збуджуються при похилому прозвучуванні поздовжніми хвилями через п'єзодіафрагму або воду в результаті заломлення або перетворення моди. Їхньою важливою перевагою перед поздовжніми хвилями, які розповсюджуються під кутом, є те, що вони при кутах заломлення більше 33° в сталі виходять з місця заломлення у вигляді єдиної хвилі та без розщеплення [38, 108].

Згідно [38], при контролі труб можна охопити тільки деяку граничну товщину (рисунок 4.6), для якої існує вираз

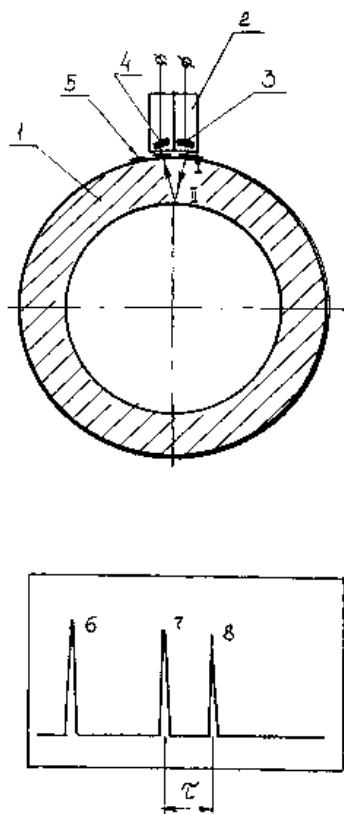
$$d_{max}/D=0,5(1-\sin\alpha), \quad (4.7)$$

де d_{max} – максимальна глибина прозвучування при контролі труб діаметром D з заданим кутом α вводу ультразвукових коливань.

Так при роботі з нахиленими поперечними хвилями в сталі практично можливі тільки кути заломлення більше 33° (кут призми 27°), труби можна проконтролювати тільки на $0,22$ їх діаметра, або приблизно на п'яту частину їх діаметра.

В роботі [108] ставиться задача по вибору оптимального кута введення ультразвукових коливань у тіло труби з врахуванням того, що для підвищення вірогідності контролю луно-методу необхідно забезпечити, по можливості,

однаковий рівень луно-сигналів від рівнозначних дефектів, розташованих на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки труби. При цьому компенсація загасання амплітуд луно-сигналів внаслідок поширення в матеріалі досягається електронними способами.



1- тіло СОР; 2- ПЕП; 3- випромінююча п'єзопластина; 4 - приймальна п'єзопластина; 5- контактна рідина; 6- зондувальний імпульс; 7- луно-імпульс від поверхні I; 8- луно-імпульс від поверхні II

Рисунок 4.5 – Акустичний спосіб НК товщини стінки тіла СОР

Згідно [108], умовою одержання максимального рівня луно-сигналу від двогранного кута є орієнтація променя вздовж його бісектриси, тобто коли $\alpha_t = \delta$ (рисунок 4.6), де

$$\alpha_t = \arcsin(c_t \sin \beta_e / c_e) \quad (4.8)$$

- кут вводу ультразвукових коливань, розрахований по формулі Снеліуса; β_e - кут призми похилого перетворювача; c_t, c_e - швидкості хвиль зсуву в об'єкті контролю і подовжніх хвиль у призмі перетворювача відповідно (залежить від характеристик матеріалів призми перетворювача й об'єкта контролю).

Оптимальний кут призми β_e , визначається з умови рівності луно-сигналів від дефектів на внутрішній і зовнішній поверхні стінки труби [109, 110]. З врахуванням того, що $\delta > \alpha$ (рисунок 4.7), досягнення зазначеної рівності рівнів можливо у випадку, коли

$$45^\circ - \alpha = \delta - 45^\circ. \quad (4.9)$$

Оптимальний кут призми [108] обраховується за формулою

$$\beta_{opt} = \arcsin \left[\frac{rc_e}{c_t \sqrt{R^2 + r^2}} \right] \quad (4.10)$$

де R, r – відповідно зовнішній та внутрішній радіуси контрольованої труби.

Таким чином, враховуючи формули (4.7), (4.10), можна записати систему рівнянь для визначення оптимального кута призми п'єзоелектричного перетворювача для виявлення дефектів поперечної орієнтації:

$$\left\{ \frac{d_{max}}{D} = 0,5 \left(1 - \frac{c_t \cdot \sin \beta_e}{c_e} \right), \beta_{opt} = \arcsin \left[\frac{rc_e}{c_t \sqrt{R^2 + r^2}} \right], \right. \quad (4.11)$$

або

$$27^\circ \leq \beta_{opt} \leq \beta_{max}, \quad (4.12)$$

$$\text{де } \beta_{\max} = \arcsin \left[\frac{c_e}{c_i} \left(1 - \frac{2d_{\max}}{D} \right) \right].$$

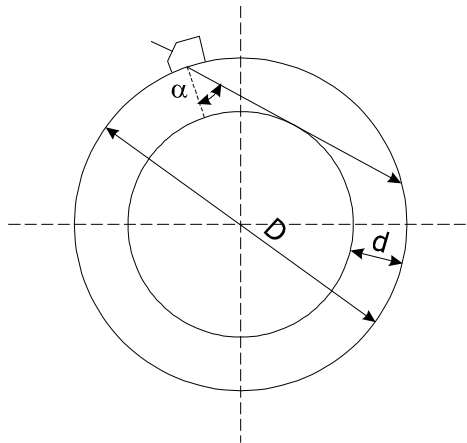


Рисунок 4.6 – Максимальна глибина прозвучування при контролі труб з заданим кутом вводу ультразвукових коливань

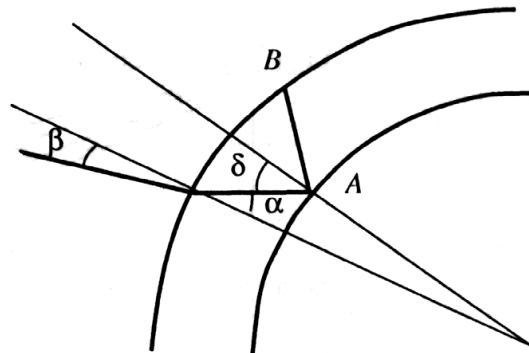


Рисунок 4.7 – Контроль дефекту на внутрішньої *A* и зовнішній *B* поверхні стінки труби луно-методом

Розраховані максимальні значення кутів заломлення $\alpha_{\text{опт}}$, кутів призми перетворювачів $\beta_{\text{опт}}$ та β_{max} за формулою **Ошибка! Источник ссылки не найден.** наведені в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Розрахункові максимальні значення кутів заломлення $\alpha_{\text{опт}}$, кутів призми перетворювачів $\beta_{\text{опт}}$ та β_{max}

Діаметр труби, мм	d_{max} , мм	$\alpha_{\text{опт}}$, град.	$\beta_{\text{опт}}$, град.	α_{max} , град.	β_{max} , град.
114	10.2	39.388	31.49	55.19	42.521
127	10.2	40.009	31.953	57.074	43.705
140	10.5	40.365	32.217	58.212	44.403
146	10.7	40.478	32.301	58.586	44.629
168	12.1	40.562	32.363	58.865	44.797
178	15.0	39.742	31.755	56.249	43.191
194	15.1	40.175	32.077	57.6	44.029
219	14.2	41.034	32.712	60.496	45.76
245	15.9	41.03	32.709	60.482	45.752
273	16.5	41.319	32.922	61.536	46.358
299	14.8	42.019	33.436	64.29	47.875
324	14.0	42.414	33.726	66.005	48.767
340	15.4	42.284	33.63	65.424	48.469
351	12.0	42.973	34.133	68.689	50.075
377	12.0	43.117	34.238	69.446	50.423
406	16.7	42.544	33.82	66.597	49.065
426	12.0	43.34	34.4	70.676	50.968
473	11.1	43.623	34.605	72.376	51.678
508	16.1	43.125	34.244	69.491	50.443

Отже, як видно з Таблиці 4.2, для типорозмірів труб, що підлягають контролю, значення оптимального кута призми

знаходиться в межах $40^\circ \leq \alpha_{\text{опт}} \leq 44^\circ$, а максимальне значення кута вводу в залежності від типорозміру – в межах $55^\circ \leq \alpha_{\text{max}} \leq 72^\circ$. Таким чином, оптимальні кути вводу не перевищують максимально допустимих кутів заломлення.

В процесі подальших експериментальних досліджень розраховані кути вводу можуть бути уточнені.

Підвищення чутливості ультразвукового контролю обсадних колон

Для контролю геометричних параметрів можна використати ряд відомих способів контролю трубних виробів з їх внутрішньої поверхні [112], але для контролю обсадних колон вони мають ряд недоліків.

1. Спосіб з використанням неперервного вимірювання вздовж декількох твірних колони обсадних труб, розміщених рівномірно в площині поперечного перерізу труби [113], з використанням багатоканальної системи контролю. За поточними даними вимірювання шляхом апроксимації можна отримати наближену інформацію про інші ділянки поперечного перерізу. При цьому перетворювачі можна розмістити на важелях притискного пристрою. Потрібно відзначити, що для випадку внутрішньотрубного контролю вздовж трьох твірних не можна застосувати відому методику визначення екстремальних значень товщини стінки в поперечному перерізі та ексцентриситету для контролю із зовнішньої поверхні труб [112]. Навіть при розробці нового алгоритму апроксимації результатів внутрішньотрубного контролю, його не доцільно використовувати для обсадних колон, де досить часто присутнє нерівномірне зношення поверхні труб, через низьку вірогідність та інформативність такого способу.

Також потрібно відзначити, що збільшення кількості контрольованих твірних веде за собою ускладнення апаратурного забезпечення глибинної частини, для якої

існують певні обмеження в габаритах, щоб забезпечити її прохідну здатність вздовж колони, а їх мала кількість приводить до недостатньої інформативності контролю.

В якості первинних перетворювачів тут, як правило, використовуються прямі роздільно-суміщені п'єзоелектричні перетворювачі, так як контроль проводиться в ближній зоні перетворювача (акустичний контакт через незначну товщу акустичної рідини).

2. Відомий спосіб [38] ультразвукового контролю труб імпульсним луна-імпульсним методом, при якому прямий перетворювач вводять всередину контрольованої труби, випромінюють ним ультразвукові коливання в осьовому напрямку, а перед перетворювачем розміщують дзеркало під кутом 45° , що відхиляє промені до стінки труби.

Відбиття від внутрішньої та зовнішньої стінок потрапляють зворотнім шляхом на перетворювач, і, вимірюючи часові інтервали між відбиттями, визначають необхідні геометричні параметри. Обертанням дзеркала та повздовжнім переміщенням системи “перетворювач-дзеркало” забезпечується сканування поверхні труби по гвинтовій лінії. Кривизна дзеркала додатково дозволяє фокусувати акустичні коливання [38]. Такий спосіб компанія *Pan American Industries Inc* використовує для діагностики бойлерних труб, теплообмінників та систем водопостачання. Недоліком такого способу є те, що сканування поверхні труби здійснюється по гвинтовій лінії, і тому з його допомогою не можна отримати розподіл геометричних параметрів труби в кожному її поперечному перерізі. Необхідність обертання відбивача ускладнює конструкцію та знижує надійність роботи способу.

3. Спосіб ультразвукового контролю розмірів труб [113], в якому перетворювачі розміщують по колу, центр якого співпадає з поздовжньою віссю контрольованої труби, випромінюють в декількох напрямках ультразвукові імпульси,

приймають відбиті від внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби, і за різницею часу прийнятих сигналів визначають характер зношення. Недоліком такого способу є наявність великої кількості первинних перетворювачів, тому при контролі труб малих діаметрів його важко реалізувати.

Для усунення недоліків цих способів авторами розроблено два нових способи, на які отримано патенти України на винахід [114]. Визначальними у розробці способів неруйнівного контролю обсадних колон є високі вимоги до надійності роботи, тому що втрутитися і оперативно внести корективи в роботу системи під час контролю неможливо, а також конструктивні особливості самого об'єкта контролю, який є досить складним з точки зору можливості проведення неруйнівного контролю (обсадна колона – це об'єкт з одностороннім доступом і для сканування при проведенні контролю доступна тільки внутрішня поверхня труб; великі глибини проведення контролю вимагають передачі вимірювальної інформації на великі віддалі та конструктивного поділу засобів контролю на глибинну та наземну частини; обмежений внутрішній простір колони для розміщення апаратури глибинної частини під час контролю; складні умови проведення контролю: високі тиски, температура, магнітні завади тощо). З огляду на такі вимоги основна увага приділялась використанню в способі тільки одного ультразвукового перетворювача та безобертової системи сканування для того, щоб підвищити прохідну здатність засобу контролю в колоні за рахунок якомога менших його розмірів та надійність роботи глибинної апаратури.

Такий принцип побудови можна реалізувати шляхом відхилення від поздовжньої осі труби по радіусах до її стінки ультразвукових коливань (УЗК), що випромінюються перетворювачем вздовж труби, використовуючи конусоподібний відбивач з кутом нахилу твірних під 45° .

Відбиті коливання від стінки труби приймаються тим же шляхом, але у зворотному напрямку. Таке технічне рішення використане в розроблених способах контролю.

Використання першого чи другого з розроблених способів залежить від поставлених задач контролю, а при їх поєднанні вони добре доповнюють один одного та дозволяють підвищити вірогідність отриманого результату.

Перший розроблений спосіб

Спосіб призначений для контролю геометричних параметрів внутрішньої поверхні труб обсадних колон (величини зношення, радіусу та форми) і дозволяє отримати результат у вигляді інтегрального розподілу контрольованих параметрів та оцінити вагомість кожного значення в поперечному перерізі. Відбивач виконаний у вигляді конуса з кутом нахилу твірних 45° (рисунок 4.8). При такій конструкції відбивач повинен розміщуватися в корпусі 4, що є перешкодою для поширення ультразвуку.

Тому в місці проходження ультразвуку корпус повинен мати якомога меншу товщину стінки для того, щоб мінімізувати втрати енергії випромінювання. Ця частина корпусу повинна також виготовлятися з матеріалу, що має низький акустичний імпеданс, для того, щоб забезпечувалася велика прохідна здатність ультразвуку для межі розділу корпусу з контактним середовищем.

Матеріал конуса повинен забезпечувати високий коефіцієнт відбиття поздовжньої ультразвукової хвилі. Це забезпечується його великим характеристичним опором, в порівнянні з контактним середовищем. Для даного випадку цей параметр не є критичний, так як на межі розділу середовищ контактної рідини та відбивача ультразвук падає під кутом 45° , який більший за третій критичний кут для більшості твердих тіл в парі з водою. В таких випадках відбувається повне відбиття падаючої хвилі [115].

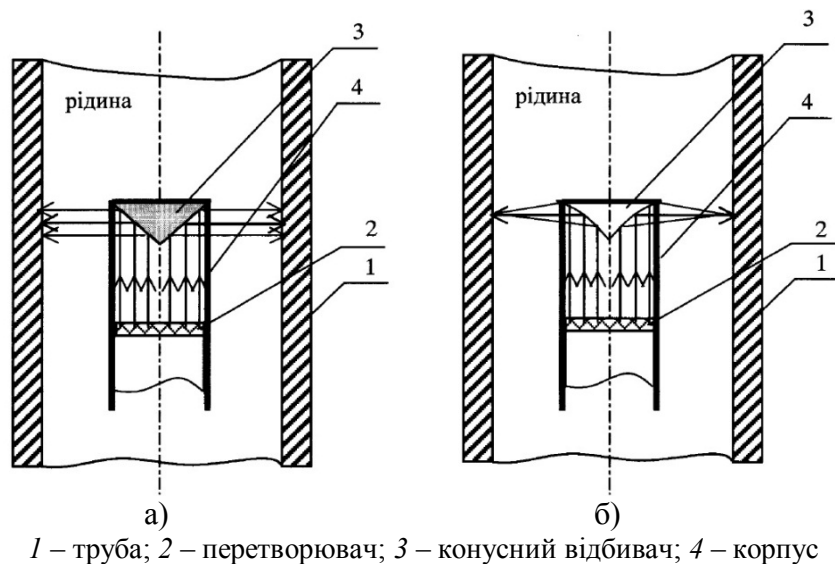


Рисунок 4.8 - Схема реалізації способу контролю геометричних параметрів внутрішньої поверхні та форми поперечного перерізу труб (а – без фокусування, б – з фокусувальним відбивачем)

Суть способу полягає в тому, що УЗК, збуджені перетворювачем 2, через контактну рідину поширюються в напрямку відбивача 3 і відбиваються ним по радіусах до стінки труби в усіх напрямках, пройшовши, і, частково відбившись при цьому, через стінку корпусу 4. Далі УЗК відбиваються від внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби і потрапляють на перетворювач тим же шляхом, але в зворотному напрямку. Аналізуючи прийнятий відбитий від внутрішньої поверхні сигнал (розміщення в часі відбитих імпульсів та їх амплітуду), можна визначити характер зношення цієї поверхні труби та її форму (для цього розраховують шлях від відбивача до поверхні труби), використовуючи значення швидкості $c_{\text{конт.рід.}}$ поширення

ультразвуку у контактному середовищі). Інформативний інтервал часу t_{inf} при цьому вираховується з часу приходу імпульсу $t_{вим}$ з врахуванням часу затримки $t_{затр}$ (від перетворювача до відбивача) згідно з формулою:

$$t_{inf} = t_{вим} - t_{затр} = t_{вим} - L / c_{конт.рід}, \quad (4.13)$$

де L – віддаль від перетворювача до відбивача; $t_{вим}$ – вимірний час приходу імпульсу.

Слід відзначити, що при реалізації способу потрібно шляхом регулювання чутливості акустичного тракту позбавитись приходу імпульсів, відбитих від зовнішньої поверхні труби. Справа в тому, що за рахунок великої різниці швидкостей поширення поздовжньої ультразвукової хвилі у воді, яке є контактною рідиною, та сталі (приблизно в чотири рази швидкість у сталі більша), при нерівномірному зношенні труби, сигнали, відбиті від внутрішньої та зовнішньої поверхонь, будуть накладатися одні на одних, і інтерпретація результатів буде досить складно. Для збільшення інтенсивності прийнятого сигналу від внутрішньої поверхні та роздільної здатності контролю можна сфокусувати на поверхні труби ультразвукові коливання відхилені відбивачем. Для цього бічну поверхню конусного відбивача слід зробити вгнутою вздовж твірних (рисунк 4.8, б).

Запропонований спосіб має свої переваги та свої недоліки. До переваг належать простота та надійність конструкції, можливість одночасного контролю всього поперечного перерізу та оцінки вагомості кожного виміряного числового значення в проконтрольованому перерізі за амплітудою імпульсу. Недоліками слід вважати неможливість ідентифікації багатостороннього зношення (луна-імпульси від пошкоджень однакової глибини, розміщених в різних місцях поперечного перерізу, зареєструються одночасно), а також складність застосування для контролю товщини стінки у випадку значного нерівномірного зношення внутрішньої поверхні.

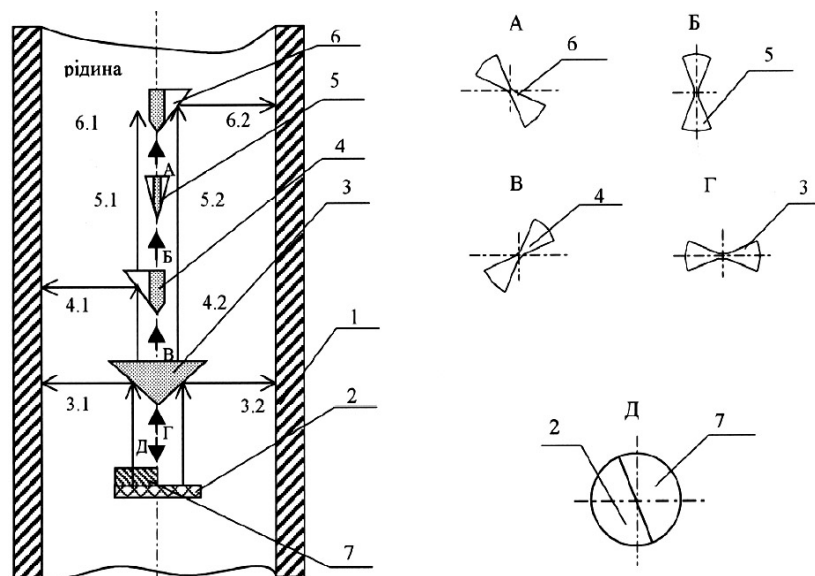
Другий розроблений спосіб

Даний спосіб призначений для контролю геометричних параметрів внутрішньої та зовнішньої поверхонь і вимірювання товщини стінки і дозволяє отримати розподіл контрольованих параметрів у поперечному перерізі. В ньому реалізований той самий принцип, що і в попередньому способі, але для досягнення мети використовується значно складніша конструкція відбивача та процедура обробки прийнятої інформації. Відбивач виконаний у вигляді n симетричних конусоподібних частин з кутом нахилу твірних 45° . Кожна наступна частина відбивача зміщена відносно попередньої (вздовж осі труби 1, рисунок 4.9), щоб прийняті від неї сигнали, відбиті від стінки труби, попадали на перетворювач 2 в часі, відмінному від часу приходу сигналів, відбитих від інших частин (рисунок 4.10, а, сигнали 3.2, 4.2, 5.2 та 6.2). Крім цього, кожна наступна частина відбивача повернена відносно попередньої на кут $360^\circ/(2n)$, достатній для охоплення при скануванні всього периметру труби. На рисунку 4.9 показано варіант реалізації способу з використанням чотирьох відбивачів 3–6.

Для розділення сигналів від одного відбивача (від його лівої та правої частин) перед перетворювачем потрібно встановити прискорювальну призму 7 так, щоб вона перекривала половину діаграми направленості акустичного поля перетворювача та одну половину кожного з відбивачів (рисунок 4.10). При цьому додатково з'являються сигнали 3.1, 4.1, 5.1 та 6.1 (рисунок 4.10, а). Завдяки такій конструкції можна рознести в часі прийняті інформативні сигнали від різних частин поперечного перерізу труби.

Фізична суть способу полягає в наступному. Перетворювачем 2 збуджуються ультразвукові коливання, які поширюються через контактну рідину в напрямку відбивачів 3, 4, 5 та 6. Половина випроміненого акустичного поля проходить також через прискорювальну призму 7, долаючи

межу розділу двох середовищ – матеріалу призми та контактної рідини.



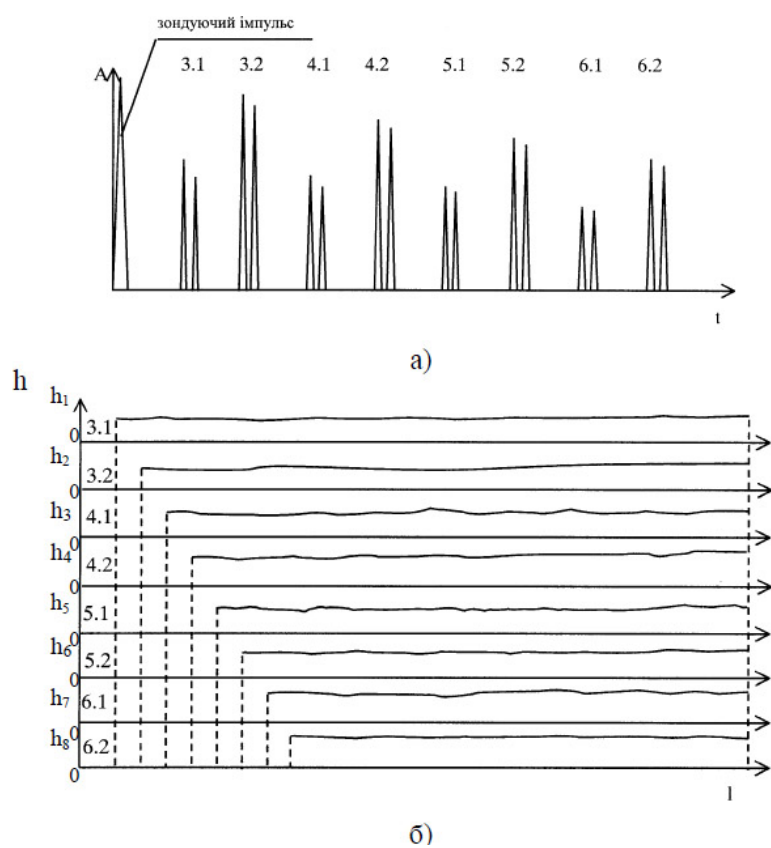
1 – труба; 2 – перетворювач; 3-6 – конусоподібні відбивачі;
7 – прискорювальна призма

Рисунок 4.10 - Схема реалізації способу з використанням чотирьох конусоподібних відбивачів

Відбивачами 3–6 ультразвукові коливання відхиляються по радіусах труби до її стінки в двох протилежних напрямках (рисунок 4.10). Прискорювальна призма 7 розділяє в часі діаграму направленості перетворювача, щоб в результаті досягти розділення сигналів, прийнятих від одного відбивача.

Потрібне розділення часу приходу сигналів 3.1, 4.1, 5.1 та 6.1 забезпечується відповідною товщиною призми, знаючи віддаль між відбивачами та швидкість ультразвуку в матеріалі призми (потрібно, щоб призма якомога менше послаблювала акустичний сигнал, тому матеріал для її виготовлення

повинен вибиратися з огляду на високу швидкість проходження поздовжньої ультразвукової хвилі, малі коефіцієнт її загасання та хвильовий опір).



a – часова розгортка прийнятого сигналу, яка ілюструє повний цикл приходу імпульсів на перетворювач від чотирьох відбивачів; *b* – графічне зображення результату контролю товщини стінки h труби на довжині l

Рисунок 4.10 - Приклад реалізації способу

Далі частина ультразвукових коливань відбивається від внутрішньої поверхні труби, а решта проходить в її стінку та відбивається від зовнішньої поверхні. Відбиті коливання попадають на перетворювач тим же шляхом, але в зворотному напрямку. За розміщенням в часі пари імпульсів, відбитих від внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби, можна визначити її геометричні параметри: товщину стінки, діаметр, форму та фактичне зношення внутрішньої і зовнішньої поверхонь труби. За допомогою кожного з відбивачів можна виміряти два значення товщини стінки та значення внутрішнього діаметра (шляхом вимірювання часу приходу поверхневого та донного імпульсів).

За аналогічним принципом, як і в попередньому способі, вираховується інформативний час для кожного імпульсу з врахування затримки згідно з формулами:

$$\begin{aligned}
 & t_{\text{вим}1} - t_{\text{затр}1} & t_{\text{вим}2} - t_{\text{вим}1} \\
 & t_{\text{вим}3} - t_{\text{затр}3} & t_{\text{вим}4} - t_{\text{вим}3} \\
 & t_{\text{вим}5} - t_{\text{затр}5} & t_{\text{вим}6} - t_{\text{вим}5} \\
 & t_{\text{вим}7} - t_{\text{затр}7} & t_{\text{вим}8} - t_{\text{вим}7} \\
 t_{\text{інф}D_i} = & t_{\text{вим}9} - t_{\text{затр}9} & , t_{\text{інф}h_i} = & t_{\text{вим}10} - t_{\text{вим}9} & , & (4.14) \\
 & t_{\text{вим}11} - t_{\text{затр}11} & t_{\text{вим}12} - t_{\text{вим}11} \\
 & t_{\text{вим}13} - t_{\text{затр}13} & t_{\text{вим}14} - t_{\text{вим}13} \\
 & t_{\text{вим}15} - t_{\text{затр}15} & t_{\text{вим}16} - t_{\text{вим}15}
 \end{aligned}$$

де $t_{\text{інф}D}$ – інформативний час для визначення геометричних параметрів внутрішньої поверхні, наприклад, діаметра (стосується імпульсів, відбитих від внутрішньої поверхні); $t_{\text{інф}h}$ – інформативний час для визначення товщини стінки та геометричних параметрів зовнішньої поверхні.

Геометричні розміри в кожному поперечному перерізі розраховуються через відповідні швидкості ультразвуку згідно з формулами:

$$Di = \frac{(t_{\text{інф.}D1} + t_{\text{інф.}D2}) \cdot c_{\text{конт.}p\text{іd}}}{2}, \quad h_i = \frac{t_{\text{інф.}h1} \cdot c_{cm}}{2} \quad (4.15)$$

$$\frac{(t_{\text{інф.}D3} + t_{\text{інф.}D4}) \cdot c_{\text{конт.}p\text{іd}}}{2}, \quad \frac{t_{\text{інф.}h2} \cdot c_{cm}}{2}$$

$$\frac{(t_{\text{інф.}D5} + t_{\text{інф.}D6}) \cdot c_{\text{конт.}p\text{іd}}}{2}, \quad \frac{t_{\text{інф.}h3} \cdot c_{cm}}{2}$$

$$\frac{(t_{\text{інф.}D7} + t_{\text{інф.}D8}) \cdot c_{\text{конт.}p\text{іd}}}{2}, \quad \frac{t_{\text{інф.}h4} \cdot c_{cm}}{2}$$

$$\frac{t_{\text{інф.}h5} \cdot c_{cm}}{2}$$

$$\frac{t_{\text{інф.}h6} \cdot c_{cm}}{2}$$

$$\frac{t_{\text{інф.}h7} \cdot c_{cm}}{2}$$

$$\frac{t_{\text{інф.}h8} \cdot c_{cm}}{2}$$

де c_{cm} – швидкість поширення ультразвукової хвилі в сталі.

За отриманими значеннями, шляхом апроксимації результатів, відтворюється поперечний переріз труби.

Таким чином, спеціальної конструкції відбивач та призма розбивають прийняту інформацію в часі на $2n$ каналів, що дозволяє отримати детальну інформацію про розподіл контрольованих параметрів в поперечному перерізі труби, підвищити інформативність та вірогідність контролю. Розділення сигналів від одного відбивача дозволяє отримати зручну можливість визначення діаметру труби. Для цього можна також використати замість призми водяну лінію затримки (змістити частини відбивача або використати

перетворювач спеціальної конструкції). Запропонований спосіб дозволяє отримати при чотирьох відбивачах вісім інформаційних каналів, розділених у часі, з використанням одного вимірювального каналу. Кожен з n конусоподібних відбивачів дозволяє контролювати $1/n$ частину поверхні труби, але в реальному часі отримана інформація стосується n різних перерізів. Знаючи числові значення затримки сигналів між відбивачами, можна відтворити реальну картину розподілу проконтрольованих параметрів по периметру труби при обробці результатів контролю (рисунок 4.10, б). Конкретна, оптимальна, кількість відбивачів буде вибиратися під час експериментальної оцінки способу, а визначальним у виборі повинна бути ефективна площа бічної відбиваючої поверхні (достатня для прийняття акустичних сигналів) та максимальна віддаль для розділення їх в поздовжньому напрямі (з огляду на габарити акустичного блока та затухання акустичного сигналу).

Теоретичні дослідження з розробки п'єзоелектричних перетворювачів для підвищення чутливості контролю обсадних колон

Як відомо, ультразвукові перетворювачі є одними з основних елементів акустичних засобів контролю, які в значній мірі визначають їх ефективність, чутливість та вірогідність. Тому слід велику увагу приділяти вибору перетворювача, який повністю відповідає умовам контролю. Первинні перетворювачі повинні, перш за все, забезпечити необхідне для проведення вимірювань співвідношення інформаційних сигналів та шуму. В число технологічних вимог до перетворювачів теж входять механічна, теплова та хімічна стійкість всієї конструкції та окремих його елементів [116–119].

При проведенні неруйнівного контролю обсадних колон в свердловині доводиться мати справу з високою

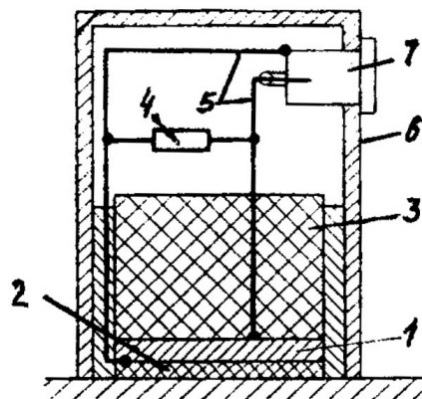
температурою та тиском. Проведення обстеження такого об'єкта пов'язане з рішенням питань забезпечення роботи технічних засобів контролю в умовах, характерних до умов його експлуатації. При оцінці технічного стану обсадних колон засоби контролю тривалий час повинні знаходитися під дією експлуатаційних факторів, занурені в рідке середовище.

Основною причиною, що стримує широке використання акустичного методу для контролю обсадних колон, є відсутність серійних первинних перетворювачів, які могли б протягом тривалого часу працювати в таких умовах експлуатації. Більшість існуючих ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів може працювати при температурах до 50 °С, при низьких тисках і не є герметичними. Аналогічна проблема виникла і при розробці глибинної акустичної апаратури для контролю геометричних параметрів обсадних колон. Потрібно було розробити суміщений прямий п'єзоелектричний перетворювач поздовжньої хвилі, який би відповідав таким вимогам: робоча частота – 2,5 та 5 МГц; максимальна робоча температура – 100-150 °С; максимальний робочий тиск - до 60-100 МПа; повна герметичність; імерсійний варіант контролю в технічній воді (перетворювач повністю занурюється у воду); висока чутливість; тривалий час безперервної роботи – близько 8 годин.

Провівши детальний аналіз ринку та літературних джерел, було зроблено висновок, що існуючі серійні перетворювачі не можуть застосовуватися в широкому діапазоні температури через те, що вони містять елементи з невисокою теплостійкістю та різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення.

При проектуванні перетворювачів вихідними даними для розрахунку є механічні, електромеханічні і електричні характеристики матеріалів, що будуть використовуватися. Першим кроком є підбір матеріалів для всіх конструктивних

елементів: чутливого п'єзоелементу, демпфера, протектора, корпусу (рисунок 4.11), а вже наступним – способи їх монтажу в єдину конструкцію.



1 – п'єзопластина; 2 – захисний шар; 3 – демпфер; 4 – електричне узгодження; 5 – провід; 6 – корпус; 7 – роз'єм

Рисунок 4.11 - Загальна конструкція прямого суміщеного перетворювача

За останні роки не пройшло якихось радикальних змін в застосуванні матеріалів (п'єзоелементів та ін.) для виготовлення п'єзоперетворювачів. Матеріал перетворювача вибирається в залежності від передбачуваної мети його використання. За відомими константами матеріалів [120] можна підібрати найбільш ефективний матеріал для конкретної задачі. Основна увага при виборі звертається на такі критерії як коефіцієнт електромеханічного зв'язку, механічна добротність, п'єзоелектрична стала, діелектрична проникність, хвильовий опір, температура перетворення [121]. Не існує оптимального п'єзоелектричного матеріалу взагалі, кожний має свої переваги та недоліки. Основними вимогами, на які зверталася увага при виборі чутливого елемента

(п'єзоелементу), були: високий електроакустичний ККД в імпульсному режимі випромінювання та приймання, технологічність виготовлення та відносно висока термостабільність. В сучасній апаратурі дуже широко використовуються в якості чутливого елементу первинних акустичних перетворювачів п'єзокерамічні матеріали. В порівнянні з п'єзокварцом вони володіють більш високим значенням питомого акустичного опору і значно більшим значенням квадрата коефіцієнта електромеханічного зв'язку, який визначає пружну та електричну енергію при перетворенні та характеризує чутливість перетворювача. Вибір було зроблено на користь двох із таких п'єзокерамічних матеріалів – кераміка ЦТС (цирконантитанат свинцю) та метаніобат свинцю.

Ці матеріали мають задовільну чутливість та достатню допустиму температуру для проведення досліджень в свердловині – відповідно плюс 300–340 °С для першого та плюс 350–400 °С для другого. Кожен має деякі особливості щодо застосування. ЦТС є найкращим матеріалом для випромінювачів, але через те, що він має більший звуковий опір, для нього важче виготовити хороший демпфер. Тому, залежно від використовуваних способів контролю, коли перетворювач працює в дальній зоні, де потрібна висока чутливість, краще використати кераміку ЦТС, а в ближній зоні, коли потрібно отримати короткі імпульси і забезпечити добре демпфірування, краще використати метаніобат свинцю. Залежно від розмірів перетворювача та частоти можна вибрати різновид ЦТС чи метаніобату свинцю так, щоб їх електрична ємність добре узгоджувалася з імпедансом приладу.

П'єзокераміка повинна знаходитися в надійному механічному контакті з захисним шаром та демпфером. Традиційні способи склеювання та пайки є не достатньо надійними при високих температурах експлуатації. Через

велику різницю температурних коефіцієнтів лінійного розширення на межі п'єзокераміка - шар клею постійно будуть присутні дотичні напруження, величина яких залежить від перепаду температур. Тому, навіть якщо з'єднання ще не зруйноване, отримати стабільні акустичні характеристики неможливо. В таких випадках найкраще використати тонкий шар рідини. При цьому також потрібно звертати увагу на те, що з'єднувальні поверхні повинні бути по можливості плоскими та гладкими, щоб забезпечити хороше проходження ультразвуку, а товщина шару рідини повинна бути менша $1/20$ довжини хвилі для того, щоб в ньому не виникало відбиття, які порушують узгодження імпедансу між керамікою, демпфером та захисним шаром.

Важливою акустичною вимогою є зведення до мінімуму або повне усунення впливу реверберації. Для найкращого демпфірування перетворювача імпеданс демпфера повинен наближатися до імпедансу кераміки. Тоді демпфер повністю поглине енергію від задньої стінки кераміки і не буде виникати завад у вигляді луна-імпульсів. Але потрібно мати на увазі те, що перетворювачі, які мають високу степінь демпфірування, мають хорошу роздільну здатність, але малу амплітуду сигналу. Якщо є різниця акустичного імпедансу активного елемента та демпфера, тоді більша частина акустичної енергії переходить в об'єкт контролю. В результаті цього знижується роздільна здатність перетворювача через збільшення тривалості сигналу, але в той же час збільшується амплітуда сигналу, що приводить до збільшення чутливості. Степінь демпфірування залежить від того, в якій зоні повинен працювати перетворювач – в ближній чи дальній. Для виготовлення демпфера найкраще використати литі смоли з порошковими наповнювачами (найкраще тонко подрібнений вольфрамний порошок). Акустичний імпеданс можна змінювати вибором складу суміші в широких межах.

Як відомо, для захисту п'єзопластини перетворювачів від механічних пошкоджень використовуються протектори (захисний шар), які є складовою частиною перетворювача і впливають на характеристики випромінюючих та приймаючих імпульсів [122]. Для імерсійних перетворювачів протектор відіграє додаткову роль: він служить акустичним узгоджувальним шаром між активним елементом з високим акустичним імпедансом та водою, яка має більш низький акустичний імпеданс. Протектор повинен мати необхідний акустичний імпеданс та товщину, яка б точно узгоджувалася з четвертиною довжини хвилі для того, щоб підвищити вихід ультразвукової енергії. Вибір товщини протектора базується на принципі суперпозиції, який дозволяє хвилям, що генеруються активним елементом, співпадати по фазі з хвилею, що відбивається від протектора. Коли сигнали поширюються синфазно (співпадають по фазі), їх амплітуди доповнюють одна одну.

Таким чином, в об'єкт контролю входить хвиля з більшою амплітудою. Несинфазні сигнали приводять до порушення цілісності ультразвукової хвилі. Так як розроблюваний перетворювач повинен працювати в імерсійному варіанті, то основна увага повинна звертатися на те, щоб матеріал протектора і місце його з'єднання з перетворювачем були водостійкі.

Одним із способів монтажу перетворювача, який дозволив би зберегти всі необхідні характеристики, є виконання демпфера та протектора у вигляді єдиного блока з композитного матеріалу на основі епоксидної смоли. Така конструкція є досить проста і надійна в роботі, а верхня границя інтервалу робочих температур обмежується границею теплостійкості композиційного матеріалу, що складає 150°C .

Для ще більшого розширення інтервалу робочих температур потрібно використовувати корпус у вигляді литої конструкції із спеціальної термостійкої пластмаси або

герметичної суцільної конструкції із нержавіючої сталі. Важливе значення має забезпечення узгодження п'єзокераміки з водою та затування акустичної хвилі в демпфері. Цього можна досягти шляхом задавання зміни густини та акустичного імпедансу по довжині перетворювача.

Як уже згадувалося, на початку проектування перетворювача вихідними даними для розрахунку були механічні, електромеханічні і електричні характеристики матеріалів, що будуть використовуватися, але для таких специфічних умов експлуатації перетворювача (якими є умови свердловини) працездатність його можна довести тільки експериментально. Важливо знати також зміну характеристик в процесі експлуатації та ресурс роботи. Для цього необхідно провести контроль характеристик перетворювача, щоб виявити чи потрібно проводити корегування параметрів вторинних електричних приладів в процесі експлуатації системи контролю.

В умовах дії високих температур треба точно реєструвати зміну основних характеристик матеріалу, тоді як абсолютні значення вимірних величин можуть бути визначені більш грубо, бо вплив зовнішніх факторів можна оцінити з допомогою відносної зміни величин. Робочі характеристики перетворювачів спочатку потрібно виміряти в лабораторних, а потім в робочих умовах експлуатації.

Їх працездатність повинна визначатися значенням та зміною в часі робочих характеристик чутливості, частотної характеристики, електричної та температурної стійкості і т. д. Спочатку важливо визначити властивості п'єзоелемента, щоб можна було оцінити вплив їх зміни на загальну зміну робочих характеристик перетворювача. За вимірними втратами та видом частотної характеристики електричного імпедансу зібраного перетворювача можна говорити про порушення в системі кріплення та зміну якості акустичного контакту між елементами конструкції.

Для зменшення похибок, зумовлених впливом температури на час поширення імпульсів ультразвукових коливань в призмах роздільно-суміщених перетворювачів, їх потрібно виготовляти з матеріалів, що мають малий температурний коефіцієнт швидкості ультразвуку. Таким матеріалом може бути плавлений кварц.

Підвищення чутливості при використанні безконтактних п'єзоелектричних перетворювачів

Безконтактні методи збудження акустичних коливань розширюють можливості акустичного контролю при великих швидкостях і об'ємах контролю, високих і низьких температурах, шорстких і брудних поверхнях об'єкта, проте на даний час вони мало поширені. Ці методи можуть базуватися на ефектах використання повітряного акустичного зв'язку, термоакустичного, ефектів електричного та електромагнітного полів (рисунок 4.12) [120,123-125].



Рисунок 4.12 - Безконтактні методи збудження акустичних коливань

Ультразвукові дослідження фактично розпочались з того часу, як були відкриті п'єзоелектричні властивості деяких матеріалів подружжям Кюрі в 1876 році [126] та вперше застосовані ці властивості Річардсоном в 1913 році для створення гідролокаторів [127]. Стрімко розвиватись ультразвукова технологія почалась тільки з 1963 року, коли було відкрито можливість генерації пружних акустичних коливань у твердих матеріалах за допомогою імпульсного нагрівання поверхні об'єкта, в наслідок чого виникають змінні в часі термомеханічні напруження, спричинені нерівномірним і нестационарним розподілом температур [120] (рисунок 4.13).

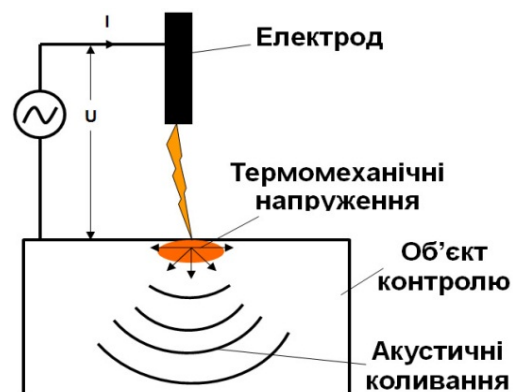


Рисунок 4.13 - Генерація акустичних коливань при використанні імпульсного нагрівання

Недоліком цього методу є те, що його можна використовувати тільки на тих об'єктах, які могли витримувати таке нагрівання в процесі контролю.

Наступний період був присвячений використанню імпульсних лазерів для збудження ультразвукових коливань. Цей метод за фізикою виникнення пружних коливань є аналогічний до попереднього, з тією відмінністю, що для

передачі тепла використовується високоенергетичне когерентне випромінювання (рисунок 4.14).

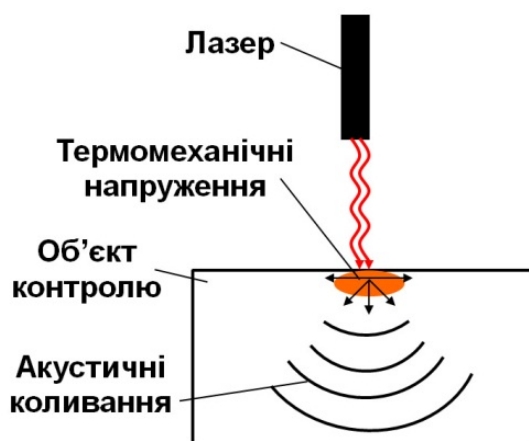


Рисунок 4.14 - Генерація акустичних коливань при використанні лазерного випромінювання

Даний спосіб є дуже перспективним, враховуючи те, що на даний час стрімко розробляються нові типи напівпровідникових лазерів, якими набагато простіше здійснювати управління, та які мають набагато більший коефіцієнт корисної дії у порівнянні з традиційними рубіновими лазерами [124, 128, 129]. Теоретична оцінка та експерименти показують, що при енергії світлового потоку 4 Дж, коефіцієнті відбиття 0,8 та діаметрі світлового променя 10 мм є можливим збудження акустичних імпульсів, які створюватимуть тиск $2 \cdot 10^8$ Па. Порівняння з імерсійним п'єзоелектричним способом при напрузі генератора 100 В, показує що лазерним способом є можливість збудити акустичні коливання амплітудою в 100-1000 раз більшою, ніж п'єзоперетворювачем [120]. Проте цей метод також має обмеження і його неприпустимо використовувати для контролю об'єктів, поверхні яких можуть втратити свої

властивості під впливом високоенергетичного лазерного випромінювання. Крім того, даний метод є досить дорогим та складним у реалізації на практиці для промислового контролю.

Також знайшов своє застосування метод генерації акустичних коливань, який базується на ефекті електромагнітного поля – електро-магнітоакустичний метод [130, 131, 123]. За останні роки безконтактні методи збудження акустичних хвиль та системи безконтактного неруйнівного контролю в основному розроблялись на основі названого методу (рисунок 4.15).

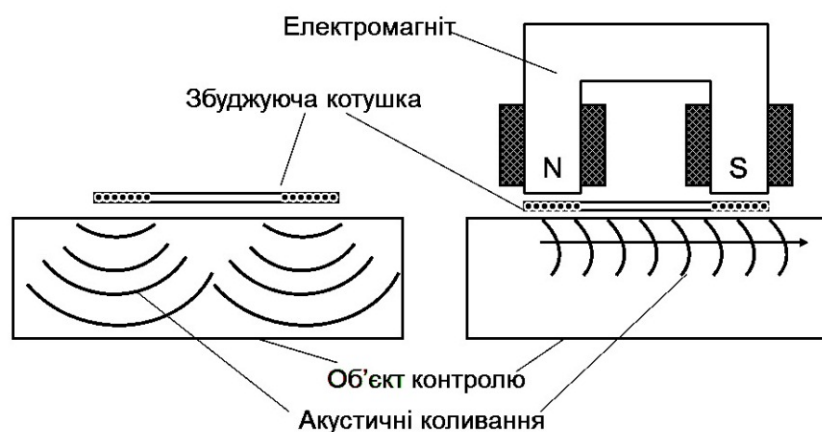


Рисунок 4.15 - Генерація акустичних коливань при використанні електро-магнітоакустичного ефекту

Проте недоліком даного методу є необхідність розташування електромагнітно-акустичних перетворювачів безпосередньо біля поверхні об'єкта контролю та неможливість генерації пружні коливання у не феромагнітних матеріалах [120, 132].

Спробам збудження ультразвукових коливань, при використанні повітря для акустичного зв'язку ультразвукових

перетворювачів з ОК, заважає слабка передача ультразвукової енергії через велике розходження в акустичному опорі між повітрям і по суті будь-яким твердим досліджуваним об'єктом [38]. На даний час для реалізації більшості безконтактних ультразвукових методів також використовують традиційні п'єзоелектричні перетворювачі або ємнісні перетворювачі.

Акустичні коливання струмопровідної поверхні виробу можуть бути спричинені силами взаємодії електричних зарядів, якщо цю поверхню зробити одною з пластин конденсатора [120, 133]. Приймання акустичних коливань здійснюється в результаті зворотного ефекту – виникнення змінного електричного опору на пластинах конденсаторного перетворювача при зміні відстані між пластинами, одна з яких є поверхнею виробу (рисунок 4.16).

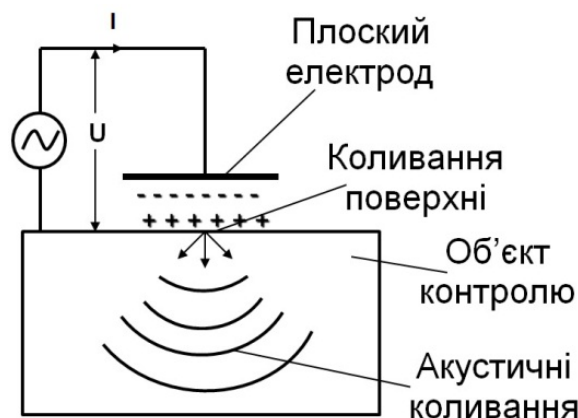


Рисунок 4.16 - Генерація акустичних коливань при використанні конденсаторного (ємнісного) перетворювача

Цей метод найчастіше використовують для досліджень, наприклад для безконтактного вимірювання розподілу амплітуди коливань поверхні у широкому діапазоні частот. Проте такий спосіб збудження пружних коливань вимагає

наявності електричного контакту з поверхнею об'єкта контролю та дозволяє контролювати тільки електропровідні об'єкти.

Також відомий спосіб збудження акустичних коливань за допомогою ємнісних ультразвукових перетворювачів, які складаються з тонкої металізованої полімерної мембрани і провідної опорної пластини (рисунок 4.17). За фізикою збудження пружних коливань цей спосіб аналогічний до попереднього, проте він не вимагає наявності електричного контакту з поверхнею контролю, а акустичні коливання передаються від металічної мембрани через повітряний шар до об'єкта контролю. Такий спосіб збудження акустичних коливань, на відміну від попередньо описаного, дозволяє генерувати та приймати тільки ультразвукові коливання строго визначеної частоти [133, 134].

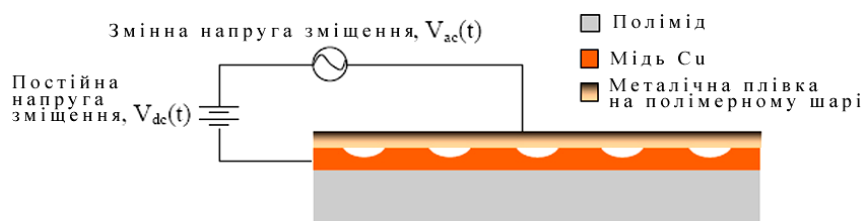


Рисунок 4.17 - Будова та схема підключення ємнісного ультразвукового перетворювача

Порівняно з п'єзоелектричними перетворювачами, ємнісні ультразвукові перетворювачі мають набагато меншу акустичну невідповідність акустичного опору між мембраною і повітрям, унаслідок дуже малого механічного опору тонкої мембрани.

Незважаючи на високі характеристики ємнісних ультразвукових перетворювачів, їх використання утруднюється із-за складності процесу виготовлення самого перетворювача. Для роботи в мегагерцовому діапазоні

металічна мембрана та опорна пластина повинні мати досить малі товщини, а необхідність застосування мікро обробки опорної пластини, спричиняє труднощі у виготовленні перетворювачів з однаковими характеристиками та їх повторюваність.

Ще один спосіб для безконтактного збудження ультразвукових коливань може бути здійснений шляхом використання традиційних п'єзокерамічних перетворювачів [92]. Технологія виготовлення п'єзоелектричних пласти перетворювачів на даний час дуже розвинута, що спрощує виготовлення самого перетворювача та не створює додаткових вимог до генераторно-приймальної апаратури. Проте залишається проблема узгодження акустичного опору п'єзопластини, повітря та об'єкта контролю. Дана проблема може бути вирішена шляхом використання п'єзопластин з низьким механічним опором, високою чутливістю та використанням одного чи декількох узгоджувальних шарів, які наносяться на п'єзокераміку чи на об'єкт контролю, і які призначені для зменшення акустичного опору та збільшення чутливості [134]. Будова такого перетворювача зображена на рисунку 4.18.

Конструктивно перетворювач складається з корпусу, в якому до демпфера кріпиться п'єзоелектричний елемент. Узгоджувальний шар за допомогою з'єднуючого матеріалу кріпиться до іншої сторони п'єзопластини. У фокусувальних перетворювачах між узгоджувальним шаром та п'єзоелектричною пластиною розміщують сферичну акустичну лінзу.

Основними перевагами ультразвукових методів вимірювання товщини в порівнянні з іншими є незалежність результатів вимірювань від неоднорідності і непостійності магнітної і електричної структури матеріалу виробу, можливість контролю сумарної товщини біметалічних виробів (наприклад, виробів з феромагнітних і не феромагнітних

матеріалів і сплавів), можливість вимірювання внутрішньої та зовнішньої корозії при односторонньому доступі до об'єкту контролю, відсутність шкідливої дії випромінювань на людину (ядерних або рентгенівських) і принципова можливість вимірювання як малих, так і великих (до декількох метрів) товщин. Недоліками ультразвукових методів є вимоги до стану поверхні контролю, для ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів обов'язкова наявність контактної речовини (для контактних методів), неможливість отримання значення товщини металоконструкцій з не плоскопаралельними поверхнями.

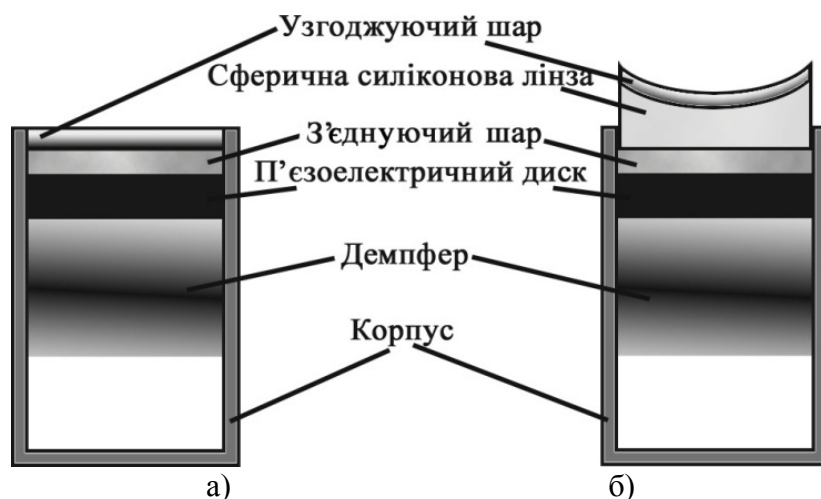


Рисунок 4.18 - Будова безконтактного а) плоского та б) фокусувального ультразвукового перетворювача

Отже, підсумовуючи вищесказане, незважаючи на різноманітність методів безконтактного збудження ультразвукових коливань у об'єкті контролю, їх переваги та недоліки, головною проблемою залишається мінімізація неспівпадання акустичного опору перетворювача, повітря та самого об'єкта. При розробці систем безконтактного

ультразвукового контролю кожен з дослідників вибирає власний метод і намагається запропонувати найбільш оптимальну схему передачі акустичних коливань. Проте, значна різниця швидкості звукових хвиль в повітрі, яка складає близько 330 м/с і об'єкті контролю, для сталевих виробів вона складає 5900 м/с та високий коефіцієнт затухання ультразвукових хвиль в повітрі, спричиняє дуже високе зростання коефіцієнта відбиття, зменшує чутливість та співвідношення амплітуди корисного сигналу до шуму [135, 136].

З іншої сторони, внаслідок дуже великої різниці між швидкостями поширення звуку в повітрі та об'єкті контролю, кут входження акустичного променя, при якому відбувається повне відбиття (граничний кут), є дуже малим [137]. Цей кут визначається за законом синусів:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}, \quad (4.16)$$

де v це фазова швидкість, а θ кут. Якщо хвилі поширюються з середовища 1 в середовище 2, то θ_1 це кут падіння, а θ_2 це кут відбивання.

Зрозуміло, що кут відбивання залежить лише від співвідношення швидкостей у двох середовищах. Наприклад, для поверхні розподілу повітря/полімер він складає більше 90°, і є меншим 45° для більшості поверхонь розподілу повітря/метал. Цей факт потрібно враховувати при проведенні контролю зразків з нерівною або кривою поверхнею, а також при розробці безконтактних фокусуєчи ультразвукових перетворювачів.

Ще одна проблема, з якою доводиться стикатися при розробці безконтактних ультразвукових перетворювачів, пов'язана з втратами, які виникають внаслідок великих значення коефіцієнту відбивання та малого значення коефіцієнту проходження, що спричиняє втрати енергії

акустичних коливань на границі розподілу твердий матеріал/повітря від 55 та 88 дБ. Це призводить до значного відбивання енергії і тільки незначна її кількість потрапляє у тіло об'єкта контролю. Якщо врахувати той факт, що при безконтактній передачі ультразвукових коливань завжди існує дві границі розподілу, п'єзопластина/повітря та повітря/об'єкт контролю, то ці втрати можуть сягати 150 дБ [137], що унеможлиблює використання традиційних методів обробки дефектоскопічної інформації.

Наступна проблема пов'язана з значним затушенням ультразвукових коливань у повітрі. На рисунок 4.19 показані залежності величини затушення коливань від відстані до випромінювача для зазначених частот [136].

Знизити затушення ультразвукових хвиль в повітрі можна за допомогою збільшення тиску, проте при нормальних умовах це неможливо.

Врахування вище перелічених проблем, які виникають при безконтактному способі передачі ультразвукових коливань та зменшення їх впливу, дасть можливість розробити безконтактний акустичний спосіб контролю виробів, виготовити перетворювачі з потрібними характеристиками та дозволить спростити системи контролю, підвищити чутливість методу та збільшити його продуктивність.

З метою вибору та обґрунтування напрямків підвищення чутливості безконтактного акустичного методу побудуємо описову фізичну модель процесу безконтактного акустичного контролю товщини елементів металоконструкцій при односторонньому доступі до поверхні ОК з використанням одного п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) (рисунок 4.20) та фізичну модель процесу безконтактного акустичного контролю товщини елементів металоконструкцій при двосторонньому доступі до поверхонь ОК з використанням двох ПЕП (рисунок 4.21).

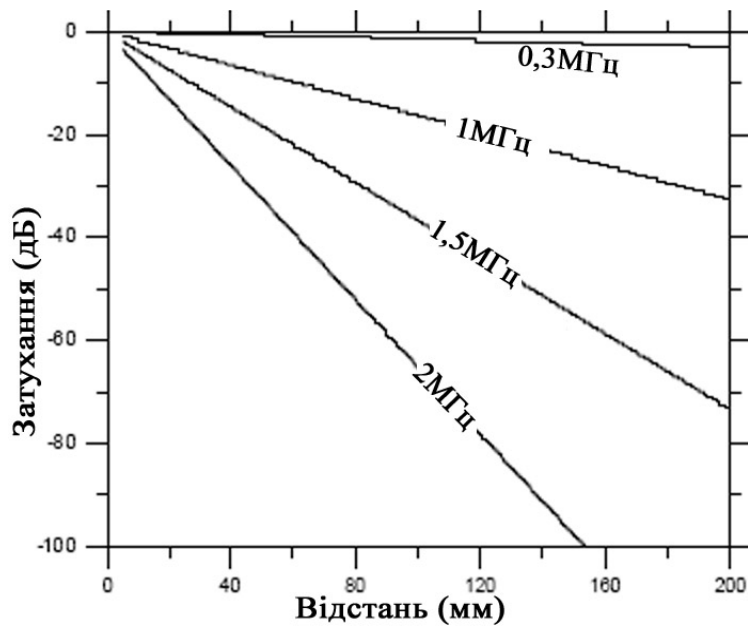
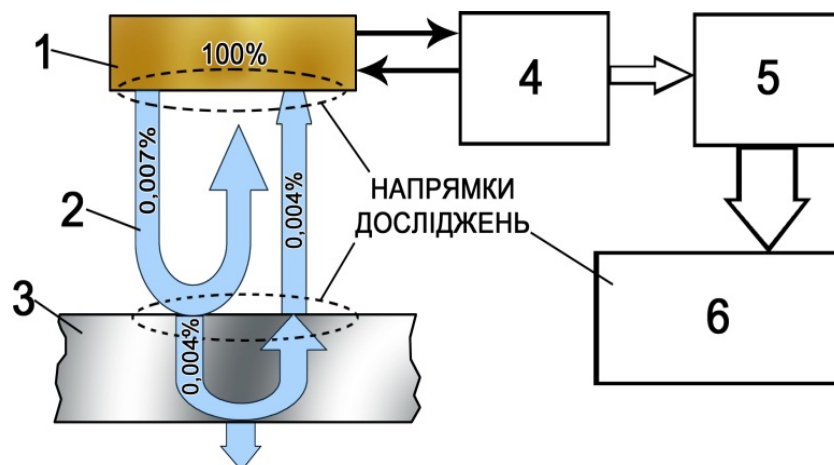


Рисунок 4.19 – Затування ультразвукових хвиль частотою 0,3; 1; 1,5 та 2 МГц в повітрі за нормальних умов

Вимірювання товщини елементів металоконструкцій при односторонньому доступі до поверхні ОК здійснюється наступним чином. Генератор акустичних коливань, який входить в генераторно-приймальний тракт, формує імпульси напруги визначеної тривалості та частоти, які збуджують акустичні коливання в п'єзопластині ПЕП. Акустичні коливання від ПЕП через шар повітря поширюються до об'єкта контролю. На границі повітря/ОК (зовнішня поверхня ОК) акустичні коливання зазнають часткового відбивання та заломлення. Відбиті від зовнішньої поверхні ОК акустичні коливання проходять зворотній шлях через шар повітря і потрапляють на ПЕП. Заломлені акустичні коливання проходять через об'єкт контролю, зазнають відбивання від

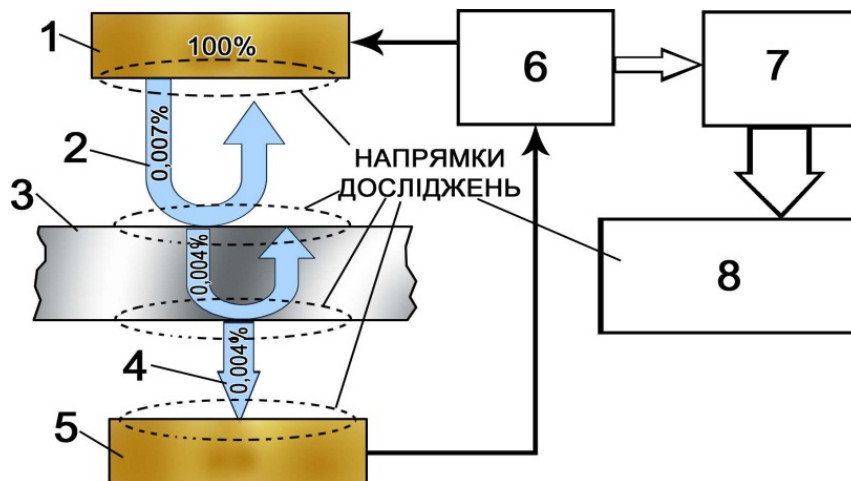
границі розділу ОК/повітря (внутрішня поверхня ОК) і, пройшовши зворотній шлях через об'єкт контролю та шар повітря, потрапляють на ПЕП.



1 – ПЕП, 2 – акустичні коливання, 3 - ОК , 4 – генераторно-приймальний тракт, 5 – аналого-цифровий перетворювач, 6 – блок оброблення та візуалізації результатів контролю

Рисунок 4.20 – Фізична модель методу вимірювання товщини при односторонньому доступі до поверхні ОК

Акустичні коливання, потрапивши на п'єзоелектричний перетворювач, збуджують в ньому електричні коливання напруги, які підсилюються за допомогою підсилювача акустичних коливань (входить в склад генераторно-приймального тракту). Підсилені коливання напруги потрапляють на аналого-цифровий перетворювач, який здійснює оцифрування сигналу і далі у цифровому вигляді потрапляють у блок оброблення та візуалізації результатів контролю. Останній за значенням часу проходження акустичних коливань в тілі об'єкта контролю визначає його товщину.



1 – випромінюючий ПЕП, 2 – акустичні коливання, 3 - ОК, 4 – акустичні коливання, що пройшли через ОК, 5 – приймаючий ПЕП, 6 – генераторно-приймальний тракт, 7 – аналого-цифровий перетворювач, 8 – блок оброблення та візуалізації результатів контролю

Рисунок 4.21 – Фізична модель методу вимірювання товщини при двосторонньому доступі до поверхонь ОК

Вимірювання товщини елементів металоконструкцій при двосторонньому доступі до поверхонь ОК здійснюється аналогічно до попереднього, з тією різницею, що реєструється не час поширення відбитих від поверхонь ОК акустичних коливань, а час поширення акустичних коливань, що пройшли через ОК.

Основними проблемами при передачі ультразвукової енергії через повітря в досліджуваний матеріал є значне неспівпадання акустичного опору п'єзопластини, повітря та досліджуваного матеріалу та високе значення коефіцієнта затухання ультразвукових коливань в повітрі. Внаслідок чого тільки 0,007% енергії акустичних коливань, яка випромінюється ПЕП, передається через шар повітря до ОК.

На границі розділу повітря/ОК також втрачається значна частина енергії акустичних коливань – тільки 0,004% енергії акустичних коливань, які потрапили на поверхню ОК, проходить через границю розділу повітря/ОК [138].

Дані проблеми призводять до зменшення величини енергії акустичних коливань на виході перетворювача (на кожній границі розділу п'єзоелемент/повітря та повітря/об'єкт контролю втрачається біля 99,99% енергії акустичних коливань) [138], співвідношення сигнал-шум, чутливості методу та унеможливають використання традиційних методів обробки дефектоскопічної інформації.

Таким чином, для підвищення чутливості безконтактного акустичного методу контролю необхідно вирішити дві проблеми, що дасть можливість компенсувати зменшення втрат енергії акустичних коливань:

- на границі розділу п'єзоелемент/повітря;
- у повітрі (зменшення коефіцієнта затухання) та на границі розділу повітря/об'єкт контролю.

Шляхом аналізування описової фізичної моделі процесу безконтактного акустичного контролю елементів металоконструкцій визначимо напрямки підвищення чутливості акустичного методу контролю товщини:

- необхідність використання узгоджувального шару (чи шарів), визначення його характеристик в залежності від матеріалу об'єкта контролю та характеристик п'єзоелемента перетворювача, що дасть можливість компенсації суттєвих втрат енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря;

- компенсація втрат енергії акустичних коливань в повітрі та на границі розділу повітря/об'єкт контролю шляхом використання технологій штучних нейронних мереж для оброблення вимірювальної інформації, що дасть можливість підвищення чутливості методу.

В техніці ультразвуку можливі наступні способи узгодження акустичних опорів [139], що дає можливість зменшити втрати енергії акустичних коливань на границі розділу:

1) за допомогою проміжної узгоджувальної ланки (чи декількох) акустичні властивості якої постійні по всій довжині; акустичні властивості і довжина узгоджувальної ділянки повинні мати певні значення;

2) за допомогою проміжної узгоджувальної ланки визначеної довжини з плавно, за певним законом, змінними характеристиками.

Узгоджувальні ланки доцільно використовувати на границі розділу п'єзоелемент/повітря. Використання ж їх на границі розділу повітря/об'єкт контролю є недоцільним, оскільки, як правило, вони виготовляються з дорогих матеріалів, що призводить до значних матеріальних затрат при великих об'ємах контролю та необхідність введення додаткової підготовчої операції. Зменшити втрати енергії акустичних коливань у повітрі можливо шляхом збільшення тиску повітря. Проте за нормальних умов, при неперервному контролі, збільшення тиску є неможливим. Рішення тільки однієї з трьох проблем утруднює реалізацію безконтактного акустичного методу контролю геометричних характеристик металоконструкцій, оскільки із-за значних втрат енергії акустичних коливань, амплітуда акустичних сигналів, що пройшли через об'єкт контролю буде знаходитись нижче рівня власних шумів перетворювача та підсилювача ультразвукових коливань. В такому випадку використання традиційних методів оброблення вимірювальної інформації та локалізації акустичних коливань, що пройшли через ОК не дасть можливості отримання дійсного значення товщини ОК. Рішення даної проблеми може бути знайдене шляхом використання нових методів оброблення вимірювальної інформації.

Поєднання методів зменшення втрат енергії акустичних коливань та нових методів оброблення вимірювальної інформації дасть можливість розроблення технічного засобу для безконтактного акустичного контролю товщини елементів металоконструкцій.

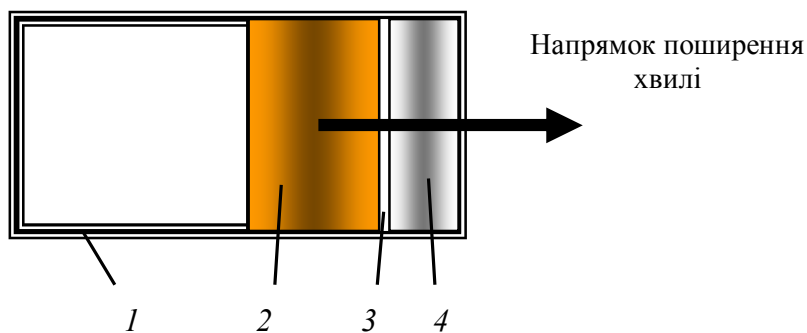
З метою розроблення методу підвищення чутливості безконтактного акустичного методу контролю товщини металоконструкцій та вибору оптимальних параметрів контролю необхідно провести математичне моделювання процесу поширення ультразвукових коливань від перетворювача до об'єкта контролю та в об'єкті контролю і розрахувати втрати енергії акустичних коливань, що дасть можливість визначити фізичні та геометричні характеристики узгоджувального шару, вибрати тип матеріалу узгоджувального шару та зменшити втрати енергії акустичних коливань на границі розділу п'єзоелемент/повітря.

Збудження і приймання ультразвукових коливань базується на перетворенні одного виду енергії в інший. При збудженні енергія зовнішнього джерела перетворюється в енергію ультразвукових коливань, а при прийманні енергія пружних коливань перетворюється в такий вид енергії, до якого чутливий вимірювальний прилад.

В загальному випадку ПЕП можна представити у вигляді багатошарової структури, яка складається з певним чином послідовно розміщених п'єзоелектричних активних і пасивних плоско паралельних шарів (рисунок 4.22). В практиці така конструкція п'єзоперетворювача у вигляді пластин і плоских узгоджувальних шарів отримала найбільше поширення.

Як сказано вище, величина ультразвукової енергії, що випромінюється п'єзоперетворювачем в основному залежатиме від акустичних опорів п'єзопластини, узгоджуючого шару (декількох шарів) та середовища в яке випромінюються пружні коливання. Правильний вибір

геометричних та фізичних характеристик узгоджувального шару дозволить отримати максимальне значення акустичної енергії на виході перетворювача, що в свою чергу дасть можливість отримати більше значення інтенсивності акустичних коливань на поверхні та в тілі ОК.



1 – корпус, 2 – п'єзоелектрична пластина,
3 – з'єднуючий шар, 4 – узгоджувальний шар

Рисунок 4.22 - Конструкція п'єзоелектричного перетворювача

Для побудови математичної моделі процесу поширення акустичних коливань в системі п'єзопластина, узгоджувальний шар, середовище навантаження (для безконтактних п'єзоперетворювачів – повітря) розіб'ємо її на окремі ділянки (шари), з однорідними акустичними властивостями та запишемо рівняння поширення акустичних коливань в цих середовищах та системи рівнянь на межах ділянок.

Для однонаправленої плоскої хвилі потенціал коливальної швидкості залежить від координати x та часу t . В такому випадку рівняння для плоскої хвилі має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (4.16)$$

де φ - потенціал коливальної швидкості, c_0 - швидкість поширення хвилі.

При умові, що початковий зсув фази в момент часу $t = 0$ рівний нулю та напрямком поширення хвилі x є додатній, розв'язок рівняння (4.16) буде таким [36, 55]:

$$\varphi(x, t) = \varphi_{\max} e^{i2\pi\left(ft - \frac{fx}{c_0}\right)} = \varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)}, \quad (4.17)$$

або

$$\varphi(x, t) = \varphi_{\max} \sin 2\pi\left(ft - \frac{fx}{c_0}\right) = \varphi_{\max} \sin(\omega t - kx), \quad (4.18)$$

де $\omega = 2\pi f$ - кругова (циклічна) частота, $k = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$ - хвильове число, λ - довжина хвилі в матеріалі, f - частота акустичних коливань.

При проходженні хвилі через границю розподілу двох середовищ з різними фізичними властивостями в залежності від характеристик середовища можливі два випадки:

- повне або часткове відбивання, заломлення та проходження хвилі;
- можливе розділення на поперечну та повздовжню хвилю (наприклад на межі розподілу середовищ вода-метал).

При проходженні хвилі через границю розподілу двох твердих тіл виникають по дві відбитих і заломлених хвиль (повздовжні і поперечні).

В нашому випадку, враховуючи те, що одне із середовищ є газом, а напрямком поширення хвилі перпендикулярний границі розділу середовищ надалі розглядатимемо тільки повздовжні хвилі, оскільки поперечні хвилі не виникатимуть.

Запишемо наступні рівняння взаємодії хвилі (ультразвукових коливань) з межею розподілу середовищ.

Для коливальної швидкості частинок середовища v :

$$\begin{aligned}
 v(x, t) &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = k \varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \\
 &= k \varphi_{\max} \cos(\omega t - kx) = v_{\max} \cos(\omega t - kx)
 \end{aligned}
 \quad (4.19)$$

Крім того залежність акустичного тиску p від похідної потенціалу коливальної швидкості φ по часу та густини середовища ρ_0 має вигляд [140-141]:

$$\begin{aligned}
 p(x, t) &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} \rho_0 = \rho_0 \omega \varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \\
 &= \rho_0 \varphi_{\max} \cos(\omega t - kx) = p_{\max} \cos(\omega t - kx)
 \end{aligned}
 \quad (4.20)$$

Як видно з рівнянь (4.19) та (4.20), коливальна швидкість частинок середовища та зміна акустичного тиску повздовжньої хвилі знаходяться в одній фазі та зв'язані співвідношенням:

$$\begin{aligned}
 p(x, t) &= \rho_0 c_0 v(x, t) = \rho_0 c_0 v_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \\
 &= \rho_0 c_0 v_{\max} \cos(\omega t - kx) = p_{\max} \cos(\omega t - kx)
 \end{aligned}
 \quad (4.21)$$

Вираз $\rho_0 c_0 = Z_0$ характеризує акустичний опір середовища.

Розглянемо випадок поширення коливань в безкінечному однорідному середовищі та їх проходження через границю розділу двох середовищ з різними акустичними властивостями (рисунок 4.23).

Середовище 1 характеризується певним значенням швидкості поширення акустичних коливань c_1 та густиною ρ_1 , падаюча хвиля – акустичним тиском p_1 та коливальною швидкістю v_1 . Хвиля, відбита від межі розподілу двох середовищ описується акустичним тиском p_{12} та коливальною швидкістю частинок середовища v_{12} . Середовище 2 та хвиля, що пройшла – c_2 , ρ_2 , p_2 , v_2 швидкістю поширення акустичних коливань, густиною,

акустичним тиском та коливальною швидкістю частинок середовища відповідно.

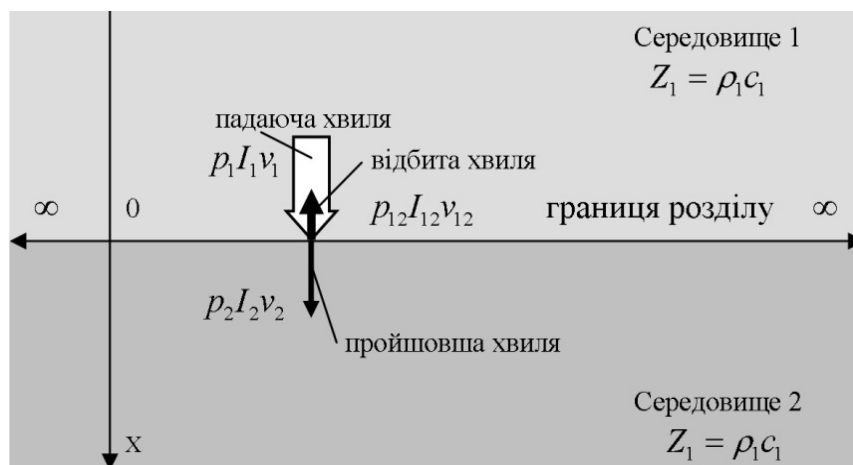


Рисунок 4.23 - Відбивання та проходження нормально падаючої хвилі на границі розподілу двох середовищ з різними акустичними властивостями

Падаюча хвиля на границі розподілу двох середовищ спричиняє коливання частинок цієї границі, що породжує дві хвилі, відбиту та ту, що пройшла, які поширюються в протилежних напрямках. На границі розподілу двох середовищ сума коливальних швидкостей частинок середовища v падаючої та відбитої хвиль повинна бути рівною коливній швидкості акустичної хвилі, що пройшла та з умови рівності сил, що діють на границі розподілу, сума тисків падаючої та відбитої хвилі повинна бути рівною тиску, який спричинений хвилею, що пройшла. Також потрібно взяти до уваги баланс енергій I_1, I_{12}, I_2 - енергія падаючої, відбитої та хвилі, що пройшла відповідно. Ці твердження дають можливість записати наступні граничні умови (при $x=0$) [142]:

$$\left. \begin{aligned} v_1 + v_{12} &= v_2 \\ p_1 + p_{12} &= p_2 \\ I_1 - I_{12} &= I_2 \end{aligned} \right|_{x=0} \quad (4.22)$$

Провівши відповідну підстановку в систему рівнянь (4.22) вирази (4.19), (4.20) та (4.21) при $x=0$ та $t=0$ отримаємо наступні формули для розрахунку коефіцієнтів відбиття R_p , R_v та проходження T_p , T_v (які в першому та другому випадку залежать від відношення тисків та коливної швидкості частинок середовища хвилі, що пройшла та падаючої хвилі відповідно):

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{p_{12}}{p_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, & R_v &= \frac{v_{12}}{v_1} = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \\ T_p &= \frac{p_2}{p_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, & T_v &= \frac{v_2}{v_1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \end{aligned} \quad (4.23)$$

та коефіцієнти відбиття та проходження енергії акустичних коливань:

$$\begin{aligned} R &= \frac{I_{12}}{I_1} = R_p^2 = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2, \\ T &= \frac{I_2}{I_1} = 1 - R^2 = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \end{aligned} \quad (4.24)$$

оскільки енергія акустичних коливань I пропорційна квадрату тиску p - $I \sim p^2$.

Розглянемо випадок проходження ультразвукової хвилі через тонку нескінчену пластину. Хвиля, що проходить через пластину зазнає багатократного відбивання в середині пластини від її поверхонь. Ці відбиті хвилі взаємодіють одна з одною та з хвилею, що пройшла (рисунок 4.24). Тому є певна залежність між товщиною пластини, довжиною хвилі,

акустичним тиском та коефіцієнтами пропускання та проходження.

У випадку проходження акустичних коливань через тонку нескінченну пластину перша границя розподілу проходить перпендикулярно до осі поширення хвилі через точку $x = 0$, друга – аналогічно в точці $x = d$.

Хвильові рівняння для перпендикулярної падаючої, відбитої та хвилі, що пройшла на границі розділу двох середовищ ($x = 0$) є відповідно наступними:

$$\varphi_1(x, t) = \varphi_{1\max} e^{i(\omega t - k_1 x)}; \quad (4.25)$$

$$\varphi_{12}(x, t) = \varphi_{12\max} e^{i(\omega t + k_2 x)}; \quad (4.26)$$

$$\varphi_2(x, t) = \varphi_{2\max} e^{i(\omega t - k_2 x)}. \quad (4.27)$$

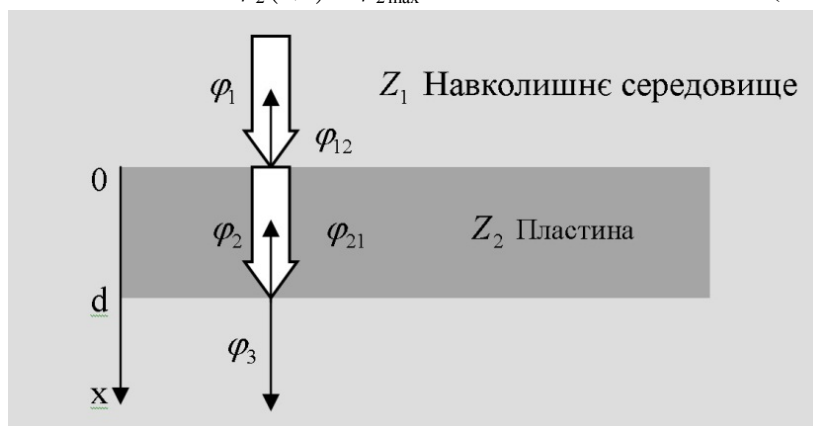


Рисунок 4.24 - Проходження акустичних хвиль через нескінченну пластину

На другій границі розділу акустичних середовищ ($x = d$) хвиля, що пройшла, знову зазнає відбивання. Для таких граничних умов хвильові рівняння відбитої та хвилі, що пройшла відповідно матимуть такий вигляд:

$$\varphi_{21}(x, t) = \varphi_{21\max} e^{i(\omega t + k_2 x)}; \quad (4.28)$$

$$\varphi_3(x, t) = \varphi_{3\max} e^{i(\omega t - k_1 x)}. \quad (4.29)$$

З граничних умов (4.22), на межі розділу двох середовищ ($x = 0$) потенціал коливальної швидкості описується рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1(\varphi_1 + \varphi_{12}) &= \rho_2(\varphi_2 + \varphi_{21}) \\ k_1(\varphi_1 - \varphi_{12}) &= k_2(\varphi_2 - \varphi_{21}) \end{aligned} \right|_{x=0}. \quad (4.30)$$

На другій межі розподілу середовищ при $x = d$, де d - товщина пластини:

$$\left. \begin{aligned} \rho_2(\varphi_2 e^{-ik_2 d} + \varphi_{21} e^{ik_2 d}) &= \rho_1 \varphi_3 e^{-ik_1 d} \\ k_2(\varphi_2 e^{-ik_2 d} - \varphi_{21} e^{ik_2 d}) &= k_1 \varphi_3 e^{-ik_1 d} \end{aligned} \right|_{x=d}. \quad (4.31)$$

Розв'язавши системи рівнянь (4.30) та (4.31), отримаємо загальний коефіцієнт відбиття по тиску та коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань:

$$R_p = \frac{\varphi_{12}}{\varphi_1} = \frac{\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1}}{\sqrt{\left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 + 4 \cot^2(d \cdot k)}}; \quad (4.32)$$

$$T_I = 1 - (R_p)^2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{Z_1}{Z_2} - \frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 \sin^2(d \cdot k)}. \quad (4.33)$$

Як бачимо з рівняння (4.33) при $d = \lambda n / 2$ коефіцієнт проходження $T_I = 1$, в такому випадку акустичні коливання проходять крізь пластину без відбиття від неї. Отже, збільшити коефіцієнт проходження ультразвукових коливань через границю розподілу п'єзоелемент/повітря можна розмістивши узгоджувальний шар з певними фізичними та геометричними характеристиками між ними.

Таким чином, записавши системи рівнянь (4.30) та (4.31) для ультразвукового перетворювача, який навантажений на повітря та складається з п'єзоелемента і узгоджувального шару, після їх розв'язку отримаємо загальний коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань [143]:

$$T = \frac{4 \cdot Z_1^{-1} \cdot Z_3}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right)^2 - \left(\left(\frac{Z_3}{Z_2}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \sin^2(k \cdot d)}, \quad (4.34)$$

де Z_1, Z_2, Z_3 - акустичний опір п'єзоелемента, узгоджувального шару та повітря відповідно.

При проведенні даних розрахунків з метою їх спрощення не враховувалось затухання акустичних коливань в матеріалах.

Згідно з виразу (4.34) у випадках коли $\lambda \ll d$ чи $kd \ll 1$ або $\sin kd = 0$ коефіцієнт проходження для трьох середовищ не залежить від товщини узгоджувального шару. В загальному випадку, якщо два середовища розділені третім шаром, товщиною d , то коефіцієнт відбивання та проходження залежать від співвідношення товщини шару та довжини хвилі. При перпендикулярному введенні хвилі півхвильовий шар (чи кратний йому) не впливає на її проходження [132]. Чвертьхвильовий шар (або кратний йому) спричиняє погіршення проходження, коли акустичний імпеданс шару більший або менший імпедансів середовищ, між якими він розміщений. Це й же шар забезпечує збільшення коефіцієнта проходження, якщо акустичний імпеданс шару менший імпедансу першого середовища, але більший імпедансу другого середовища.

У випадку коли

$$\sin kd = 1, \quad (d = (2n + 1)\lambda / 4), \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

різниця між фазами падаючої і відбитої хвиль є рівною половині довжини хвилі, що призводить до генерації хвилі з протилежної сторони, при цьому рівняння (4.34) можна записати у вигляді:

$$T = \frac{4 \cdot Z_1^{-1} \cdot Z_3}{Z_2^2 \left(1 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2^2} \right)}. \quad (4.35)$$

Коефіцієнт проходження стає рівним 1 і енергія ультразвукової хвилі передається без втрат від п'єзокераміки до повітря при $Z_2 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$. Взявши відомі значення акустичних імпедансів п'єзометеріалу ($Z_1 = 25 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ - титанат барію ТКБ-3 [144]) та повітря $Z_3 = 0,00043 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$, визначимо оптимальне значення акустичного імпедансу узгоджувального шару: $Z_2 = 0,104 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$. При визначеному значенні акустичного опору узгоджувального шару та його товщині, кратній чверті довжини хвилі акустичних коливань в даному матеріалі, коефіцієнт проходження стає рівним 1 і енергія ультразвукових коливань передається без втрат від п'єзокераміки до повітря.

Проведений аналіз довідкових даних показав, що не існує матеріалу з таким значенням акустичного опору (рисунок 4.25, позиція 4), тому для вибору матеріалу узгоджувального шару перетворювача побудуємо згідно формули (4.34) графік залежності коефіцієнта проходження енергії акустичних коливань від частоти для узгоджувальних шарів, виготовлених з матеріалів, значення акустичних опорів яких є найбільш близькими до розрахованого (рисунок 4.26). Товщина узгоджувальних шарів рівна чверті довжини хвилі акустичних коливань у відповідному матеріалі.

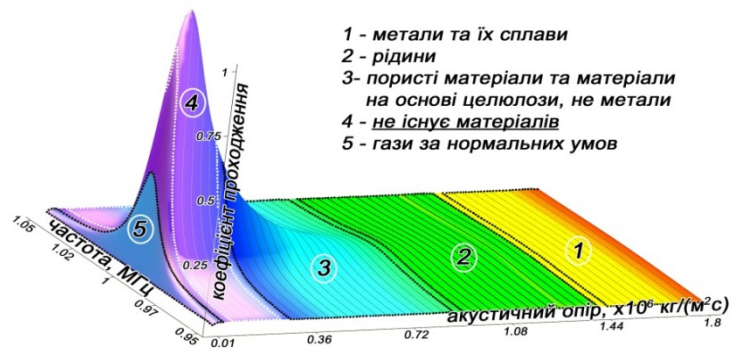
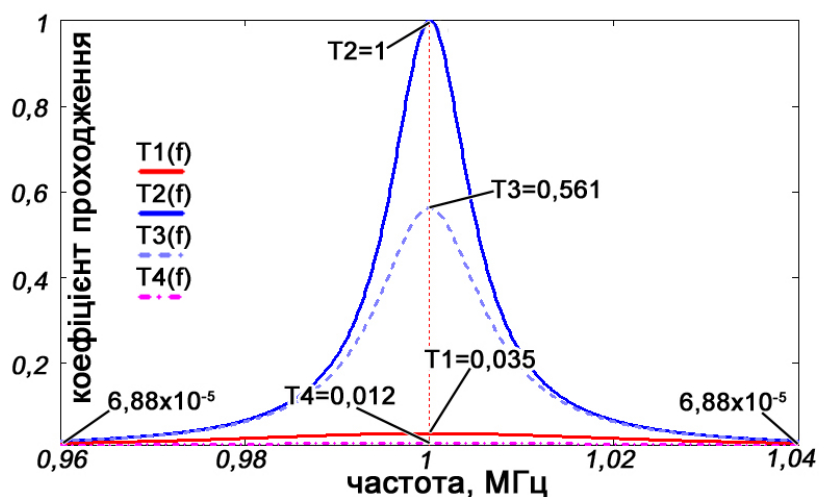


Рисунок 4.25 - Залежність коефіцієнта проходження від частоти та акустичного опору узгоджувального шару для п'єзоелемента, виготовленого з титанату барію ТБК-3



$T1(f)$ - вулканізована гума ($Z_2 = 1,4 \cdot 10^6 \text{ кг} / \text{м}^2 \text{с}$); $T2(f)$ - узгоджувальний шар з розрахованим значенням акустичного опору ($Z_2 = 0,104 \cdot 10^6 \text{ кг} / \text{м}^2 \text{с}$); $T3(f)$ – целюлоза (вторинна переробка, $Z_2 = 0,26 \cdot 10^6 \text{ кг} / \text{м}^2 \text{с}$); $T4(f)$ – епоксидна смола ($Z_2 = 1,9 \cdot 10^6 \text{ кг} / \text{м}^2 \text{с}$)

Рисунок 4.26 - Залежність коефіцієнта проходження від частоти для вказаних матеріалів узгоджувальних шарів

Також побудуємо графік залежності коефіцієнта проходження енергії акустичних коливань від товщини узгоджувальних шарів, виготовлених з матеріалів, значення акустичних опорів яких є найбільш близькими до розрахованого (рисунок 4.27).

Отже, як видно з графіків (рисунок 4.25–4.27), для досягнення максимального значення коефіцієнта пропускання важливим є як вибір матеріалу узгоджувального шару так і виготовлення такого шару з відповідним значенням товщини.

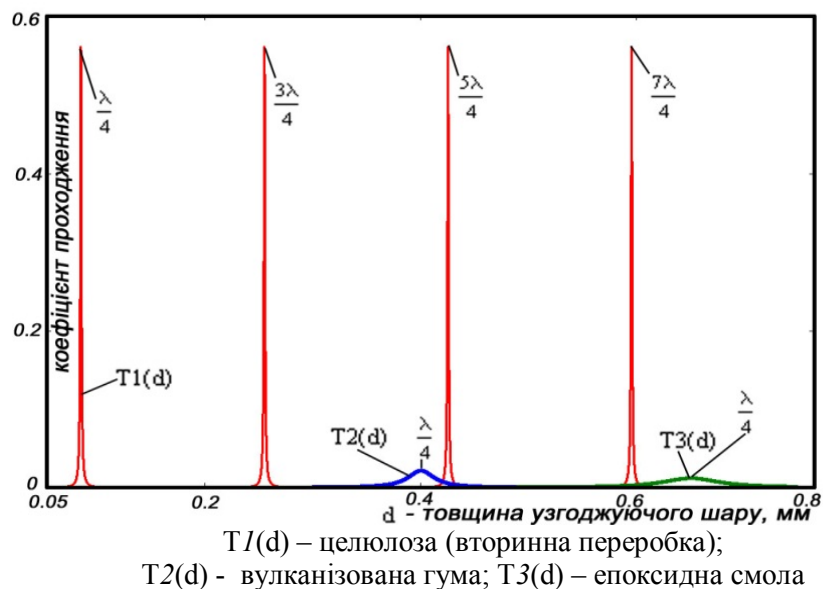


Рисунок 4.27 - Залежність коефіцієнта проходження від товщини узгоджувальних шарів

Для порівняння, згідно з формулою (4.24), розрахуємо коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань для п'єзоперетворювача без узгоджувального шару навантаженого на повітря:

$$T_I = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2} = \frac{4 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 0,00043 \cdot 10^6}{(25 \cdot 10^6 + 0,00043 \cdot 10^6)^2} = 0,0000688, \quad (4.36)$$

де $Z_1 = 25 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$, $Z_3 = 0,00043 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ - акустичні імпеданси п'єзопластини (виготовленої з титанату барію ТКБ-3) та повітря відповідно. Таким чином для безконтактних акустичних перетворювачів, як бачимо з рисунку 4.27, коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань збільшується в 508 раз, при використанні для виготовлення узгоджувального шару вулканізованої гуми та в 8150 раз при використанні целюлози.

Розрахунок товщини узгоджувального шару $h_{yш}$ проводитимемо за умови, що вона повинна бути рівною (кратною) чверті довжини хвилі акустичних коливань в даному матеріалі (в нашому випадку – целюлоза вторинної переробки):

$$h_{yш} = \frac{(2n+1)\lambda}{4}, \quad n = 0, 1, 2... \quad (4.37)$$

Оскільки:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4.38)$$

де c - швидкість поширення акустичних коливань в матеріалі (в нашому випадку для целюлози вторинної переробки $c = 340 \text{ м/с}$ [145]), f - частота акустичних коливань, отримаємо наступний вираз для визначення товщини матеріалу узгоджувального шару:

$$h_{yш} = \frac{(2n+1)c}{4f}, \quad n = 0, 1, 2... \quad (4.39)$$

Для прикладу, розрахуємо товщини узгоджувального шару ультразвукового перетворювача, робоча частота якого складає 1 МГц: 0,085мм; 0,255мм; 0,425мм. Враховуючи суттєве значення втрат енергії акустичних коливань в самому

матеріалі узгоджувального шару, які виникають в наслідок затухання, з обчисленого ряду вибираємо найменше значення товщини матеріалу узгоджувального шару. Таким чином узгоджувальний шар необхідно виготовляти у вигляді круглої пластини, товщиною $0,085\text{мм}$, діаметр якої рівний діаметру п'єзоелемента перетворювача.

Отже проведене математичне моделювання та побудовані графічні залежності дали можливість вибрати матеріал для виготовлення узгоджувального шару безконтактного перетворювача – целюлоза вторинної переробки, та розрахувати його геометричні характеристики.

Для збільшення коефіцієнта передачі енергії на границі розподілу повітря/досліджуваній об'єкт також можливо використати узгоджувальний шар. Проте виготовлення та прикріплення узгоджувальний шарів є досить дорогою та тривалою процедурою, що унеможливує їх використання при великих об'ємах контролю та вимагає введення додаткової операції по підготовці об'єкта контролю. Тому при використанні безконтактних методів контролю необхідно враховувати величину втрат енергії акустичних коливань на границі розподілу повітря/ОК, в повітрі та об'єкті контролю (рисунок 4.28).

Для проведення розрахунку в якості збуджуючого елемента виберемо п'єзопластину виготовлену з титанату барію ТБК-3 діаметром $a = 20\text{мм}$, резонансна частота якої складає $f = 1\text{МГц}$. В якості матеріалу для узгоджувального шару - целюлозу вторинної переробки, товщиною $0,085\text{мм}$. Об'єкт контролю переставляє собою сталю пластину, товщиною 10мм .

Для елементарного п'єзоперетворювача з круглою (дископодібною) пластиною діаграма направленості описується формулою [146]:

$$\frac{p}{p_a} = \left| \frac{2J_1(ak \sin \theta)}{(ak \sin \theta)} \right|, \quad (4.40)$$

де θ - кут між напрямком променя і акустичною віссю, J_1 - функція Бесселя першого порядку, p_a - амплітуда поля на акустичній осі, a - радіус п'єзопластини.

При розрахунках будемо користуватися спрощеною формулою для обчислення поля на акустичній осі дископодібного перетворювача:

$$\frac{p}{p_0} = 2 \cdot \left| \sin \frac{\pi a^2}{2\lambda r} \right|, \quad (4.41)$$

де p_0 - амплітуда акустичного сигналу на поверхні середовища, яке дотикається до перетворювача, r - відстані від п'єзопластини до точки спостереження.

Графік залежності амплітуди акустичних коливань на осі перетворювача, який випромінює енергію в повітря, від відстані для п'єзопластини діаметром 20 мм зображено на рисунок 4.29.

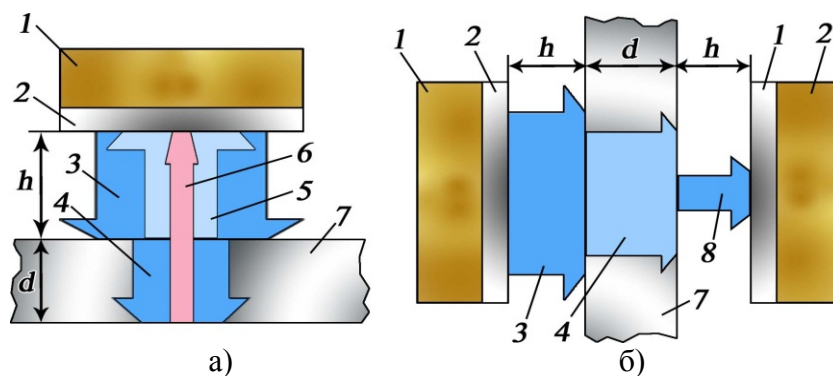
Для запропонованого перетворювача, що випромінюватиме енергію в повітря, приблизне значення границі ближньої зони обчислюється за формулою:

$$r = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{a^2 \cdot f}{c} = \frac{(0,01\text{м})^2 \cdot 1 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}}{331\text{м/с}} = 0,302\text{м}, \quad (4.42)$$

де c - швидкість поширення акустичних коливань в повітрі.

Отже, враховуючи те, що акустичні коливання поширюються від перетворювача до ОК і відбившись від ОК до перетворювача, в нашому випадку відстань від перетворювача до об'єкта контролю (рисунок 4.28) повинна бути не меншою $r/2 = 15$ см. Вибір відстані пов'язаний також з тим що в ближній зоні спостерігається зумовлена інтерференцією немонотонна зміна амплітуди акустичного поля, а в дальній зоні амплітуда монотонно зменшується з

віддалю. Виходячи з цього виберемо відстань від перетворювача до ОК - $h = 16$ см.



1 – п'єзоелектрична пластина, 2 – узгоджувальний шар, 3 – падаюча хвиля, 4 – хвиля, що пройшла, 5 – хвиля, відбита від зовнішньої поверхні, 6 – хвиля, відбита від внутрішньої поверхні, 7 – дослідний зразок (стальна пластина), 8 – хвиля, що пройшла через об'єкт контролю (ОК), h – відстань від перетворювача до ОК, d – товщина пластини

Рисунок 4.28 - Ультразвуковий безконтактний спосіб вимірювання товщини матеріалів при односторонньому а) та двосторонньому б) доступі до поверхні об'єкта контролю

Втрати енергії акустичних коливань для даного способу вимірювання можна записати наступним чином:

- для акустичних коливань відбитих від зовнішньої поверхні ОК [147, 148]:

$$N_1|_{дб} = 2 \cdot (T_T + A_{нов}) + R_1, \quad (4.42)$$

де T_T - втрати у перетворювачі через узгоджувальний шар, $A_{нов}$ - зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в

повітрі, R_1 - втрати енергії відбитої хвилі на границі повітря/ОК (зовнішня поверхня).

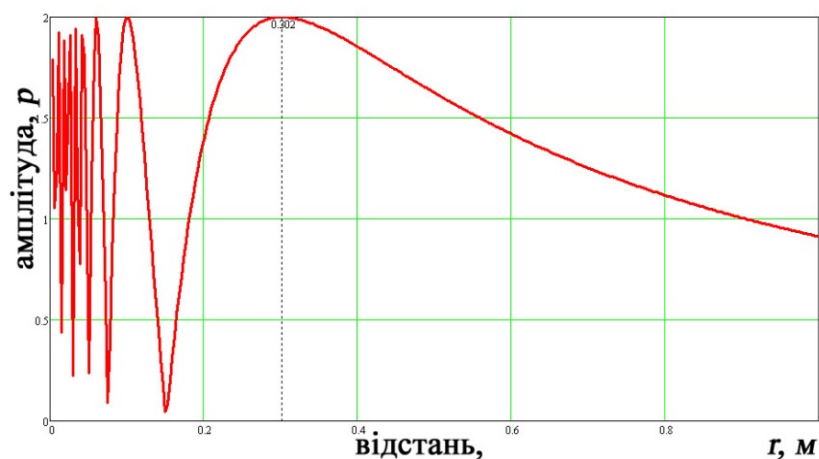


Рисунок 4.29 - Амплітуда поля на акустичній на осі перетворювача

Множник 2 вказує на те що втрати виникають при прямому (від перетворювача) та зворотному (до перетворювача) напрямках:

- для акустичних коливань відбитих від внутрішньої поверхні:

$$N_2|_{дб} = 2 \cdot (T_T + A_{нов} + A_{ОК} + T_1) + R_2 = N_1|_{дб} + 2(A_{ОК} + T_1), \quad (4.43)$$

де $A_{ОК}$ - зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в ОК, T_1 - втрати енергії хвилі, що пройшла на границі ОК/повітря (внутрішня поверхня), R_2 - втрати енергії відбитої хвилі на границі ОК/повітря.

Втрати у перетворювачі через узгоджувальний шар T_T товщиною чверті довжини хвилі можна виразити через

коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань наступним чином:

$$T_T = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 10 \lg T_I = 10 \times \lg \frac{4 \cdot Z^{-1}_1 \cdot Z_3}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right)^2 - \left(\left(\frac{Z_3}{Z_2}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \sin^2(k \cdot h_{yu})}, \quad (4.44)$$

де I_1, I_2 - енергія акустичних коливань падаючої та хвилі, що пройшла, відповідно, Z_1, Z_2, Z_3 - акустичні опора п'єзопластини, узгоджувального шару та повітря відповідно.

Втрати енергії відбитої хвилі на границі на границі розподілу двох середовищ (повітря /ОК та ОК/повітря) можна визначити:

$$R_{1,2} = 10 \lg \frac{I_{12}}{I_1} = 10 \lg \left(\frac{Z_3 - Z_4}{Z_4 + Z_4} \right)^2, \quad (4.45)$$

де I_1, I_{12} - енергія акустичних коливань падаючої та відбитої хвиль відповідно, $Z_3, Z_4 = 46,2 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$ - акустичний опір повітря та ОК (сталевна пластина) відповідно.

Втрати енергії хвилі, що пройшла, на границі розподілу двох середовищ (повітря – ОК) обчислюються за формулою:

$$T_I = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 10 \lg \frac{4Z_3Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2}. \quad (4.46)$$

Втрати, які пов'язані з зменшенням інтенсивності ультразвуку в матеріалі, визначаються затуханням. Це зменшення інтенсивності відбувається за законом:

$$I = I_0 e^{-2\delta \cdot x}, \quad (4.47)$$

де δ - коефіцієнт затухання, визначається віддалю, на якій амплітуда хвилі зменшується в $e = 2,718$ раз і залежить від частоти ультразвукових коливань. Іноді затухання

характеризують параметром N_a (числом від'ємних децибел), на яке зменшується амплітуда сигналу на відстані l м:

$$N_a = 8,686 \cdot \delta. \quad (4.47)$$

Тоді:

$$A_{OK} = 8,686 \cdot \delta_{OK} = 8,686 \cdot 0,45 = 3,9 \text{ дБ/м}, \quad (4.48)$$

де $\delta_{OK} = 0,45 \text{ м}^{-1}$ - коефіцієнт затухання ультразвукових коливань в ОК.

Затухання ультразвуку в повітрі можна приблизно визначити при нормальних умовах з наступного рівняння [147]:

$$A_{nos} = 1,64 f^2 10^{-10} \text{ дБ/м}, \quad (4.49)$$

де f - частота акустичних коливань. При частоті l МГц це затухання становить 164 дБ/м.

Таким чином, втрати енергії акустичних коливань відбитих від зовнішньої та внутрішньої поверхонь ОК можна записати:

$$N_1|_{дб} = 2 \cdot 10 \lg \frac{4Z_1^{-1}Z_3}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right)^2 - \left(\frac{Z_3}{Z_2}\right)^2 - 1} \cdot \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 - 1 \cdot \sin^2(k \cdot h_{yu}) \quad (4.50)$$

$$- 8,686 \delta_{nos} h + 10 \lg \left(\frac{Z_3 - Z_4}{Z_4 + Z_4}\right)^2$$

$$N_2|_{дб} = N_1|_{дб} + 2 \left(8,686 \cdot \delta_{OK} d + 10 \lg \frac{4Z_3 Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2} \right). \quad (4.51)$$

Після проведення розрахунків згідно з формул (4.50) та (4.51) отримаємо наступні значення (для товщини пластини $d = 10 \text{ мм}$):

- для п'єзоперетворювача з узгоджувальним шаром, виготовленим з целюлози вторинної переробки:

$$N_1|_{дб} = 2 \cdot (10 \lg 0,474 - 164 \cdot 0,16) + 10 \times \\ \times \lg \left(\frac{0,00043 \cdot 10^6 - 46,2 \cdot 10^6}{0,00043 \cdot 10^6 + 46,2 \cdot 10^6} \right)^2 = -58,96 дБ; \quad (4.52)$$

$$N_2|_{дб} = -58,965 + \\ + 2 \left(-3,9 \cdot 0,01 + 10 \lg \frac{4 \cdot 0,00043 \cdot 10^6 \cdot 46,2 \cdot 10^6}{(0,00043 \cdot 10^6 + 46,2 \cdot 10^6)^2} \right) =; \quad (4.53) \\ = -148,32 дБ$$

- для п'єзоперетворювача без узгоджувального шару:

$$N_1|_{дб} = 2 \cdot (10 \lg 0,0000688 - 164 \cdot 0,16) + 10 \times \\ \times \lg \left(\frac{0,00043 \cdot 10^6 - 46,2 \cdot 10^6}{0,00043 \cdot 10^6 + 46,2 \cdot 10^6} \right)^2 = -135,73 дБ; \quad (4.54)$$

$$N_2|_{дб} = -135,729 + 2 \times \\ \times \left(-3,9 \cdot 0,01 + 10 \lg \frac{4 \cdot 0,00043 \cdot 10^6 \cdot 46,2 \cdot 10^6}{(0,00043 \cdot 10^6 + 46,2 \cdot 10^6)^2} \right) =; \quad (4.55) \\ = -225,09 дБ$$

Побудуємо графічну залежність величини втрат енергії акустичних коливань від частоти для п'єзоелектричного перетворювача з узгоджувальним шаром товщиною чверть довжини хвилі, який виготовлений з целюлози вторинної переробки та для перетворювача без узгоджувального шару при вимірюванні безконтактним акустичним методом товщини сталеві пластини (рисунок 4.30).

Таким чином з формул (4.52) – (4.55) можна зробити висновок про те, що використання узгоджувального шару виготовленого з целюлози вторинної переробки зменшує втрати енергії акустичних коливань при безконтактному

вимірювання товщини елементів металоконструкцій більш ніж на 77дБ.

При вимірюванні товщини ОК безконтактним акустичним методом при двосторонньому доступі до його поверхонь визначаються втрати енергії акустичних коливань, що пройшли через ОК. Перетворювачі (випромінюючий та приймаючий) розміщуються один навпроти одного так щоб їхні акустичні осі співпадали на відстані від поверхонь ОК, яка визначена попередньо. Також в даному випадку необхідно враховувати втрати енергії акустичних коливань в повітрі, на границях розділу повітря/ОК, ОК/повітря, в матеріалі ОК та втрати у випромінюючому та приймаючому перетворювачі через узгоджувальний шар

Таким чином, втрати енергії акустичних коливань, що пройшли через ОК можна записати:

$$N \Big|_{дб} = 2 \cdot (10 \lg \frac{4 \cdot Z_1^{-1} \cdot Z_3}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right)^2 - \left(\left(\frac{Z_3}{Z_2}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \sin^2(k \cdot h_{yuu})}, (4.56)$$

$$- 8,686 \cdot \delta_{ноб} \cdot h + 8,686 \cdot \delta_{ОК} \cdot d + 20 \lg \frac{4Z_3Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2}$$

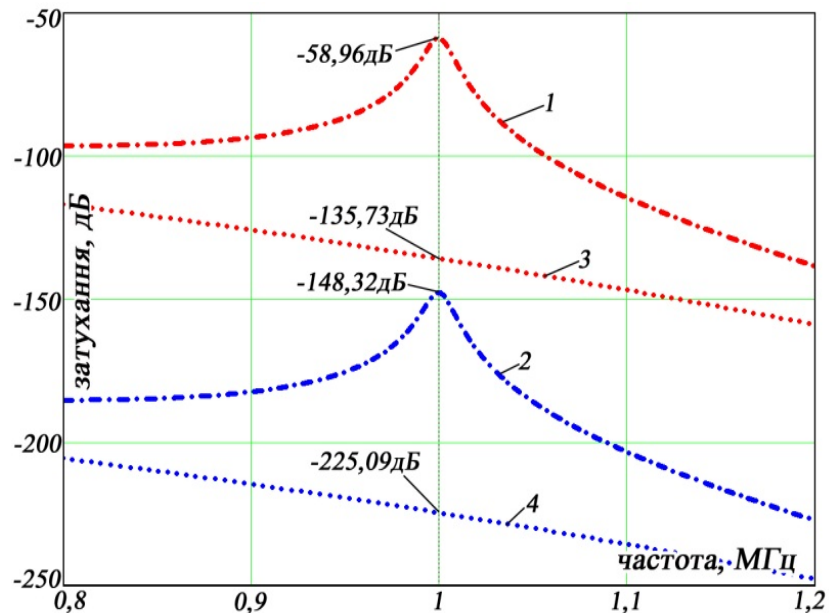
Після проведення розрахунків згідно з формули (4.56) отримаємо наступне значення втрат енергії акустичних коливань при вимірюванні товщини ОК (для товщини пластини $d = 10_{мм}$) при двосторонньому доступі до поверхні ОК:

- для п'єзоперетворювачів з узгоджувальним шарами:

$$N \Big|_{дб} = -147,5 дБ ; \quad (4.57)$$

- для п'єзоперетворювачів без узгоджувальних шарів:

$$N \Big|_{дб} = -224,4 дБ . \quad (4.58)$$



1, 3 – акустичні коливання відбиті від зовнішньої поверхні ОК, 2, 4 – від внутрішньої поверхні ОК

Рисунок 4.30 - Залежність величини втрат енергії акустичних коливань від частоти для п'єзоелектричного перетворювача з узгоджувальним шаром (позиція 1, 2) та без узгоджувального шару (позиція 3, 4) при вимірюванні безконтактним акустичним методом товщини сталевій пластини

Зрозуміло, що при такому значенні втрат амплітуда інформаційних сигналів буде нижчою рівня власних шумів перетворювача та підсилювача акустичних коливань. Оціночні розрахунки показують, що очікуване значення відношення сигнал/шум буде в діапазоні від -2 дБ до -9 дБ при товщині ОК до 10 мм [148].

Для розроблення конструкції та визначення характеристик перетворювача проведемо розрахунок характеристик акустичного поля. Як говорилось вище, в акустичному полі перетворювача виділяють дві зони: ближня і дальня. В ближній зоні більше 80% енергії коливань знаходиться в межах циліндра, який обмежений краями п'єзопластини. В дальній зоні поле має вигляд променів, які розходяться з точки, що має назву ефективного акустичного центру. Нормований за максимумом акустичного тиску графік залежності амплітуди (або інтенсивності) поля в дальній зоні функції від напрямку поширення хвилі називається діаграмою направленості.

Для нашого випадку діаграму направленості п'єзоелектричного перетворювача з одним узгоджувальним шаром, який навантажений на повітря побудуємо згідно з формули (4.59). Центральна частина діаграми направленості, в межах якої амплітуда зменшується від одиниці до нуля, називається основною пелюсткою перетворювача (рисунок 4.31) [149, 150].

Половину кута розкриття основної пелюстки п'єзоелектричного перетворювача можна приблизно визначити за формулою [149]:

$$\theta = \arcsin\left(0,61 \frac{\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(0,61 \frac{331 \text{ м/с}}{0,01 \text{ м} \cdot 1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}}\right) = 1,14^\circ. \quad (4.59)$$

Отже з ефективного акустичного центру ультразвукові коливання розходяться у вигляді променів під кутом $1,14^\circ$ до акустичної осі перетворювача. На границі розподілу повітря – ОК акустичні коливання зазнають часткового відбивання та заломлення.

В нашому випадку, при нормальному вводиті акустичних коливань, кут падіння променя α на поверхню ОК та величина кута відбитого променя β буде рівною куту розходження акустичних променів θ (рисунок 4.32).

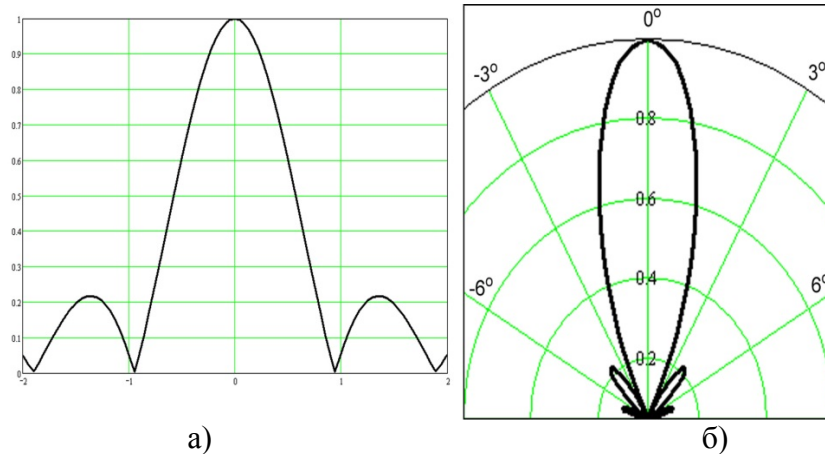


Рисунок 4.31 – Діаграми направленості поля п'єзоелектричного перетворювача навантаженого на повітря в прямокутних (а) та полярних (б) координатах

Величину кута заломлення γ акустичних коливань, що пройшли в ОК, отримаємо з закону синусів:

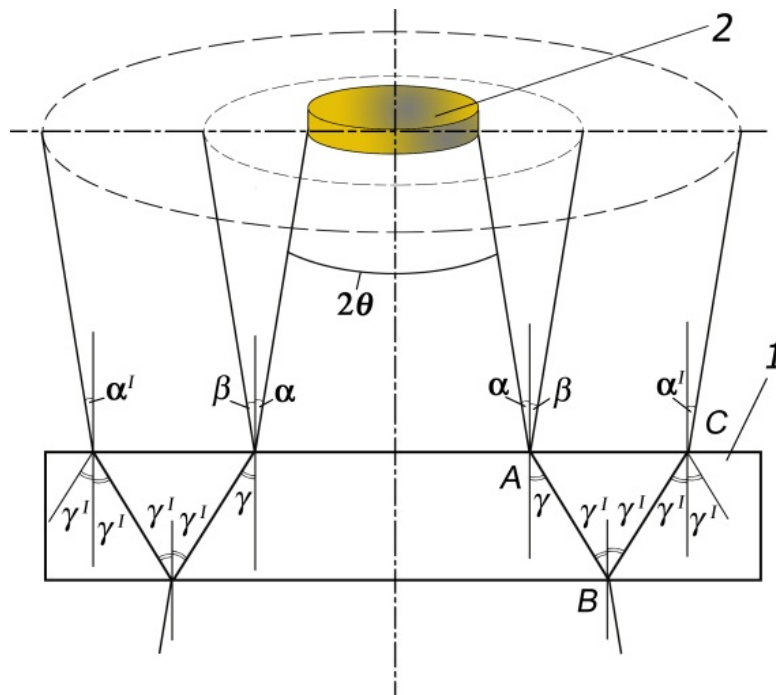
$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \gamma}{c_2} \Rightarrow \gamma = \arcsin \frac{c_2 \cdot \sin \alpha}{c_1} =$$

$$= \arcsin \frac{5800 \text{ м/с} \cdot \sin 1,14^\circ}{331 \text{ м/с}} = 21,1^\circ \quad (4.60)$$

де c_1, c_2 - швидкості поширення повздовжніх хвиль у повітрі та ОК (сталь) відповідно.

Поширюючись в тілі ОК, акустичні коливання зазнають також відбивання та заломлення на межі ОК – повітря та поширюються в зворотному напрямку до зовнішньої поверхні. Величина кута відбивання γ' на внутрішній поверхні (точка В, рисунок 4.32) буде рівною величині кута заломлення на зовнішній межі розподілу середовищ повітря – ОК (точка А), величині кута відбивання на внутрішній межі розподілу

середовищ ОК – повітря (точка B) та величині кута падіння акустичного променя на зовнішню межу розподілу ОК – повітря в точці C .



1 – ОК; 2 – п'єзоперетворювач

Рисунок 4.32 - Поширення акустичних променів у повітрі та ОК

Величина кута заломлення акустичного променя на зовнішній межі розподілу ОК – повітря (точка C) визначається аналогічно за формулою (4.60) і буде рівною куту падіння акустичного променя на зовнішню поверхню: $\alpha = \alpha' = 1,14^\circ$.

Якщо зобразити акустичні промені у вигляді зрізаного конуса з кутом при вершині рівним θ , то діаметр плями

акустичних променів d_1 на поверхні ОК можна визначити за наступною формулою $d_1 = 2(a + h \cdot \operatorname{tg} \alpha)$.

В площині перетворювача діаметр плями d_2 акустичних променів отримаємо з формули:

$$d_2 = 2(a + 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha). \quad (4.61)$$

Діаметр плями акустичних променів D відбитих від внутрішньої поверхні ОК в площині перетворювача отримаємо з формули:

$$D = 2(a + 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \alpha + 2 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \gamma). \quad (4.62)$$

Якщо припустити, що густина відбитих від зовнішньої та внутрішньої поверхні ОК акустичних променів в площині перетворювача буде однаковою в кожній точці цієї площини, то співвідношення їх енергій до енергій вихідної хвилі буде відповідно рівне відношенню квадратів діаметрів плям акустичних променів. Провівши певні розрахунки згідно з формул (4.60) та (4.62) та розрахувавши площу випромінювання та приймання поверхні перетворювача, з попереднього твердження можна зробити висновок про те, що в нашому випадку на п'єзоелемент потрапить тільки 37% та 17% випроміненої енергії від зовнішньої та внутрішньої поверхні ОК відповідно.

Тому для збільшення чутливості перетворювача необхідно зменшити кут розкриття основної пелюстки перетворювача щоб акустичні промені поширювались паралельно до акустичної осі перетворювача. Дану проблему можна вирішити шляхом використання акустичної лінзи, яка виготовлена з відповідного матеріалу та має товщину чверть довжини акустичної хвилі в центральній частині [151]. Акустичну лінзу розміщують між п'єзопластиною та узгоджувальним шаром і виготовляють з матеріалу, акустичний імпеданс якого близький до акустичного імпедансі п'єзопластини для збільшення коефіцієнту передачі енергії акустичних коливань. Проте, в такому випадку,

виникає певна трудність з виготовленням та кріпленням узгоджувальних шарів до акустичної лінзи, оскільки вони повинні мати увігнуту форму.

Для збільшення чутливості та зменшення втрат енергії акустичних коливань, які виникають в наслідок розходження акустичних променів, в нашому випадку доцільно розмістити перетворювач ближче до об'єкта контролю, таким чином, щоб відстань від ОК до ПЕП була меншою половини довжини ближньої зони перетворювача. В ближній зоні акустичні промені поширюються паралельно до акустичної осі перетворювача.

Спосіб акустичного безконтактного одночасного вимірювання залишкової товщини та ступеня ерозійного та корозійного пошкодження металоконструкцій базується на тому, що ультразвукові коливання 3 (УЗК) від ПЕП, розміщеного зовні над ОК, через шар повітря направляється в зону контролю.

УЗК на грані розділу двох середовищ (повітря/метал) зазнають часткового відбивання і заломлення, тобто промінь УЗК 3, відбивається від зовнішньої ОК і, пройшовши зворотній шлях, попадає на ПЕП. Заломлений промінь УЗК 6, пройшовши через ОК, відбивається від його внутрішньої поверхні і, поширюючись в зворотному напрямку через ОК і шар повітря, попадає на ПЕП. При розміщенні ультразвукового п'єзоперетворювача над поверхнею ОК на ділянці з відсутніми зовнішніми та внутрішніми ерозійними пошкодженнями, проводять вимірювання часу проходження УЗК від ПЕП до ОК і час проходження УЗК в тілі ОК та приймають ці значення за базові.

При паралельному переміщенні ультразвукового перетворювача відносно поверхні виробу (наприклад, для трубних виробів паралельно осі) і його розміщенні на ділянкою з ерозійним чи корозійним пошкодженням зовнішньої та внутрішньої поверхні ОК час проходження ультразвукового

променя в шарі повітря збільшується, а час проходження УЗК в тілі ОК зменшується. Шляхом віднімання відповідних базових значень часових інтервалів, заміряних на некоронованій ділянці і на коронованій, які відповідають часу проходження ультразвукового променя в шарі повітря та тілі ОК, отримують часові інтервали які будуть пропорційні величині зовнішнього та внутрішнього ерозійного чи корозійного пошкодження відповідно. Час проходження УЗК в тілі металоконструкції буде пропорційний її залишковій товщини.

Таким чином, глибина зовнішньої та внутрішньої корозії визначається за формулами:

$$\Delta h = \frac{(t_{p1} - t_{p2}) \cdot c_{\Pi}}{2}, \quad (4.63)$$

$$\Delta H = \frac{(t_{M1} - t_{M2}) \cdot c_M}{2}, \quad (4.64)$$

а значення величини залишкової товщини металічного виробу визначатиметься за формулою:

$$H_3 = \frac{t_{M2} \cdot c_M}{2}, \quad (4.65)$$

де Δh , ΔH - величина глибини зовнішнього та внутрішнього корозійного пошкодження відповідно, t_{p1} , t_{p2} - час проходження УЗК в повітрі в першому та другому випадках відповідно, t_{M1} , t_{M2} - час проходження УЗК в металічному виробі першому та другому випадках відповідно, c_{Π} - швидкість поширення УЗК в повітрі, c_M - швидкість поширення УЗК в металічному виробі, H_3 - залишкова товщина металічного виробу.

Визначення товщини об'єкта контролю прохідним методом здійснюється наступним чином.

Безконтактні ультразвукові перетворювачі, випромінюючий та приймаючий, розміщуються один навпроти іншого на фіксованій відстані $L = 20 \text{ мм}$, так щоб їхні акустичні осі співпадали. Вмикається експериментальна установка та відбувається вимірювання часу проходження ультразвукових коливань T_1 від випромінюючого до приймаючого перетворювача (рисунок 4.33, а).

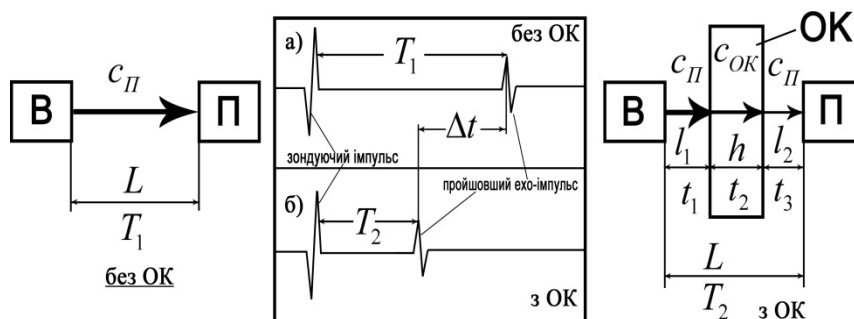


Рисунок 4.33 - Схема вимірювання товщини

Після цього між перетворювачами розміщується плоский зразок, так щоб його поверхні були перпендикулярні до акустичних осей перетворювачів та проводиться вимірювання часу проходження ультразвукових коливань T_2 , який буде рівний сумі часу проходження УЗК від випромінюючого перетворювача до ОК – t_1 , часу проходження УЗК в ОК – t_2 та часу поширення ультразвукових коливань від об'єкта контролю до приймаючого перетворювача – t_3 (рисунок 4.33, б):

$$T_2 = t_1 + t_2 + t_3. \quad (4.66)$$

Враховуючи те, що час поширення УЗК рівний частці від ділення пройденого шляху на швидкість поширення, тоді рівняння (4.66) можна записати наступним чином:

$$T_2 = \frac{l_1}{c_{\Pi}} + \frac{h}{c_{OK}} + \frac{l_3}{c_{\Pi}}, \quad (4.67)$$

$$\text{або } T_2 = \frac{1}{c_{\Pi}}(l_1 + l_2) + \frac{h}{c_{OK}}, \quad (4.68)$$

де l_1, l_2 – відстань від випромінюючого перетворювача до ОК та від ОК до приймаючого перетворювача відповідно, h – товщина ОК, c_{OK}, c_{Π} – швидкість поширення УЗК в матеріалі ОК та повітрі відповідно.

Оскільки $l_1 + l_2 = L - h$ тоді:

$$T_2 = \frac{1}{c_{\Pi}}(L - h) + \frac{h}{c_{OK}}. \quad (4.69)$$

Після розкриття дужок в рівнянні (4.69), різницю $\Delta t = T_1 - T_2$ часів проходження УЗК в першому та другому випадках можна записати наступним чином:

$$\Delta t = \frac{L}{c_{\Pi}} - \frac{L - h}{c_{\Pi}} + \frac{h}{c_{\Pi}} - \frac{h}{c_{OK}}, \quad (4.70)$$

$$\text{або } \Delta t = h \left(\frac{c_{OK} - c_{\Pi}}{c_{OK} \cdot c_{\Pi}} \right), \quad (4.71)$$

де $T_1 = \frac{L}{c_{\Pi}}$.

Таким чином з рівняння (4.71) можемо записати вираз для визначення товщини об'єкта контролю:

$$h = \Delta t \left(\frac{c_{OK} \cdot c_{\Pi}}{c_{OK} - c_{\Pi}} \right). \quad (4.72)$$

Отже, для розрахунку товщини об'єкта контролю при вимірюванні ультразвуковим прохідним методом, необхідно виміряти час проходження УЗК від випромінюючого до приймаючого перетворювача без та при розміщенні між ними

ОК, при цьому очевидно, що ця товщина не повинна залежати від відстані між перетворювачами.

Для вибору оптимальної відстані від перетворювача до ОК та з метою підвищення чутливості безконтактного методу контролю, необхідно володіти інформацією про дійсні технічні характеристики ультразвукового перетворювача, зокрема розподіл інтенсивності акустичного поля на осі перетворювача, простіше кажучи побудувати діаграму направленості п'єзоперетворювача. З цією метою було проведено експериментальне вимірювання діаграми направленості розробленого ультразвукового безконтактного п'єзоперетворювача (рисунок 4.34).

В ході проведених експериментальних досліджень було отримано наступну діаграму направленості, яка зображена на рисунку 4.35.

З отриманих результатів експериментальних досліджень щодо вимірювання діаграми направленості розробленого безконтактного п'єзоперетворювача, було встановлено оптимальне значення відстані від перетворювача до об'єкта контролю, в нашому ця відстань складає 2 см.

Діаграму направленості розробленого безконтактного п'єзоперетворювача побудовано з отриманих експериментальних даних за допомогою програмного пакету *MATLAB R14*.

Дані експериментальні випробування проводились за допомогою безконтактного ультразвукового перетворювача з одношаровим узгоджувальним шаром. Експериментально було визначено, що така конструкція перетворювача забезпечувала зменшення втрат енергії акустичних коливань на 26 дБ на границі розділу п'єзоелемент/повітря. Проте за допомогою такого перетворювача не було можливим отримання луно-імпульсів через об'єкти контролю, які виготовлені зі сталі.



Рисунок 4.34 - Вимірювання діаграми направленості розробленого перетворювача

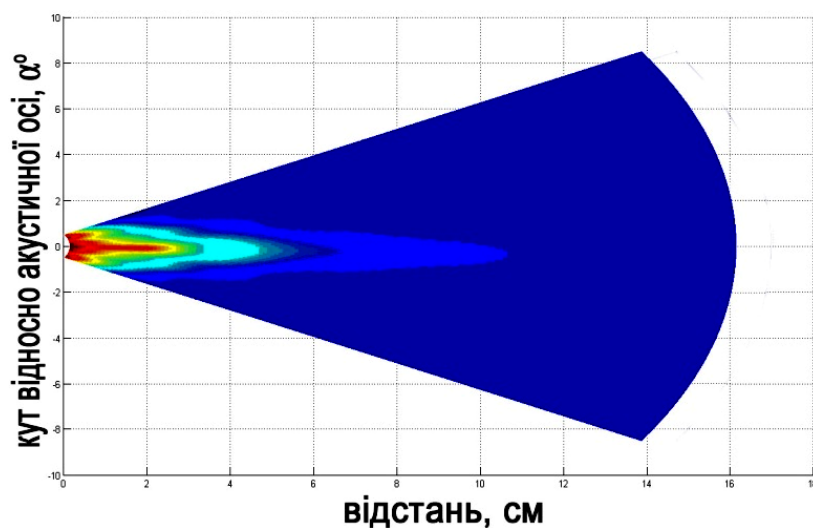
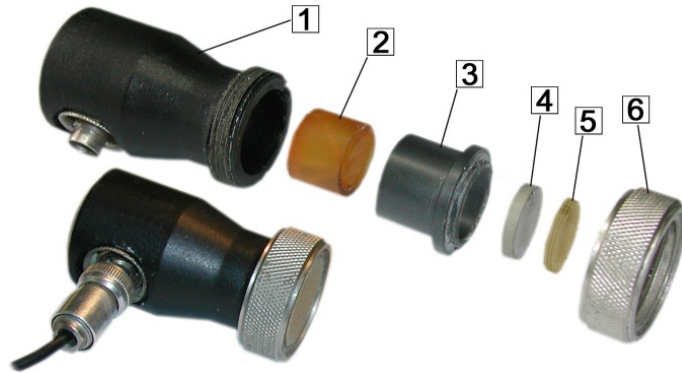


Рисунок 4.35 - Діаграма направленості розробленого перетворювача

Тому провівши аналіз літературних джерел [152] та здійснивши математичне моделювання багатошарового узгоджувального шару, було запропоновано нову конструкцію безконтактного ультразвукового перетворювача (рисунок 4.36).



1 – корпус перетворювача, 2 – демпфер, 3 – корпус резонатора, 4 – п'єзоелемент, 5 – узгоджувальний шар, 6 – фіксує кільце

Рисунок 4.36 - Конструкція багат шарового безконтактного ультразвукового перетворювача

Конструктивно ультразвуковий перетворювач складається з корпусу 1, демпфера 2, корпусу резонатора 3, п'єзoeлектричної пластини 4, виготовленої з титанату барію ТБК-3 діаметром $a = 20\text{ мм}$, резонансна частота якої складає $f = 1\text{ МГц}$, багат шарового узгоджувального шару 5 та фіксує кільця 6. Демпфер, п'єзoeлектрична та узгоджувальний шар склеюються між собою за допомогою епоксидної смоли і утворюють резонатор, який розміщується в корпусі резонатора. Електричне з'єднання п'єзопластини з відповідними контактами закріпленого на корпусі роз'єму, виконане за допомогою тонких провідників. Резонатор кріпиться в корпусі перетворювача за допомогою фіксує кільця.

Багат шаровий узгоджувальний шар складається з трьох пластин дископодібної форми, діаметром, який рівний діаметру п'єзoeлектричної пластини. Перша пластина узгоджувального шару, яка кріпиться безпосередньо до п'єзопластини, виготовлена з алюмінію і має товщину $0,78$

мм. Друга пластина узгоджувального шару виготовлена з поліетилену, товщиною 0,65 мм. Остання пластина узгоджувального шару виготовлена з целюлози вторинної переробки і має товщину 0,085 мм [153].

Пластини узгоджувального шару кріпляться між собою і до п'єзоелемента за допомогою тонкого шару епоксидної смоли. Експериментально, згідно з методикою описаною в попередньому підрозділі, було визначено, що така конструкція перетворювача забезпечує зменшення втрат енергії акустичних коливань на 32дБ. На дану конструкцію перетворювача отримано патент України на корисну модель [153].

Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень дали можливість розробити та виготовити дослідно-експериментальну установку, розробити проект програми та методики проведення випробувань з метою визначення чутливості методу.

Експериментальні випробування були виконані на сімох різних плоских зразках для настроювання ультразвукових дефектоскопів. Товщини відібраних зразків були наступними: 1 мм, 3 мм, 5 мм, 7 мм, 9 мм та 10 мм.

В ході проведення випробувань було отримано наступні результати (таблиця 4.3.).

Також було проведено випробування розроблено методу при контролі величини корозійних пошкоджень металоконструкцій. Випробування проводились на фрагменті труби магістрального трубопроводу з наявними корозійними пошкодженнями по тілу металоконструкції та в області зварного шва (рисунок 4.37), шляхом сканування його поверхні за допомогою акустичного перетворювача [154].

За результатами випробувань отримано просторовий образ зразка, який було побудовано за допомогою розробленого програмного забезпечення (рисунок 4.38).

Таблиця 4.3 - Результати випробувань

Маркування зразка та дійсне значення товщини	Прилади та устаткування, використане при випробуваннях	Покази експериментальної установки, мм	Абсолютна похибка вимірювань, мм
ЗН №1/10 h = 1 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	0,63	0,37
ЗН №1/10 h = 3 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	3,47	0,47
ЗН №1/10 h = 4 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	3,58	0,42
ЗН №1/10 h = 5 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	5,41	0,41
ЗН №1/10 h = 7 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	6,72	0,38
ЗН №1/10 h = 9 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	8,64	0,36
ЗН №1/10 h = 10 мм	Мікрометр МК25-2 №4718	9,58	0,42
Середня абсолютна похибка вимірювань – 0,41 мм.			
Похибка приведена до діапазону (7 мм) вимірювань – 5,75 %.			

Таким чином для підвищення чутливості безконтактного методу контролю шляхом удосконалення конструкції п'єзоперетворювачів необхідно використовувати комплексний метод, який базується у застосуванні узгоджувальних шарів,

фокусувальних лінз та сучасних методів оброблення дефектоскопічної інформації.



Рисунок 4.37 - Зразок для проведення випробувань

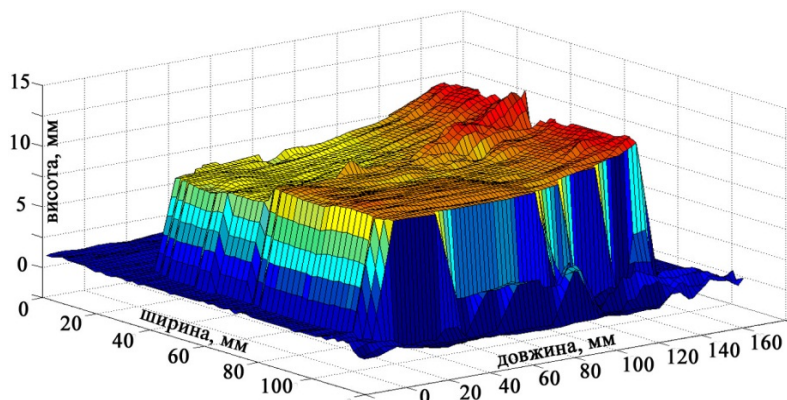


Рисунок 4.38 - Просторовий образ зразка

4.2 Підвищення точності та якості контролю трубних колон

Відомо, що акустичний (ультразвуковий) метод є єдиним теоретично можливим методом контролю якості різьбових

з'єднань у зібраному стані. Метод ґрунтується на здатності ультразвукових хвиль розповсюджуватись на велику товщину в багатьох речовинах і відбиватись від межі розподілу двох середовищ. Контроль здійснюється шляхом сканування п'єзоперетворювачем дефектоскопа (п'єзоперетворювач містить п'єзоелемент, що перетворює електричні коливання в ультразвукові і навпаки та слугує для випромінювання й приймання УЗК) поверхні підконтрольного виробу. При цьому ультразвуковий промінь може бути введений по нормалі і під різними кутами до поверхні виробу, що дає можливість збуджувати в ньому хвилі різних типів (повздовжні, поверхневі, рушійні, нормальні) та виявляти поверхневі й глибинні дефекти різної орієнтації. Це луно-методу в оптимальних умовах контролю на частоті 2 МГц...4 МГц дає змогу виявити дефекти, відбиваюча поверхня яких має площу $0,5 - 1 \text{ мм}^2$ [54, 139].

Питанням застосування ультразвукового методу для контролю якості матеріалів і виробів, у тому числі складної форми, значну увагу приділяють у своїх роботах вітчизняні вчені В.С. Соколов [141], І.М. Єрмолов [54, 55], В. В. Ключев [121], А.К. Гурвіч [45], Л.Д. Розенберг [131], І.Г. Мігаль [100], а також закордонні – Л. Бергман [20], М. Матаушек [99], І. Крауткремер [38], Д. Флінкбзут, та інші. Але питання контролю трубних виробів не знайшли належного освітлення в спеціальній літературі, і результати проведених досліджень не можуть бути використані для розроблення спеціалізованих засобів ультразвукового контролю трубних колон, у тому числі і нових конструкцій. Даний розділ присвячено розробленню нових способів контролю якості трубних колон: дефектоскопії тіла і різьбових з'єднань; контролю якості згинчування різьбових з'єднань. Також розглянуто питання підвищення точності вимірювання з використанням акустичних методів.

Розроблення способів контролю якості згинчування різьбових з'єднань зі стабілізуючими поясками.

У процесі розроблення нафтових і газових родовищ широке застосування знайшли нові конструкції різьбових з'єднань, особливість яких полягає в наявності конічних або циліндричних стабілізуючих поясків. Нами було розроблено декілька способів акустичного контролю величини діаметрального натягу по стабілізуючому пояску. Найбільш ефективним виявився спосіб багатократного проходження (відбиття) ультразвукових хвиль через поверхню. Його перевагою є можливість визначення як середнього, так і мінімального значення натягу по всьому з'єднанню без сканування поверхні охоплю вальної деталі, що значно підвищує продуктивність і достовірність контролю [55,56].

Реалізацію способу зображено на рисунку 4.39. Суть його полягає в тому, що кут падіння УЗК на внутрішню поверхню охоплюваної деталі визначають з умови:

$$\psi = \arctd \frac{R \sin \frac{\pi}{6n}}{R - r - R \left(1 - \sqrt{4 \sin^2 \frac{\pi}{12n} - \sin^2 \frac{\pi}{6n}} \right)}, \quad (4.61)$$

де R, r – відповідно радіуси зовнішніх поверхонь охоплюваної та охоплюваної деталей, м; n – кількість відбиттів від внутрішньої поверхні охоплюваної деталі в секторі, довжина хорди якого дорівнює R .

Величину діаметрального натягу при цьому визначають за співвідношенням амплітуд луно-імпульсів, одержаних у результаті:

- двократного відбиття від внутрішньої поверхні охоплюваної деталі (муфти);
- однократного відбиття від внутрішньої поверхні охоплюваної деталі (труби);

- багатократного відбиття від внутрішньої поверхні охоплюваної деталі (разового пробігу по її перерізу);
- багатократного відбиття від внутрішньої поверхні охоплюваної деталі (разового пробігу по перерізу обох деталей).

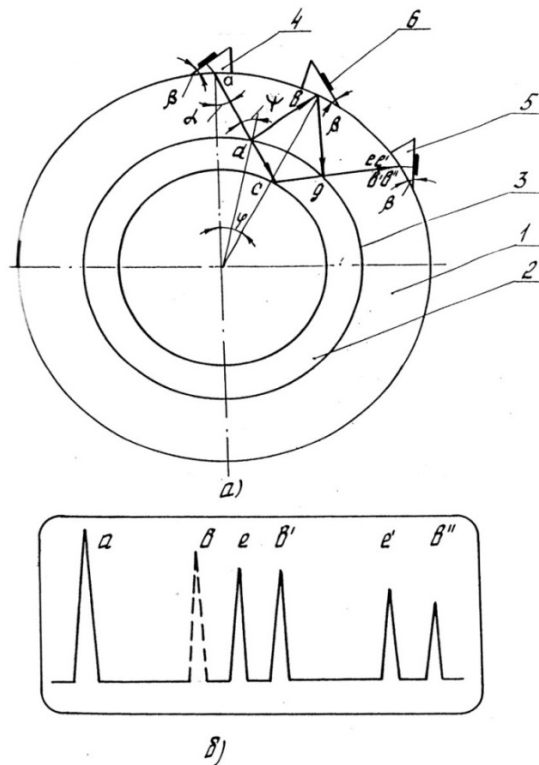


Рисунок 4.39 – Графічне зображення способу контролю діаметрального натягу акустичним методом а) і зображення, що спостерігається при цьому на екрані дефектоскопа б)

Для того, щоб використовувати під час проведення контролю тільки два п'єзоперетворювачі (випромінювач і приймач), а також визначити значення діаметрального натягу як на певній ділянці з'єднання, так і середнє по всій

окружності з'єднання, величину кута ψ вибирають таку, щоб кількість відбиттів від внутрішніх поверхонь охоплю вальної та охоплюваної деталей була цілим числом.

Для реалізації наведеного способу кут призми β п'єзоперетворювачів визначають із залежності:

$$\beta = \arcsin \left[\frac{r}{R} \cdot \frac{C_1}{C_2} \sin (l - \psi) \right], \quad (4.62)$$

де R, r – відповідно радіуси зовнішніх поверхонь охоплю вальної та охоплюваної деталей, м; C_1, C_2 – швидкості розповсюдження УЗК в матеріалі призми п'єзоперетворювача і в контрольованому виробі, м/с; l – довжина дуги, хорда якої дорівнює R , градуси; ψ – кут падіння УЗК на внутрішню поверхню охоплюваної деталі, градуси.

На рисунку 4.39 зображено переріз з'єднання: охоплювана деталь (труба) 1, охоплювана деталь (замок) 2 та поверхня їх з'єднання 3. УЗК, що вводяться випромінюючим п'єзоперетворювачем 4 в тіло охоплю вальної деталі 1, приймаються п'єзоперетворювачем-приймачем 5, причому п'єзоперетворювачі розміщені зустрічно, а кути їх призм дорівнюють β . Після разового пробігу УЗК по перерізу замка 2 вони знову приймаються п'єзоперетворювачем-приймачем 5 у тій самій точці, яку позначимо b'' (на рисунку 4.40 вона співпадає з точкою b'). Прийнятим сигналам на рисунку 4.40б відповідають імпульси b', b'' . Частина ультразвукової енергії, випромінюваної п'єзоперетворювачем 4, в точці d проходить е тіло труби 1 і після відбиття (точка c) та проходження через поверхню з'єднання (точка g) у точці e приймається п'єзоперетворювачем-приймачем 5. Після разового пробігу по перерізу замка 2 і труби 1 УЗК знову попадають на п'єзоперетворювач-приймач 5 в точці e' . Зображені на рисунку точки b', b'' та e', e'' співпадають. Але у зв'язку з тим, що УЗК, випромінювані п'єзоперетворювачем 4 в точці

d , перш ніж прийматись п'єзоперетворювачем-приймачем 5, пройдуть різні віддалі, імпульси e , b' , e' , b'' на екрані дефектоскопа (рисунок 4.39 б) будуть рознесені. За величиною амплітуд прийнятих ультразвукових луно-імпульсів судять про величину натягу в контрольованому з'єднанні. Для знаходження місце розташування несуцільності в з'єднанні необхідно п'єзоперетворювачі 4 і 5 обертати навколо замка 2: у місці знаходження несуцільності імпульс b' значно зростатиме. Для більш точного визначення місця розташування несуцільності необхідно використати додатковий п'єзоперетворювач 6, що підключається паралельно з п'єзоперетворювачем 4. Луно-імпульс, що приймається п'єзоперетворювачем 4, на екрані дефектоскопа буде спостерігатись як імпульс b (штрихова лінія), який можна використати також для спостереження за якістю акустичного контакту.

Контроль за даним способом можна проводити беручи до уваги лише імпульси e та b' , але тоді необхідно здійснювати сканування зовнішньої поверхні замка. Таким чином, вимірюючи і зіставляючи між собою амплітуди імпульсів b', b'', e', e'' , можна оцінювати величину діаметрального натягу зібраних з'єднань [90].

Дослідження способів контролю якості процесу згвинчування різьбових з'єднань обсадних труб

Дане питання найдоцільніше розглядати на прикладі згвинчування різьбових з'єднань обсадних труб як дуже відповідальних і таких, що не підлягають ремонту.

Традиційний підхід до забезпечення якості згвинчування різьбових з'єднань на промислах не зовсім задовольняє зростаючі вимоги до міцності і герметичності різьбових з'єднань трубних колон. Одним із найоб'єктивніших параметрів, що характеризують стан

різьбових з'єднань, є значення контактних тисків, які виникають у з'єднаних поверхнях. У попередньому розділі запропоновано спосіб оцінки якості різьбового з'єднання шляхом визначення величини контактного тиску акустичним методом. Але застосовувати наведений спосіб для контролю якості процесу згвинчування різьбових з'єднань у багатьох випадках важко. Це пояснюється наступним:

1) необхідністю великого банку даних результатів експериментальних досліджень, що описують залежність параметрів акустичного методу від кількості обертів і величини контактних тисків. Окрім того необхідно враховувати вплив конструктивних і технологічних чинників;

2) складністю реалізації такого способу контролю.

Нами запропоновано спосіб контролю якості процесу згвинчування, що базується на його фізичній суті, яка полягає в особливостях залежності крутного моменту згвинчування від величини контактного тиску і необхідності забезпечення в з'єднанні після його згвинчування певного значення радіальної деформації.

Суть запропонованого способу полягає в тому, що під час згвинчування різьбових з'єднань постійно з певним кроком $\Delta\varphi$ (наприклад $\Delta\varphi=0,1$ оберту) проводять вимірювання контактного тиску в з'єднаних поверхнях акустичним методом. Одночасно з тією ж дискретністю (кроком) визначають величину і знак похідної $dP/d\varphi$. Якість процесу згвинчування оцінюють за відхиленням значень контактних тисків від номінальних (порівняння йде при кожному вимірюванні), швидкості зміни величини і знаку похідної $dP/d\varphi$. Пояснення до способу зображено на рисунках 4.40 і 4.41. Якість процесу згвинчування є задовільною, якщо поточне значення контактного тиску P_i $min \angle P_i \angle P_i max$, а $dP > 0$. Процес згвинчування вважають закінченим, а якість з'єднання – задовільною, якщо $dP/d\varphi=0$

або $dP/d\varphi \angle A$ упродовж часу $t = n\Delta\varphi$, а значення P_i знаходиться в межах допуску. Цей стан відповідає досягненню на з'єднаних поверхнях напружень, близьких до межі плинності (напруження в муфті на з'єднанні другого витка різьби дорівнюють $\sigma_r = \sigma_i \pm 10\%$). Максимальні та мінімальні значення контактних тисків і їх заміну під час згвинчування визначають теоретично за методикою, запропонованою С.Ф.Біликом [23] або експериментально.

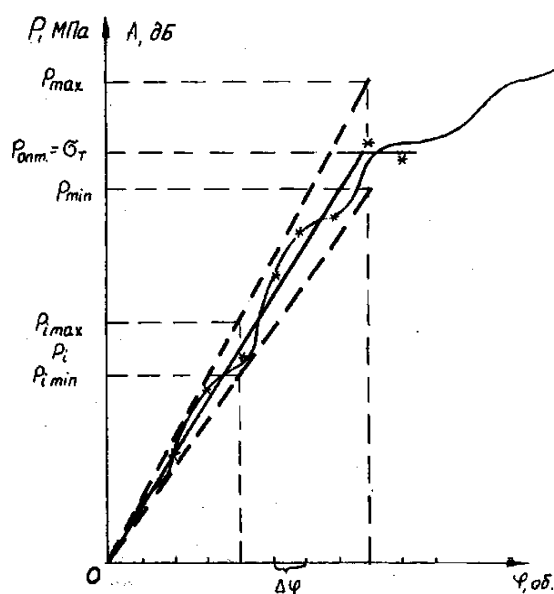


Рисунок 4.40 - Схема контролю якості процесу згвинчування різьбових з'єднань

На рисунку 4.41 зображено блок-схему пристрою, що реалізує даний спосіб. Пристрій для створення крутного моменту (пневморозкріплювач, бурова лебідка, машинний ключ) 1 забезпечує згвинчування труби 2 з муфтою 3, закріпленою в спеціальному пристрої (клини, спайдер) 14. На трубі 2 встановлено давач кута повороту 4, з нього імпульси

надходять на вхід лічильника обертів 5, там сумуються і відтворюються у цифровому коді.

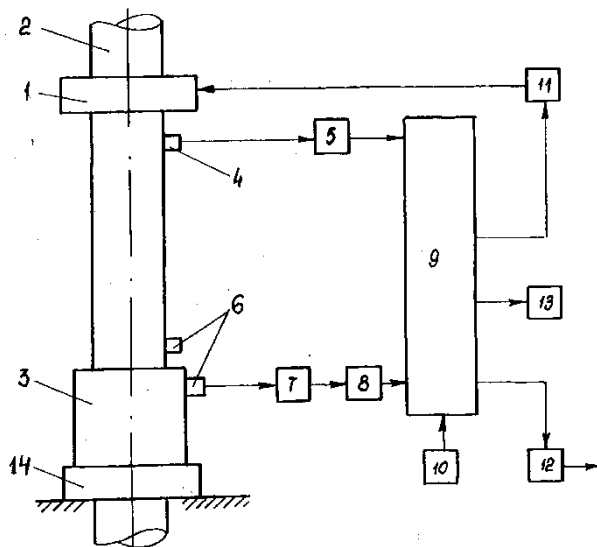


Рисунок 4.41 - блок-схема установки для реалізації контролю якості процесу згвинчування різьбових з'єднань

Акустичний блок складається з п'єзоперетворювачів 6 (один із них встановлюється на трубу, а другий на муфту) та ультразвукового приладу (дефектоскопа, якщо вимірюється амплітуда; структуро скопа, якщо вимірюється швидкість поширення УЗК) 7. Вихід приладу 7 з'єднується зі входом функціонального перетворювача 8, який перетворює вимірюваний параметр у відповідне значення контактного тиску в цифровому коді. Виходи лічильника обертів 5 і перетворювача 8 під'єднані до обчислювального блока (мікропроцесора) 9, який обчислює $dP/d\varphi$ через крок $\Delta\varphi$, порівнює поточне значення контактного тиску P_i з допустимими значеннями $P_i \min$, $P_i \max$. Перед початком

згвинчування в мікропроцесор 9 за допомогою пристрою ручного введення 10 вносяться конкретні дані про параметри якості згвинчування: вираз для розрахунку $P_i \max$ та $P_i \min$ контактних тисків, а також $\Delta\varphi$. Вихід мікропроцесора 9 через блок керування (виконавчий механізм) 11 підключено до пристрою для створення крутного моменту 1, реєстраційного пристрою 12 та світлового табло 13. Якщо під час декількох вимірювань підряд поточні значення P_i виходять за допустимі $P_i \min$ або $P_i \max$, це свідчить про невідповідність параметрів різі нормованим значенням. Тоді процесор 9 подає сигнал на виконавчий механізм 11 і згвинчування припиняється. Якщо ж поточне значення контактного тиску весь час знаходиться в діапазоні від $P_i \min$ до $P_i \max$, а похідна $dP/d\varphi > 0$, це свідчить про належну якість процесу згвинчування. У цьому випадку згвинчування вважається , якщо за декількох вимірювань підряд поточне значення контактного тиску P_i є сталим (тобто похідна $dP/d\varphi = 0$) і дорівнює максимальному для даного числа обертів контактному тиску $P_i \max$ (рисунок 4.41), а зміна швидкості ультразвукових коливань знаходиться в межах прийнятих допусків [81, 91].

Розроблення способів контролю герметичності різьбових з'єднань (на прикладі НКТ)

До різьбових з'єднань трубних колон, окрім вимог міцності, ставиться завдання забезпечення герметичності, тобто непроникності зони контакту труби з муфтою для рідини і газу, що знаходиться під тиском. Тому дослідження і забезпечення герметичності в першу чергу пов'язано з оцінкою характеру контакту всіх елементів різьбового з'єднання (витків різьби, різьбових канавок, упорних торців, стабілізуючих поясків та ін.). Як вказано вище, дотикання двох твердих тіл проходить дискретно, на виступах

мікронерівностей. Такий характер дотику зумовлений шорсткістю поверхонь тіл, які, практично, виключають можливість абсолютно суцільного з'єднання. Тому, визначаючи фактичну площу дотику, можна оцінити герметичність з'єднання.

На основі встановлених закономірностей розповсюдження ультразвукових коливань у напруженому середовищі проведено теоретичні дослідження з розроблення способів контролю герметичності різьбових з'єднань і їх конструктивних ущільнень. Опрацьовувались різні варіанти: контроль відбитого випромінювання і випромінювання, що пройшло через зону з'єднання контактуючих поверхонь, контроль за роздільною і за суміщеною схемами тощо. Необхідно зазначити, що для контролю герметичності різьбових з'єднань можна використовувати способи, описані раніше. Але під час розроблення способів контролю герметичності необхідно більш повно і конкретно враховувати особливості нових конструкцій різьбових з'єднань (тип і форму різьби, наявність додаткових ущільнень – конічних і циліндричних стабілізуючих поясків, різної форми упорних торців тощо). Складність контролю герметичності додаткових ущільнень полягає, в першу чергу, в численності їх конструктивних рішень. Під час розроблення способів контролю за конструктивними ознаками додаткові ущільнення були поділені на дві групи: діаметральні і торцеві. У першій групі герметичність ущільнення повинна забезпечуватись діаметральним натягом, у другій – осьовим. Принцип контролю герметичності в обох випадках базується на аналізі ступеня проникності зони з'єднання для УЗК.

Отже, було розроблено декілька нових способів акустичного (УЗК) контролю герметичності з'єднань, зокрема:

1. Спосіб, який полягає в одночасному вимірюванні і порівнянні амплітуд УЗК, відбитих від протилежних

(суміжних) граней витків різьби. Цей спосіб ураховує специфіку розподілу навантажень на гранях витка різьбового з'єднання, а саме щільне прилягання по одній грані і наявність мікрозазорів із протилежного боку. Реалізацію даного способу зображено на рисунку 4.42.

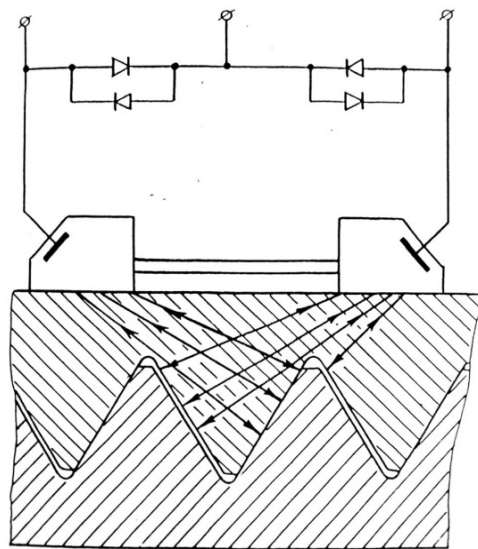
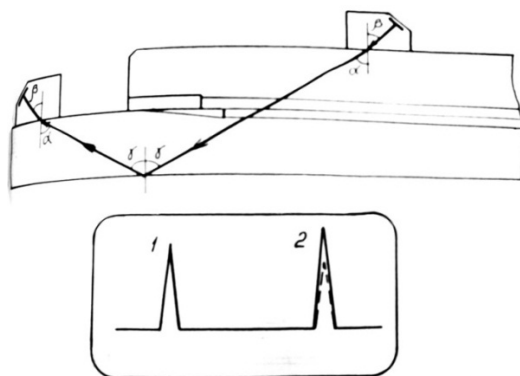


Рисунок 4.42 – Контроль герметичності різьбових з'єднань шляхом порівняння контактних тисків на суміжних гранях витка

Кути введення УЗК розраховувались з умови нормального падіння на бокову грань витка різьби. В силу різного акустичного опору в зоні щільного та нещільного спраження витків була встановлена можливість не лише перевіряти герметичність з'єднання, а й визначати його навантаженість - по співвідношенню амплітуд сигналів, що відбиваються від суміжних сторін витка [15, 48].

2. Спосіб, що базується на вимірюванні амплітуди УЗК, які випромінюються п'єзоперетворювачем, встановленим на

зовнішній поверхні муфти (замка), проходять через різьбове з'єднання і приймаються п'єзоперетворювачем, встановленим на зовнішній поверхні труби. По даному способу, крім загальної оцінки герметичності з'єднання, можуть бути виявлені ділянки локальної негерметичності різі (промиви, зрізи витків тощо). Схема контролю за цим способом показана на рисунку 4.43. За наявності локальної негерметичності луно-імпульс на екрані дефектоскопа зникає, а різниця амплітуд імпульсів, що проходять через герметичне та негерметичне з'єднання, становить 8-10 дБ [8, 157].



1- зондуєчий імпульс, 2 – ехо-імпульс (пунктирна лінія – при негерметичному з'єднанні)

Рисунок 4.43 – Контроль якості згвинчування (герметичності) різьбових з'єднань

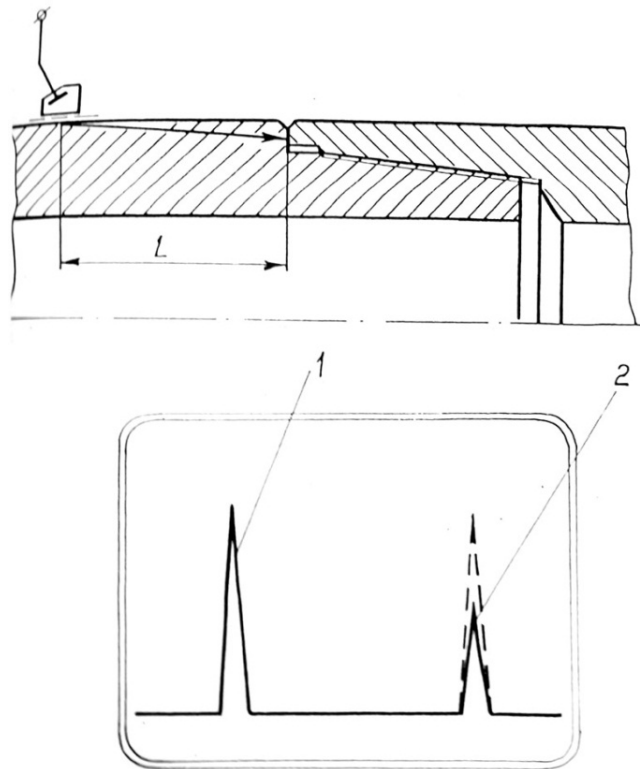
3. Спосіб, що ґрунтується на поперечному прозвучуванні спряжених поверхонь різьбового з'єднання. При цьому способі випромінюючий і приймаючий п'єзоперетворювачі встановлюються на зовнішній поверхні муфти. Випромінювані УЗК вводяться в тіло муфти, частково відбиваються від зони спряження, а частково - проходять через зону спряження в тіло труби і, розповсюджуючись по

прозвучуваному січенню, після багатократного відбиття поступають на приймаючий п'єзоперетворювач.

4. Спосіб контролю герметичності торцевих ущільнень методом відбитого випромінювання. При цьому способі контроль здійснюється за суміщеною схемою, тобто ультразвукові коливання під визначеним кутом спрямовуються на поверхню спряження і після відбиття від неї приймаються тим же п'єзоперетворювачем. Схема реалізації цього способу показана на рисунках 4.44, 4.45 [72].

За допомогою останнього способу були досліджені можливості контролю торцевих ущільнень по зовнішньому діаметру (в насосно-компресорних та обсадних трубах фірми "Хайдріл", обсадних трубах великих діаметрів із з'єднаннями типу "Екстрем лайн", а також, за аналогією, зусилля затяжки замкових з'єднань) та по внутрішньому діаметру (насосно-компресорні труби НКБ, НКМ а також з'єднання типу ВАР в насосно-компресорних і обсадних трубах).

Очевидно, що герметичність торцевого ущільнення визначається фактичною площею дотику спряжених поверхонь, яка, в свою чергу, залежить від величини діючих на ці поверхні стискаючих напружень. Збільшення фактичної площі дотику супроводжується зменшенням акустичного опору зони спряження. На встановлених в попередніх главах залежностях між ступенем напруженості спряжених поверхонь та їх акустичними характеристиками і базується розроблений спосіб контролю.

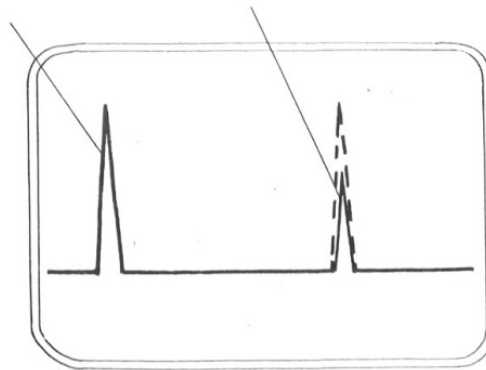
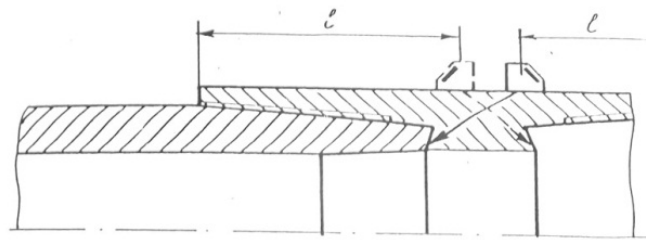


1- зондуєчий імпульс, 2 – ехо-імпульс
(пунктирна лінія – при негерметичному стиці)

Рисунок 4.44 – Контроль герметичності торцевих ущільнень по зовнішньому діаметру

Суть його полягає в тому, що за допомогою похилого суміщеного п'єзоперетворювача зона спряження сканується ультразвуковими коливаннями частотою 2,5 МГц, а герметичність з'єднання оцінюється по ступеню проникності зони спряження для ультразвукових коливань. Як показали результати експериментальних досліджень на натурних зразках з'єднань згадуваних труб, різниця амплітуд луно-імпульсів, що відбиваються від герметичного та

негерметичного торцевого ущільнення, становить від 6 до 12 дБ. Для торцевих ущільнень замкових з'єднань, які орієнтовані під прямим кутом, кут вводу УЗК становить 27° .



1- зонduючий імпульс, 2 – ехо-імпульс
(пунктирна лінія – при негерметичному стиці)

Рисунок 4.45 – Контроль герметичності торцевих ущільнень в з'єднаннях типу VAM

Для торцевих ущільнень, орієнтованих під кутом, відмінним від прямого, кут вводу ультразвукових коливань визначається аналітично або шляхом графічних побудов. Наприклад, при контролі торцевих ущільнень в з'єднаннях типу ВАМ, БДС, ТДС та ін., орієнтованих під кутом 15° (рисунок 4.45), кут вводу ультразвукових коливань становить

45°, а різниця амплітуд луно-імпульсів при герметичному і негерметичному ущільненнях становить 6-8 дБ. Цей спосіб був перевірений на натурних зразках та реальних з'єднаннях типу VAM, BDS (обсадні труби), міні-VAM, TDS (насосно-компресорні труби) і показав цілком задовільні результати.

Таким чином, герметичність різьбових з'єднань безпосередньо після їх збирання може бути визначена методами неруйнівного контролю. Але, зважаючи на те, що в процесі експлуатації під дією силових та температурних навантажень ефективність з'єднань суттєво знижується (зокрема, мають місце так звані процеси релаксації, які проаналізовано в другій главі), виникає необхідність в заходах по прогнозуванню їх якісного стану. Як один з можливих шляхів вирішення цієї проблеми автором було запропоновано здійснювати контроль з'єднань акустичними методами [98], причому контроль слід проводити принаймні двічі: перший раз - безпосередньо після згвинчування, а другий - через певний час напрацювання. Аналізуючи зміну та перерозподіл контактних тисків на спряжених поверхнях, обумовлений впливом експлуатаційних факторів (силових, температурних) між двома черговими перевірками, можна за відомими залежностями прогнозувати ресурс роботоздатності з'єднання для конкретних умов.

4.3 Використання методів оброблення сигналів для підвищення чутливості контролю

Одним з обмежень широкого застосування акустичних методів для контролю якісних характеристик конструкційних сталей, матеріалів та виробів являється складність, а в деяких випадках неможливість виявлення корисних (інформативних) сигналів на фоні завад та шумів [155]. Задача підвищення чутливості таких сигналів близька до традиційної задачі підвищення чутливості ультразвукової апаратури [156] і в

кінцевому результату характеризується співвідношенням сигнал-шум, яке може складати одиницю та менше [147].

Такого роду задачі вирішують різними методами, застосовують оригінальні підходи, методологічні та схемотехнічні рішення (складно модульовані сигнали, методи оптимальної фільтрації, синхронного детектування і т.п.). Аналіз сучасного стану проблеми показав, що для підвищення чутливості шляхом зменшення впливу шумів та виділення корисного сигналу при ультразвуковому контролі в основному використовуються наступні методи: метод взаємної кореляції [157], вейвлет-перетворення [158], метод роздільних спектрів (*split spectrum processing*) [159], кепстральний (*power spectrum*) та авторегресійний кепстральний (*autoregressive spectrum*) аналіз [160], М-последовності [157], штучні нейронні мережі [161], коди Баркера [162] та інші методи в меншій мірі.

Для цілей ультразвукового контролю найбільш відомим та ефективним шляхом підвищення чутливості є використання методу взаємної кореляції [157]. Суть методу полягає у розрахунку значень кореляції отриманої зашумленої вибірки із ідеальним сигналом, тобто між двома цифровими послідовностями випроміненого $x_T(nT)$ та отриманого $x_E(nT)$ сигналів:

$$\begin{aligned} x_T(nT) &= s(nT) + v(nT), \\ x_E(nT) &= \alpha \cdot s(nT - D) + n(nT), \end{aligned} \quad (4.62)$$

де T - інтервал вимірювання, $s(nT)$ - згенерований сигнал, $v(nT)$ та $n(nT)$ - некорельований шум, α - визначений коефіцієнт послаблення сигналу, D - необхідне значення затримки луно-сигналу. Кореляція цих послідовностей визначається наступною формулою:

$$C(kT) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_T(nT)x_E(nT + kT) \quad (4.63)$$

На практиці, значення необхідної затримки D визначають за піком кореляційної функції (4.63), а необхідне значення затримки та відстань до дефекту визначають за піком огинаючої луно-сигналу. Огинаючу луно-сигналу можна визначити, використовуючи перетворення Гілберта [163]. Тоді знаходять кореляцію випроміненого і перетвореного луно-сигналу, причому перевагою такого методу є те, що знаходять перехід нуля функції кореляції, а не її максимум.

Метод взаємної кореляції часто поєднують з так званим методом цифрових вікон. За цим методом досліджуваний сигнал поділяють на вікна розміром рівним розміру виконання корисного сигналу, котрі частково перекриваються. Вікно пересувається вздовж сигналу з певним кроком, розраховується кореляція між сусідніми вікнами для визначення затримки сигналу.

Метод взаємної кореляції не дає очікуваних результатів виявлення луно-імпульсів при значному зашумленні та спотворенні сигналу внаслідок впливу структури контрольованого матеріалу, структурного шуму, накладанні луно-імпульсів. В польових умовах, коли співвідношення сигнал/шум може значно перевищувати лабораторні значення, метод також не дозволяє однозначно локалізувати луно-імпульс. Поєднання методів взаємної кореляції та кодування сигналу дозволило в лабораторних умовах локалізувати корисний сигнал при співвідношенні сигнал шум 6 дБ [164].

Найчастіше для підвищення інформативності та чутливості методу ідеальний сигнал певним чином кодують. Найкращими для цієї задачі є коди Баркера. Такий підхід часто використовують для радіолокації, в цивільній та військовій інженеріях. Використання кодів Баркера для модуляції зондувальних сигналів ЕМА-перетворювачів при дефектоскопії різьбових з'єднань дає можливість підвищити чутливість та відношення сигнал/шум до 6 дБ. Відношення

сигнал/шум також зростає до 17 дБ із збільшенням довжини коду Баркера. З всіх кодів Баркера найбільш застосовуваними в ультразвуковому контролі є код з найменшою довжиною типу «+1 -1», який може бути представлений синусоїдою (рисунок 4.46), перший додатний півперіод відповідно «+1», а від'ємний півперіод відповідно «-1». Це пояснюється тим, що більш складні та довші коди Баркера (фазомодульовані) не можуть бути реалізовані на більшості перетворювачів, внаслідок їхньої інерційності в імпульсному режимі. Зокрема для луно-імпульсного методу збільшення довжини коду спричиняє збільшення тривалості збуджуючого та луно-імпульсу, що унеможлиблює розпізнання донного та поверхневого луно-імпульсів при малих товщинах, оскільки вони накладаються.

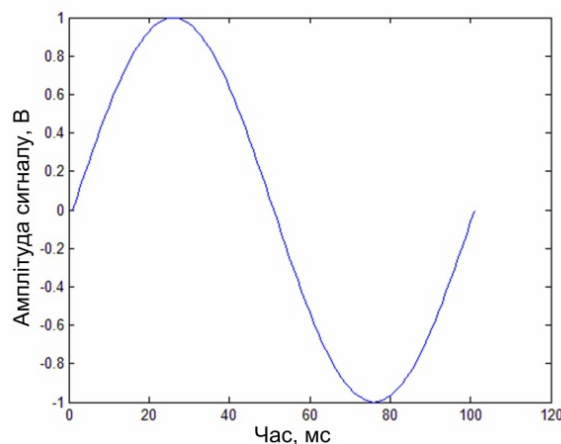


Рисунок 4.46 – Зразок ідеального сигналу, за кодом Баркера «+1 -1»

Методи пониження шуму та підвищення інформативності ультразвукового сигналу з використанням вейвлет перетворень є відносно новим способом обробки

ультразвукового сигналу в часовій та частотній областях [165]. Вейвлет перетворення, на відміну від перетворення Фур'є, дозволяє представити сигнал $s(t)$ як суму елементарних частин – вейвлетів. Вейвлет перетворення являє собою кореляцію між сигналом та набором базових вейвлетів. Дочірні вейвлети $\psi_{a,b}(t)$ отримують з материнського вейвлета $\psi(t)$ шляхом розширення та зсуву. Материнський вейвлет виражається формулою:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.64)$$

Неперервне вейвлет перетворення функції $s(t)$ є таким:

$$CWT_x(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4.65)$$

Наведений вираз дає в результаті жорстке перетворення, з метою уникнення такої жорсткості параметри зміщення b та розширення a дискретизують. Один з найбільш популярних методів дискретизації полягає в заміні розширення a на 2^j , а зміщення b на $2^j n$. В результаті отримують подвійний вейвлет. Подвійне дискретне вейвлет перетворення може бути здійснене за формулою

$$DWT_x(j,n) = CWT_x(2^j, 2^j n) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t}{2^j} - n\right) dt, \quad (4.66)$$

$$j, n \in Z$$

Наведений вираз дозволяє отримати ортогональний статично-невизначений вейвлет розклад. Основна ідея зниження шуму за допомогою вейвлет перетворення полягає в тому, що корисний сигнал з певною хвильовою структурою знаходиться на кількох вейвлет коефіцієнтах, тоді як шум з більш випадковою структурою розміщується на більшій кількості вейвлет коефіцієнтах. В такому простому підході,

зниження шуму за допомогою вейвлет перетворення, може бути здійснено наступним чином: здійснити вейвлет перетворення зашумленого сигналу, відкинути та/або задати поріг вейвлет коефіцієнтів в перетвореному сигналі, виконати реконструкцію знешумленого сигналу за допомогою інверсного перетворення. Для задання порогу вейвлет коефіцієнтів існує багато методів та підходів, найбільш поширеними є м'яке та жорстке порогоування.

Найбільш часто вейвлет перетворення застосовується для покращення розпізнавання відкликів від дефектів у зашумлених ультразвукових сигналах. Значним недоліком методу є складний вибір з поміж методів задання порогу вейвлет перетворення та вибором материнського вейвлету, оскільки кожний з цих факторів може дати різний результат в залежності від умов застосування. Проте перевагою методу є значно швидше здійснення перетворення сигналу, ніж при перетворенні Фур'є. Практична реалізація методу дозволила чітко локалізувати корисний сигнал при співвідношенні сигнал/шум 6 дБ. Відповідно для реалізації методу необхідні значні обчислювальні потужності і достатня підготовка оператора для оцінювання результатів.

Багатообіцяючим способом обробки сигналів в неруйнівному контролі є так званий метод роздільних спектрів [157]. Метод роздільних спектрів дозволяє покращити виявлення луно-імпульсів в матеріалах, мікроструктура яких створює широкодіапазонний шум з великою амплітудою, що маскує корисний сигнал. Цей метод дозволяє уникнути потреби проведення багатократних вимірювань та отримати частотний розподіл сигналу без перезбирання даних. Метод роздільних спектрів складається з двох основних кроків (рисунок 4.47):

1) отриманий сигнал перетворюють в часово-частотний образ за допомогою банку фільтрів;

2) зворотно-трансформований сигнал піддають обробці нелінійними операторами.

Для розділу отриманого сигналу на спектри використовують Гаусові смугові фільтри з різними центральними частотами але однаковою шириною смуги пропускання. Для кожної спектральної області сигналу застосовують зворотне перетворення Фур'є. Для подальшої обробки сигналу використовують різні алгоритми [157]: розклад Габора (*Gabor decomposition*), метод геометричного середнього (*geometric mean*), полярного порогоування (*polarity thresholding*), групової затримки рухомої ентропії (*group delay moving entropy*), нейронні мережі, оптимального детектора (*optimal detector*).



Рисунок 4.47 – Обробка сигналу за допомогою методу роздільних спектрів

Практичне застосування розкладу Габора має певні обмеження до застосування для коротких височастотних сигналів, розклади яких включають велети та потребують великого числа циклів обчислення [157]. Методи геометричного середнього та полярного порогоування

базуються на фазових характеристиках чистого сигналу без шуму. Тому дуже важко передбачити як ці алгоритми працюватимуть при значно зашумлених сигналах. Це є одним з основних недоліків даних методів обробки при аналізі методом роздільних спектрів. Метод групової затримки рухомої ентропії можна ефективно використовувати для вибору оптимальної області частот для аналізу роздільними спектрами. Метод має потенціал для використання при виявленні дефектів в композитних та багат шарових матеріалах. Ще один метод нелінійної обробки сигналу, метод оптимального детектора, використовується для виявлення луно-сигналів в крупнозернистих матеріалах [166]. Обмеженням цього методу є припущення, що Гаусовий випадковий процес може апроксимувати випадкові шуми в матеріалах.

Кожний з наведених алгоритмів є чутливим до певних впливових чинників, наприклад, кількості та параметрів фільтрів. На даний момент невідомо яким саме чином слід здійснювати оптимізацію методу та вибір алгоритму кінцевої обробки. Широке застосування методу також обмежує значний час обробки сигналу. Названі обмеження показують потребу в розробці нових алгоритмів та/або комбінації існуючих з метою отримання кращих результатів виявлення корисного сигналу в зашумленому.

Метод кепстрального аналізу застосовують в основному для аналізу луно-сигналів, що накладаються, таких як багатократні луно-сигнали в композитних та багат шарових матеріалах. Найбільшого застосування метод здобув при дефектоскопії у тонких композитних матеріалів. Проте недоліком методу є його неефективність для сигналів з співвідношенням сигнал/шум меншим 18 дБ.

Для підвищення інформативності ультразвукового сигналу часто використовують методи штучних нейронних мереж (ШНМ) [157]. Особливістю ШНМ є класифікації і

розпізнавання образів, мережа накопичує в процесі навчання знання про основні властивості цих образів, таких як геометричне відображення структури образу, розподіл головних компонентів або інших характеристик. При узагальненні акцентується увага на відмінностях образів один від одного, які складають основу для вибору класифікаційних рішень. Саме ця особливість ШНМ є важливою для оброблення зашумлених сигналів при безконтактному акустичному контролі геометричних характеристик елементів металоконструкцій.

Суть методу полягає у попередньому тренуванні вибраної структури ШНМ на ідеальному сигналі. Для тренування нейромережі на її вхід подають зашумлені із різним рівнем шуму корисні сигнали та шуми. При подаванні на вхід нейромережі зашумленого корисного сигналу на вихід поступає значення, яке фіксує відсутність корисного сигналу і навпаки, при подаванні корисного сигналу мережі поступає значення, яке фіксує наявність корисного сигналу.

До характерних переваг зазначеного нейромережевого методу у порівнянні із класичним підходом слід віднести наступне: розпізнавання значно зашумлених сигналів з співвідношенням сигнал/шум меншим 1 ; незалежність від форми вхідного сигналу і її характеру; можливість удосконалення шляхом зміни в архітектурі ШНМ; застосування більш досконалих методів тренування та згладжування; простота апаратної реалізації методу на базі мікропроцесорної техніки.

Аналізуючи розглянуті методи виявлення луно-імпульсів в зашумлених ультразвукових сигналів, можна зробити висновок, що:

- існуючі методи підвищення чутливості акустичного контролю потребують удосконалення для забезпечення його використання у ультразвуковому неруйнівному контролі при значних рівнях зашумленості сигналу (безконтактний

ультразвуковий контроль та контроль композитних матеріалів);

- перспективним є комплексування існуючих методів обробки сигналів контролю для підвищення чутливості акустичних методів контролю з метою забезпечення однозначної ідентифікації луно-імпульсу в зашумленому сигналі та можливості їх апаратної реалізації у сучасних серійних засобах контролю.

Розробка нового методу обробки сигналів на базі штучних нейронних мереж

За останні кілька десятиліть неруйнівний контроль постав штатною технологічною операцією в більшості галузей промисловості. Доведено, що застосування методів та засобів неруйнівного контролю дозволило зменшити рівень аварійності, надзвичайних ситуацій техногенного характеру та загалом підтримувати рівень технологічної безпеки в державі на прийнятному рівні.

Проте, з розвитком рівня техніки та збільшенням різноманіття методів неруйнівного контролю, розширення сфер їх застосування з'явилися наступні виклики:

- 1) значна залежність достовірності результатів неруйнівного контролю від кваліфікації персоналу через ускладнення інтерпретації результатів контролю для оцінки ступеня небезпечності виявлених дефектів;
- 2) недостатня кількість інформативних параметрів для розрахунку залишкового ресурсу відпрацьованого устаткування, їх неоднозначність та неузгодженість з точки зору бракувальних критеріїв;
- 3) відсутність аналітичних залежностей між фізико-механічними характеристиками (межа текучості/міцності, ударна в'язкість тощо) та інформативними параметрами неруйнівного контролю.

Дати відповіді на означені та нові виклики можливо шляхом розроблення технологій на базі штучних нейронних мереж, для вирішення задач, схематично зображені на рисунку 4.48.

Починаючи із 1980-их років з розвитком комп'ютерної техніки з'явилися можливості для програмної реалізації алгоритмів штучних нейронних мереж, розроблені набагато раніше. Все зростаюча комп'ютеризація методів та засобів неруйнівного контролю робить їх придатними до вдосконалень, що мають нейромережеве походження.



Рисунок 4.48 – Проблеми неруйнівного контролю та напрямки їх вирішення з допомогою штучних нейронних мереж

Необхідно зазначити, що в наш час штучні нейронні мережі починають завойовувати увагу все більшої кількості спеціалістів внаслідок того, що завдяки сучасним електронним компонентам (цифрові сигнальні процесори, програмно-логічні матриці) їх реалізація є дуже простою і ефективною. Підтвердженням цьому є те, що в 2001 р.

Департамент торгівлі та промисловості Великобританії ініціював проект із впровадження нейромережових технологій в промисловість вартістю в 5.7 млн. фунтів стерлінгів [167].

На базі досвіду, накопиченого вітчизняними та закордонними вченими [168], можна стверджувати про можливість вирішення наступних задач в галузі неруйнівного контролю:

- 1) розпізнавання образів виявлених дефектів. Ультразвуковий, магнітний, радіографічний та вихреструмний методи контролю слід віднести до найбільш проблемних з точки зору визначення типу (тріщина чи пора), розмірів та місця розташування дефекту;
- 2) підвищення чутливості контролю. Складність, а подекуди неможливість ідентифікації сигналу дефекту зумовлюють необхідність підвищення чутливості та завадостійкості контролю;
- 3) встановлення залежностей між інформативними параметрами контролю та досліджуваними властивостями для визначення фізичних, механічних та хімічних характеристик матеріалів. Застосування нейронних мереж дасть змогу частково вирішити проблему відсутніх аналітичних залежностей;
- 4) співставлення результатів застосування різних методів контролю. Неспівпадіння результатів неруйнівного контролю різними методами спричиняє зниження достовірності обстежень в цілому. Застосування нейронних мереж в даному випадку може забезпечити відтворення технічного стану об'єкта в багатомірному просторі результатів різних методів неруйнівного контролю;
- 5) прогнозування зміни технічного стану об'єктів. Математичні моделі, які становлять основу алгоритмів розрахунку залишкового ресурсу об'єктів з врахуванням зміни їх технічного стану носять

емпіричний характер і не завжди дозволяють вирішувати поставлені задачі. Застосування нейронних мереж дасть змогу створити більш достовірні моделі для прогнозування зміни технічного стану об'єктів із врахуванням більшої кількості вхідних параметрів.

В даній роботі запропоновано спосіб детектування ультразвукових сигналів з високим значенням шуму шляхом використання штучних нейронних мереж в поєднанні з методом плаваючого вікна. Запропонований спосіб полягає в аналізі значень виходів нейронів у прихованому шарі мережі при подаванні на її вхід зашумленого корисного сигналу, причому, кількість вхідів і виходів мережі повинна дорівнювати тривалості корисного сигналу, поділеній на крок його квантування, що дозволить використовувати даний спосіб в галузі неруйнівного контролю для виявлення дефектів у матеріалах та виробках при їх ультразвуковому дослідженні, в радіолокації для виявлення об'єктів на фоні значних завад, а також у інших сферах техніки, які пов'язані із обробкою сигналів з високими значеннями шуму.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) – це розділ штучного інтелекту, в якому для оброблення сигналів використовуються явища, аналогічні тим, які відбуваються в нейронах живих істот. Найважливіша особливість мережі, яка вказує на її широкі можливості та великий потенціал, полягає в паралельному обробленні інформації всіма розгалуженнями. Велика кількість міжнейронних взаємозв'язків дозволяє значно пришвидшити процес оброблення інформації [169, 170]. Друга не менш важлива особливість ШНМ полягає в здатності до навчання і узагальнення накопичених знань. Нейронна мережа володіє властивостями, які притаманні штучному інтелекту. Нейрони штучної мережі пов'язані між собою синаптичними з'єднаннями. ШНМ в процесі роботи, перетворює вхідні в часі, в результаті чого змінюється

внутрішній стан мережі і відбувається формування вихідних параметрів.

Для класифікації і розпізнавання образів мережа накопичує в процесі навчання знання про основні властивості цих образів, таких як геометричне відображення структури образу, розподіл головних компонентів або інших характеристик. При узагальненні акцентується увага на відмінностях образів один від одного, які складають основу для вибору класифікаційних рішень [171, 172, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**173]. Саме ця особливість ШНМ є важливою для оброблення зашумлених сигналів при безконтактному акустичному контролі геометричних характеристик елементів металоконструкцій.

Перед початком роботи більшість штучних нейронних мереж потребують тренування, яке полягає в підборі параметрів мережі, при яких мережа найкращим чином вирішує поставлені задачі. Для вирішення задачі тренування ШНМ існує досить багато алгоритмів [174174].

Загалом нейронні мережі підлаштовуються, або навчаються так, що певний вихід повинен відповідати певному входу. В загальному випадку, така ситуація зображена на рисунок 4.49.

Для розв'язання з допомогою нейронних мереж прикладних задач необхідно зібрати достатній і репрезентативний об'єм даних для того, щоб навчити нейронну мережу вирішувати такі задачі. Навчальний набір даних - це набір спостережень, які містять ознаки досліджуваного об'єкта [175].

Для більшості реальних задач буває достатньо кількох сотень або тисяч спостережень. Для складних задач може бути необхідною більша кількість спостережень, проте дуже рідко зустрічаються задачі, де необхідно менше 100 спостережень.

Процедура побудови нейронної мережі складається із наступних кроків:

- вибору початкової конфігурації мережі; наприклад, у вигляді одного шару із кількістю нейронів, рівною половині кількості входів і виходів;
- моделювання і навчання мережі із оцінюванням контрольної похибки і використання додаткових нейронів або проміжних шарів;
- виявлення ефекту перенавчання і коректування конфігурації мережі [176, 177].

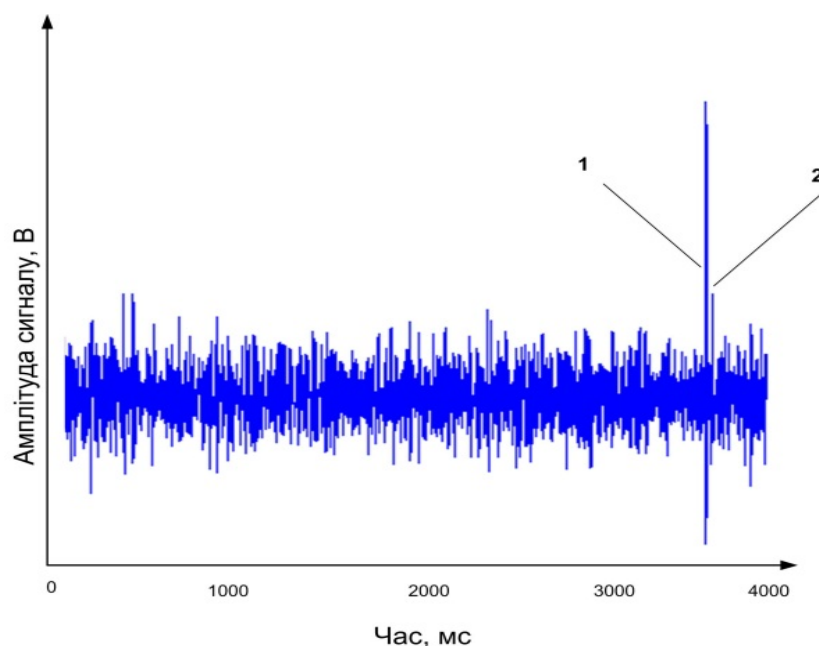


Рисунок 4.49 - Навчання нейронної мережі

Шляхом аналізу способів побудови структури нейромереж, алгоритмів роботи та типів ШНМ та проведених теоретичних досліджень було обрано архітектуру нейромережі, яка найкращим чином вирішувала поставлені задачі.

Суть нового методу, розробленого на базі штучних нейронних мереж, полягає у виконанні певної послідовності обчислювальних операції, описаних у патенті авторів [178]. По вибірці із ультразвукового сигнал в цифровому вигляді (рисунок 4.50), котрий містить інформативний корисний сигнал, реалізовується так званий метод плаваючого вікна. Тобто аналізується весь сигнал по частинам, розмір яких

відповідає розміру виконання корисного сигналу, який необхідно виявити. Плаваюче вікно пересувається вздовж всього сигналу із кроком одиниця.



1 – ультразвуковий імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні об'єкта контролю на екрані осцилографа; 2 – ультразвуковий імпульс, відбитий від внутрішньої поверхні об'єкта контролю на екрані осцилографа, рівень якого близький до рівня шуму

Рисунок 4.50 – Вибірка аналізованого акустичних сигналу

В такому разі, задача зводиться до аналізу вибірки із сигналу, яка може містити корисний сигнал або шум. Іншими словами, необхідно розпізнати в зашумленому сигналі корисний – в нашому випадку синусоїду.

Для вирішення означеної задачі розпізнавання образів використовується нейронна мережа. Для реалізації

запропонованого способу було побудовано і проведено тренування ряду нейронних мереж типу із оберненим поширенням помилки. В загальному, робота с нейронними мережами передбачає виконання послідовності наступних кроків [176, 179, 180]:

- 1) Визначення вхідних та вихідних параметрів;
- 2) Збір та формування наборів даних;
- 3) Аналіз попередньо оброблених даних;
- 4) Навчання нейронної мережі;
- 5) Тестування нейронної мережі;
- 6) Використання навченої та протестованої мережі

для моделювання та прогнозування.

За використання алгоритму зворотного поширення мережа розраховує похибку, яка виникає у вихідному шарі і вираховує вектор градієнта як функцію вагових коефіцієнтів і зміщень. Цей вектор вказує напрямок найкоротшого спуску по поверхні для даної точки, тому якщо просунутись в цьому напрямку, то помилка зменшиться [181]. Послідовність таких кроків загалом призведе до мінімуму того чи іншого типу. Певні труднощі викликає вибір величини кроку.

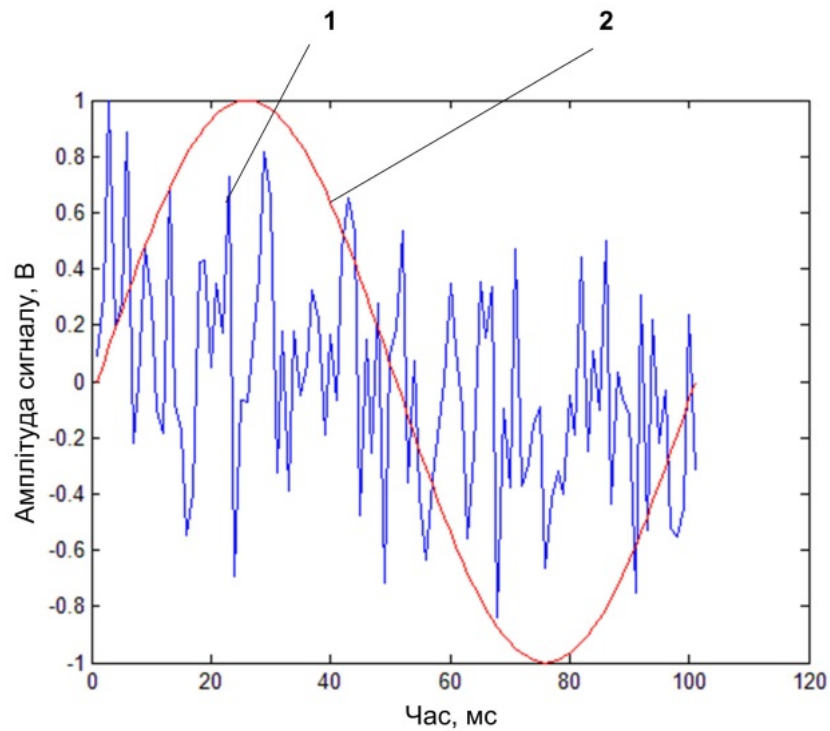
За більшої довжини кроку збіжність буде більш швидкою, але існує небезпека перескочити через розв'язок або піти в невірному напрямку. Класичним прикладом такого явища при навчанні нейронної мережі є ситуація, коли алгоритм дуже повільно просувається по вузькому рову із крутими схилами, перескакуючи з одного схилу на інший. І навпаки, за малого кроку, ймовірно, буде обрано вірний напрямок, проте при цьому необхідно буде виконати дуже багато ітерацій. На практиці величину кроку обирають пропорційною крутизні схилу (градієнту функції помилки); такий коефіцієнт пропорційності називається параметром швидкості налаштування. Правильний вибір параметру швидкості налаштування залежить від конкретної задачі і зазвичай здійснюється дослідним шляхом; цей параметр може

тепер залежати від часу, зменшуючись за ходом виконання алгоритму.

Алгоритм діє ітераційно, і його кроки прийнято називати епохами або циклами. На кожному циклі на вхід мережі послідовно подаються всі навчальні спостереження, вихідні значення порівнюються із цільовими значеннями і розраховується функція помилки. Значення функції помилки, а також її градієнту використовуються для коректування вагових коефіцієнтів та зміщень, після чого всі дії повторюються. Початкові значення вагових коефіцієнтів і зміщень мережі обираються випадковим чином, і процес навчання припиняється або коли реалізована певна кількість циклів, або коли помилка досягає певного малого значення або більше не зменшується [Ошибка! Источник ссылки не найден.182, 183]. Даний алгоритм на сьогоднішній час вважається одним із найбільш ефективним алгоритмом навчання нейромереж.

Розглянемо реалізацію запропонованого методу на прикладі зачумленого корисного сигналу. Корисний сигнал вигляді одного періоду синусоїди має розмірність 100 (вибрана довільно) і моделює відбитий акустичний сигнал. На рисунок 4.51 наведено вигляд зашумлений сигнал за відношення сигнал/шум 0,3 в порівнянні з ідеальним. Роботу запропонованого методу буде продемонстровано на цьому сигналі, відношення сигнал/шум якого становить 0,3. Таке відношення сигнал/шум при ультразвуковій товщинометрії та дефектоскопії вважається складним випадком та водночас є межею запропонованого методу. Ідеальний сигнал був зашумлений білим (гаусовим) шумом.

Сигнал аналізується частинами, рівними розмірності плаваючого вікна 100. Кожний сигнал з плаваючого вікна подається на попередньо навчену нейронну мережу. Мережа навчена на розпізнавання інформативного сигналу при різних рівнях шуму за допомогою пакету прикладних програм *MATLAB R14*, додаток *Neural Network Toolbox*.



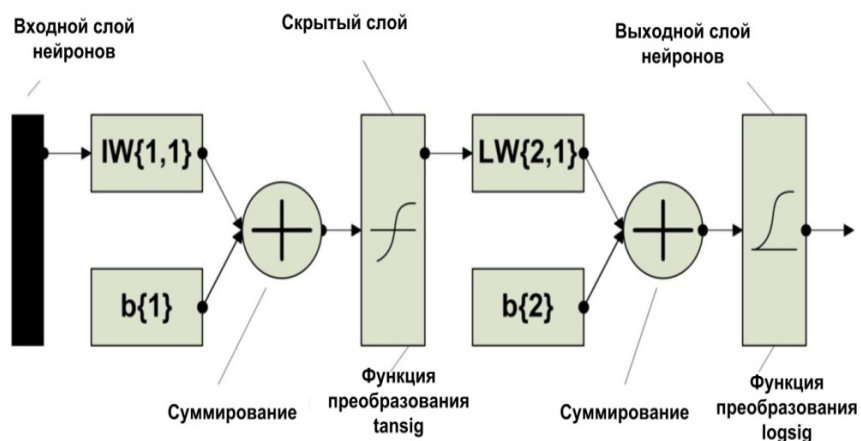
1 – зашумлений корисний сигнал за відношення сигнал/шум рівному 0,3; 2- незашумлений ідеальний сигнал

Рисунок 4.51 – Зашумлений сигнал за відношення сигнал/шум 0,3 в порівнянні з ідеальним

Для вирішення задачі розпізнавання образів використовується нейронна мережа з зворотнім поширенням помилки, навчена шляхом подачі на її вхід та вихід ідеального корисного сигналу без шуму (в даному випадку – повний період синусоїди).

В мережі передбачений один прихований шар з різним числом нейронів, бажано в межах 5-13 при розмірності корисного сигналу в межах 80-120 (рисунок 4.52). Процедура

навчання полягає в налаштуванні вагових коефіцієнтів і затримки в нейронах мережі [179]. Мережа тренується з заданим рівнем похибки (між реальним та необхідним виходами) в межах 1-5%.



$IW\{1,1\}$ – вагові коефіцієнти першого шару нейронів – матриця 100×11 ; $b\{1\}$ - затримки першого шару нейронів – матриця 11×1 ;
 $LW\{2,1\}$ – вагові коефіцієнти другого шару нейронів – матриця 11×100 ; $b\{2\}$ – затримки другого шару нейронів – матриця 1×100

Рисунок 4.52 – Структура нейронної мережі

Таким чином, якщо розмір плаваючого вікна (відповідає кількості нейронів на вході та виході мережі) рівний 100, а кількість нейронів прихованому шарі складає 10, при заданій похибці навчання 5%, то можна стверджувати, що після навчання, в значеннях виходів нейронів в прихованому шарі буде знаходитись інформація про всі 100 значення вхідного образу з помилкою 5%.

Попередня підготовка вхідного сигналу мережі використовується для нормування всіх параметрів сигналу в межах $[0; 1]$.

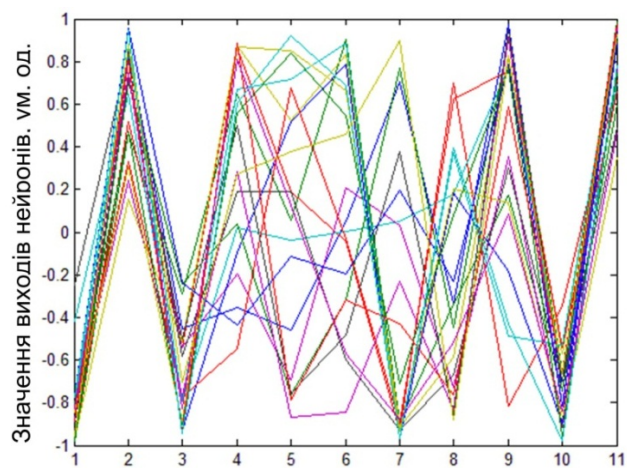
Після навчання з вказаними параметрами нейромережа готова до роботи з новими даними. На вхід нейромережі можуть подаватись сигнали двох типів – зачумлені корисні сигнали або просто шум. Якщо сигнал поданий на вхід нейромережі буде розпізнаний як корисний і це буде відповідати дійсності, це означатиме що корисний сигнал виявлений. Значення виходів нейронів близьке до одиниці означає що поданий сигнал є корисним, значення близькі до 0 або -1 вказують на те що поданий сигнал не є корисним, або рівень шумів занадто високий.

Для розрізнення між цими двома типами сигналів достатньо провести розрахунок виходів нейронів прихованого шару. Після цього необхідно провести сумування абсолютних значень виходів прихованого шару нейромережі і так для кожного кроку зміщення плаваючого вікна.

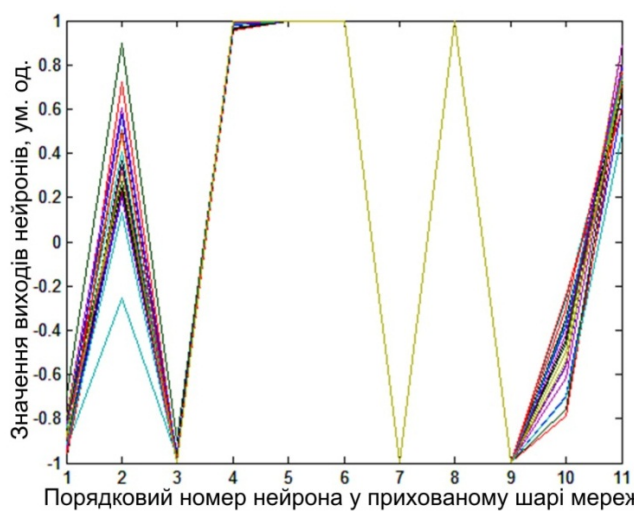
На рисунку 4.53 наведені виходи нейронів внутрішнього прихованого шару мережі, при подачі на її вхід шумових сигналів, які не містять корисного сигналу. На рис.8 приведені виходи нейронів скритого шару мережі при подачі на її вхід зачумлених корисних сигналів з різним рівнем шуму.

Як видно з рисунку 4.54, виходи прихованого шару нейронів при різних рівнях шуму повторяються на 4,5,6 та 8 нейронах. Наприклад виходи на 2 нейроні суттєво міняються при різних рівнях шуму. На рисунку 4.53 не вдається помітити ніякої закономірності для виходів нейронів.

Відповідно, при подачі на вхід нейронної мережі зашумленого корисного сигналу на виходах окремих нейронів в прихованому шарі спостерігатимуться однакові значення з невеликими відхиленнями, а при подачі білого (гаусівського) шуму – ці значення будуть значно відрізнитись. Експериментально перевірено, що в межах кількості прихованих нейронів 5-13 (при кількості нейронів на вході рівній 100) така тенденція зберігається.

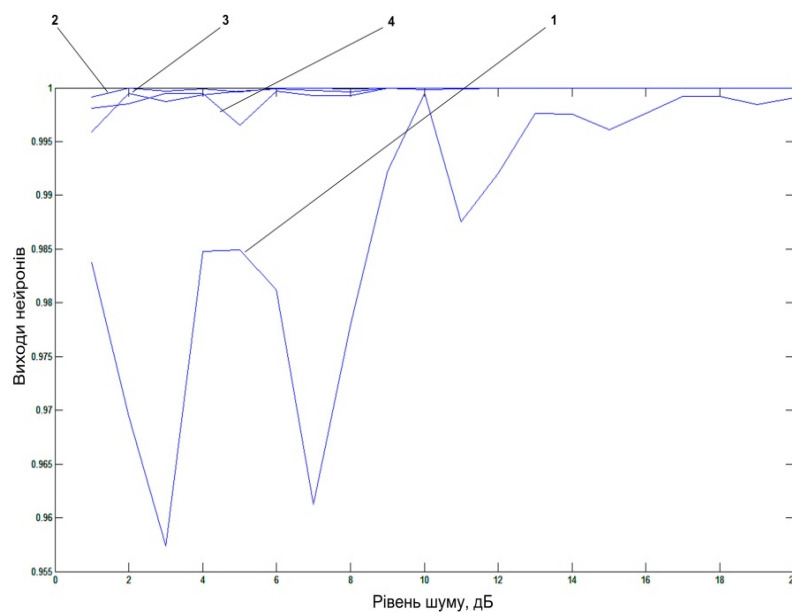


Порядковий номер нейрона у прихованому шарі мережі
Рисунок 4.53 - Виходи нейромережі при відсутності корисного сигналу в вхідному масиві



Порядковий номер нейрона у прихованому шарі мережі
Рисунок 4.54 - Виходи нейромережі при наявності корисного сигналу в вхідному масиві

На рисунку 4.55 показані виходи нейронів для корисного сигналу в залежності від рівня шуму. При цьому середнє значення суми виходів вказаних нейронів складає при подачі на вхід нейрон мережі зачумлених корисних сигналів – 3,98 в межах рівня шуму 0-20 дБ.



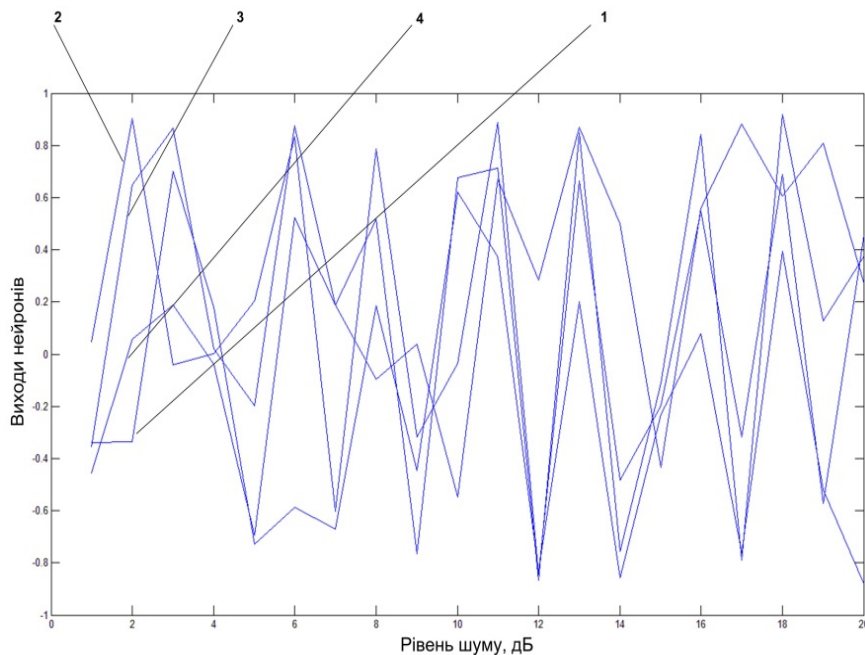
1 - виходи 4-го нейрона прихованого шару; 2 - виходи 5-го нейрона прихованого шару, 3 - виходи 6-го нейрона прихованого шару, 4 - виходи 8-го нейрону прихованого шару

Рисунок 4.55 – Виходи нейронів в залежності від рівня шуму

На рисунку 4.56 наведено виходи тих самих нейронів при подачі на нейромережу шумових сигналів, котрі не містять корисного сигналу. Середнє значення суми виходів складає – 0,31.

Відомо [179], що максимальне значення виходу прихованого шару нейронів мережі рівне 1, а мінімальне -1. Відповідно максимальне значення суми виходів вибраних

прихованих нейронів (4-6 та 8) вірне 4, а мінімальне -4. Виходи нейронів рівні 1 відповідають подачі на вхід нейромережі незашумленого корисного сигналу. Для надійного виявлення корисного сигналу при високих значеннях рівня шуму встановлено як бракувальний критерій правильності детектування корисного сигналу – сума виходів вибраних нейронів повинна бути не менше 2, що складає 75% абсолютного значення максимально можливої суми виходів вибраних нейронів.



1 - виходи 4-го нейрона прихованого шару; 2 - виходи 5-го нейрона прихованого шару, 3 - виходи 6-го нейрона прихованого шару, 4 - виходи 8-го нейрону прихованого шару

Рисунок 4.56 – Виходи нейронів при подачі шумових сигналів залежності від рівня шуму без корисного сигналу.

Таким чином, можемо стверджувати, що шляхом оцінки виходів нейронів прихованого шару отриманої мережі можна розрізнити зачумлений корисний сигнал та просто білий (гаусівський) шум.

Для наведеного на рисунку 4.51 випадку зашумленого сигналу (відношення сигнал/шум рівне 0,3) запропонований метод на основі використання штучних нейронних мереж дозволив впевнено виявляти зашумлені сигнали.

Для статистичного аналізу функціонування методу було згенеровано по 1000 зашумлених корисних сигналів (відношення сигнал/шум рівне 0.35) та 1000 сигналів шуму. Реалізація запропонованого методу для вказаних наборів даних дозволила стверджувати, що за вказаних рівнів шуму похибка правильного детектування корисного сигналу складає не більше 1.2% (12 випадків із 1000, коли значення суми виходів нейромережі складало менше 2). В ході аналізування набору шумових сигналів кількість випадків помилкового розпізнання шуму як корисного сигналу дорівнювала 0.8% (8 випадків із 1000).

Порівняння розробленого методу на базі штучних нейронних мереж з класичним взаємно-кореляційним підходом

При безконтактному вимірюванні товщини за допомогою ультразвукових перетворювачів, відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь сигнали можуть, в залежності від характеристик підсилювального тракту, знаходитися нижче рівня шуму, або знаходяться в суміші з випадковим білим шумом, що було розраховано в попередньому розділі. В такому випадку традиційні методи оброблення вимірювальної інформації та локалізації луно-імпульсів не дають змогу визначити час поширення акустичних коливань та розрахувати товщину виробу.

Проблема виявлення таких луно-імпульсів близька до існуючої в традиційній дефектоскопії проблеми підвищення чутливості луно-імпульсної дефектоскопії. Однак, існуючі методи підвищення чутливості не вирішують проблеми виявлення луно-імпульсів, замаскованих шумом і виділення їх з випадкового шуму. Збільшення чутливості за рахунок збільшення амплітуди зондувального сигналу має межу, що визначається вихідним каскадом генератора або максимальною допустимою напругою на перетворювачі [29, 184].

Виходячи з вищесказаного, при контролі виробів за допомогою безконтактних акустичних перетворювачів виникає проблема виявлення імпульсів відбитих від поверхонь ОК, що знаходиться нижче рівня шумів.

Виділення луно-імпульсів з білого шуму залежить не від амплітуди, а від енергії зондуючого сигналу. Очевидно, що виділити луно-імпульс з шуму можна при зменшенні частоти зондувального сигналу, оскільки затухання залежить від частоти. Отже чутливість до виявлення прямо пропорційна енергії зондувального імпульсу і обернено пропорційна частоті сигналу.

Такого роду проблеми, як підвищення чутливості приладу, комплексно вирішують при використанні відомих в радіотехніці складномодульованих сигналів і методів їх обробки – оптимальної фільтрації, синхронного детектування або накопичення [185].

При вимірюванні товщини луно-імпульсним методом за допомогою безконтактного суміщеного перетворювача з повітряно-акустичним зв'язком, що було описано в роботах [148, 186], перетворювач розміщується над поверхнею ОК на певній відстані. Відстань від перетворювача до поверхні ОК, яку було розраховано в другому розділі, складає 160 мм товщина ОК – 10 мм. Частота акустичних коливань становить 1 МГц. В ідеальному випадку, при вимірюванні товщини

луно-імпульсним методом, за відсутності шумів, на екрані осцилографа отримаємо наступну послідовність імпульсів: збуджуючий імпульс 1 та луно-імпульси, відбиті від зовнішньої 2 та внутрішньої 3 поверхонь (рисунк 4.57).

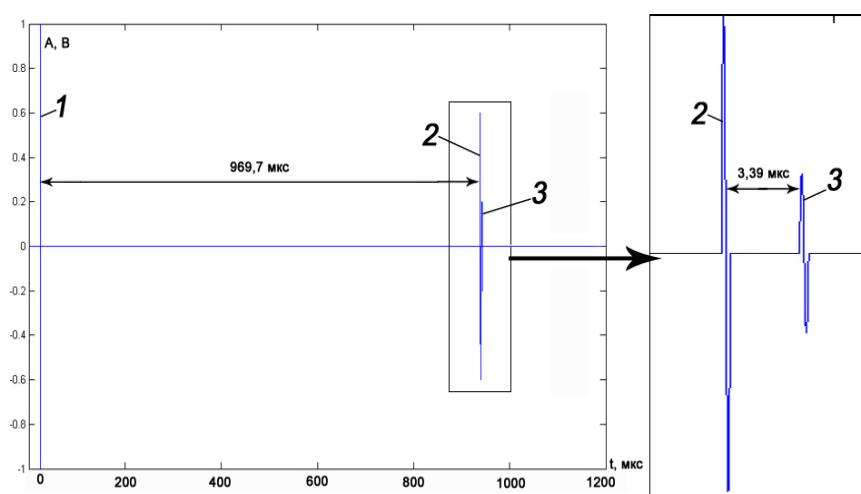


Рисунок 4.57 - Осцилограма луно-імпульсів при вимірюванні товщини безконтактним способом

Час поширення акустичних коливань від перетворювача до зовнішньої поверхні і в зворотному напрямку $t_{нов}$ та в матеріалі ОК (сталь 40ХНМ) $t_{ОК}$ можна обчислити за формулами:

$$t_{нов} = \frac{2h_{нов}}{c_{нов}} = 969,7 \text{ мкс}, \quad (4.67)$$

$$t_{ОК} = \frac{2h_{ОК}}{c_{ОК}} = 3,39 \text{ мкс}, \quad (4.68)$$

де $h_{нов} = 160$ мм - відстань від перетворювача до поверхні ОК, $h_{ОК} = 10$ мм - товщина ОК, $c_{нов} = 330$ м/с, $c_{ОК} = 5900$ м/с - швидкість поширення акустичних коливань в повітрі та матеріалі ОК відповідно.

Як видно з (4.67) та (4.68) велика різниця в часі між імпульсами 1, 2 та 3 виникає в основному із-за значної різниці між швидкостями поширення акустичних коливань в повітрі та матеріалі ОК.

Проте, як було сказано попередньо, внаслідок присутності власних шумів перетворювача, теплових шумів підсилювача, інших завад та значних втрат енергії акустичних коливань на границях розподілу (п'єзометеріал/повітря, повітря/метал та метал/повітря) отримати на екрані осцилографа луно-імпульси та чітко їх локалізувати, як правило, не можливо. Інформаційний сигнал в такому випадку маскується шумом (рисунок 4.58).

Корисний сигнал для наглядності на рисунку 4.58 виділено додатково. В дійсності візуально виділити його практично неможливо.

Проведений аналіз існуючих методів обробки та фільтрації дефектоскопічних сигналів, показав, що одним із найефективніших методів вирішення вказаної задачі є взаємкореляційний. Суть зазначеного методу полягає у розрахунку значень кореляції отриманої вибірки (рисунок 4.58) із ідеальним сигналом.

Найчастіше, для підвищення інформативності та чутливості методу ідеальний сигнал певним чином кодується. Найкращими для цієї задачі є коди Баркера. Проте, якщо для дефектоскопії різьбових з'єднань збільшення довжини коду принципового значення не має, то для товщинометрії луно-імпульсним методом вона спричиняє збільшення тривалості збуджуючого та луно-імпульсу, що унеможлиблює розпізнання донного та поверхневого луно-імпульсів при

малих товщинах ОК. Так, наприклад, якщо товщина ОК становить 10 мм, швидкість поширення акустичних коливань в матеріалі ОК складає 5900 м/с, то при частоті зондувальних імпульсів 1 МГц, розрізнити поверхневий та донний луно-імпульси, тривалість яких більша 3 періоди практично не можливо, оскільки вони накладаються.

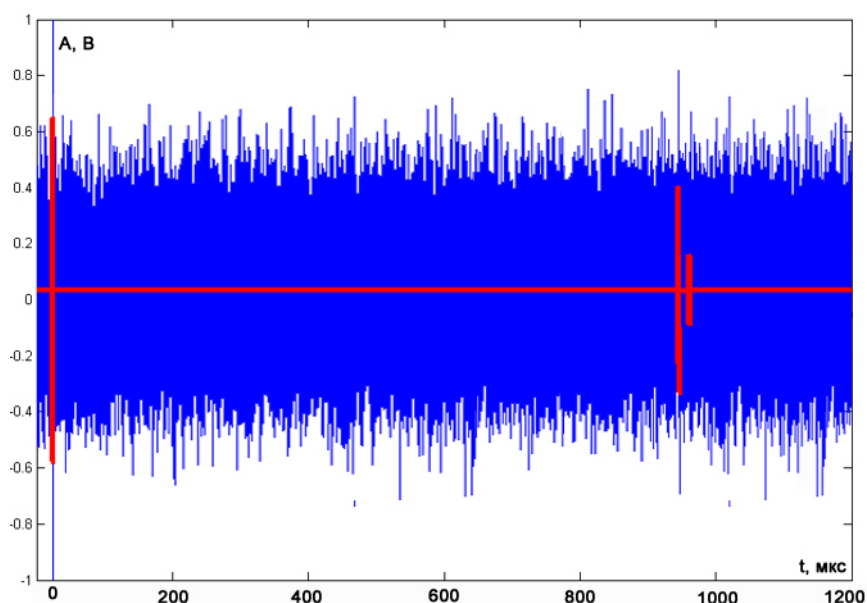


Рисунок 4.58 - Зашумлений та ідеальний сигнал: рівень шуму більший за рівень поверхневого та донного луно-імпульсів

Виходячи з вищесказаного, для нашого випадку доцільно вибрати код мінімальної довжини. Найбільш придатним для застосувань при модуляції збуджуючого імпульсу є код типу „+I -I”, який може бути представлений звичайною синусоїдою. Це пояснюється специфікою роботи

п'єзокераміки [184]. Числу $+1$ кодової послідовності Баркера відповідає додатній, а числу -1 від'ємний півперіод синусоїди.

Теоретична перевірка можливості використання взаємокореляційного підходу для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини проводилась шляхом чисельного моделювання в програмному пакеті MATLAB процесу поширення акустичних коливань від перетворювача до ОК з врахуванням втрат енергії ультразвукових коливань.

Було проведено чисельне моделювання процесу вимірювання товщини при різних значеннях рівня шуму, з метою виявлення такого значення відношення сигнал/шум вхідного сигналу при якому відношення сигнал/шум вихідного сигналу стає рівним 0 дБ. До корисного сигналу додавався білий шум, рівень якого більший за рівень поверхневого та донного луно-імпульсів (рисунок 4.58).

Після цього розраховувалась взаємокореляційна функція (ВКФ) зашумленого сигналу та модулюючого коду (рисунок 4.59).

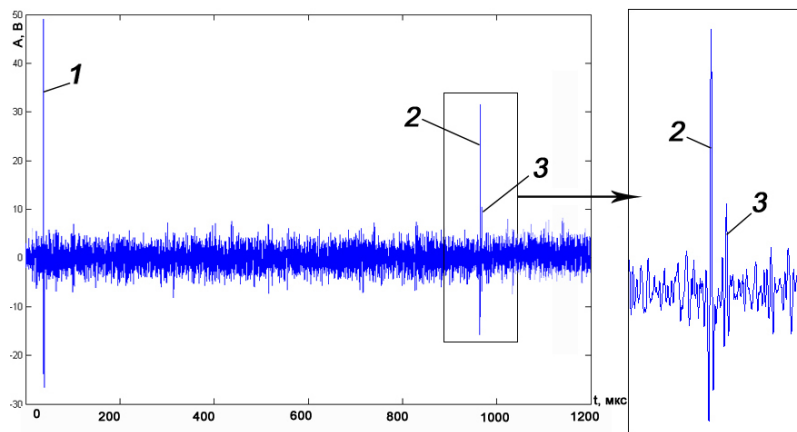


Рисунок 4.59 - ВКФ зашумленого сигналу та модулюючого коду

Як видно з рисунку 4.59 розрахована взаємкореляційна функція зашумленого сигналу та модулюючого коду дала можливість, в даному випадку, чітко виділити луно-імпульс від зовнішньої 2, локалізувати луно-імпульс від внутрішньої 3 поверхонь ОК та підняти рівень луно-імпульсів на 18 дБ у порівнянні з рівнем вхідного сигналу, тобто використання взаємкореляційна функція дає можливість додатково підсилити корисний сигнал. Відношення сигнал/шум вхідного сигналу при цьому складало -2,1 дБ.

Аналогічно було проведено близько 20 досліджень, за результатами яких можна було чітко виділити донний та поверхневий луно-сигнали. При цьому відношення сигнал/шум вхідного сигналу змінювалось в діапазоні від 0 дБ до -6 дБ.

Проте збільшення відношення сигнал/шум вхідного сигналу до значення -6,1 дБ, призвело до того, що відношення сигнал/шум вихідного сигналу стало рівним 0 дБ (рисунок 4.60).

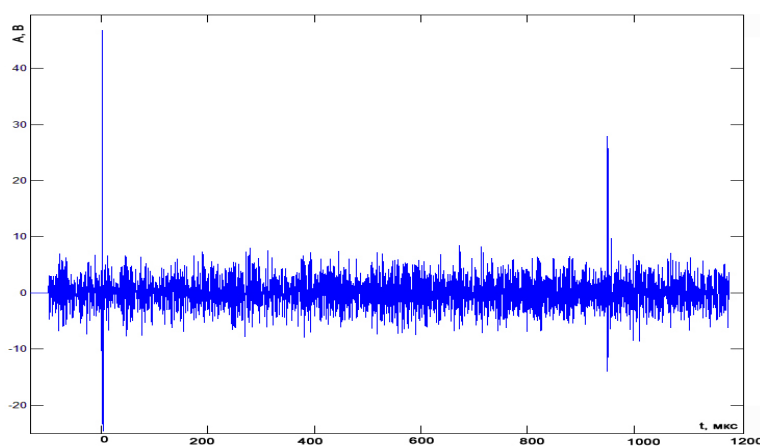


Рисунок 4.60 - ВКФ зашумленого сигналу та модулюючого коду. Відношення сигнал/шум для луно-сигналу від внутрішньої поверхні ОК рівне 0 дБ

В такому випадку другий відбитий сигнал після обробки вже не можливо було виявити. Таким чином шляхом математичного моделювання було визначено таке значення відношення сигнал/шум вхідного сигналу при якому класичний метод з використанням ВКФ не давав бажаного результату.

Таким чином, проведене чисельне моделювання процесу оброблення виміральної інформації підтвердило можливість використання ВКФ для додаткового підсилення корисних сигналів, відношення сигнал/шум для яких не більше $-6,1$ дБ. При збільшенні рівня шуму, використання ВКФ не дає позитивного результату;

Тестування розробленого методу на базі штучних нейронних мереж нейромережі здійснювалось на вибірці із 500 зашумлених корисних сигналів та 500 відрізків шуму.

Результати при цьому були наступними (рисунок 4.61).

Класифікація вхідних сигналів здійснювалась наступним чином: вихід нейромережі в діапазоні $0 \dots +1$ символізував наявність у вибірці корисного сигналу; при виході нейромережі в діапазоні $0 \dots -1$, результат інтерпретувався як відсутність корисного сигналу у даній вибірці.

З рисунка 4.61 видно, що якщо при розпізнанні шуму у нейромережі практично не виникає труднощів, то при розпізнанні корисних сигналів трапляються помилки, рівень яких склав $-4,2\%$ (21 із 500 вибірок, що містили корисний сигнал, на виході нейромережі дали результат в діапазоні $0 \dots -1$). Таким чином точність розпізнання зашумлених сигналів склала $95,8\%$. При цьому, для 500 вибірок сигналів шуму, вихід нейромережі знаходився в діапазоні $-0,85 \dots -1$.

Додатково, з метою підвищення інформативності запропонованого методу (результати якого уже порівнювані із результатами застосування кореляційного підходу у поєднанні із кодами Баркера), було запропоновано використовувати

перед подачею тестових сигналів на нейромережу процедуру згладжування [187].

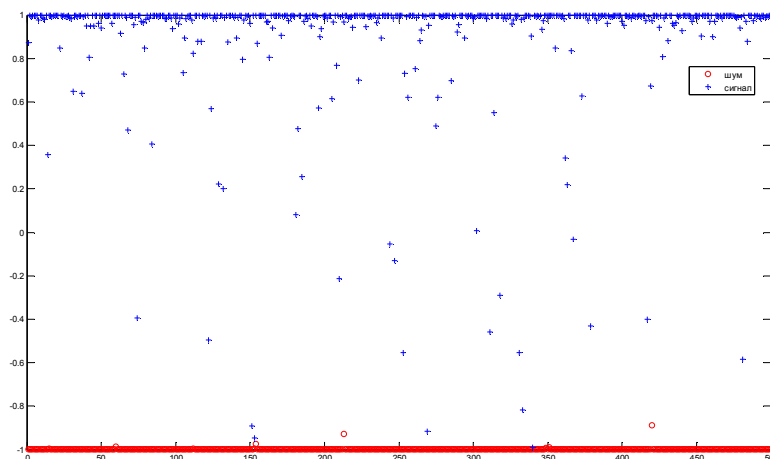


Рисунок 4.61 - Значення виходів нейромережі

На основі проведеного аналізу літературних джерел, згладжування було запропоновано виконувати по 11 точках методом фільтрації Савіцького-Голя. Згладжувальні фільтри Савіцького-Голя, які також є поліноміальними згладжувальними фільтрами або згладжувальними фільтрами із мінімальною квадратичною помилкою, як правило, використовують для „згладжування” зашумлених сигналів із широким спектром [188, 189]. В даному випадку згладжувальні фільтри Савіцького-Голя працюють набагато краще, ніж звичайні усереднювальні нерекурсивні фільтри, які мають тенденцію разом із шумом видаляти значну частку високочастотних складових. Фільтри Савіцького-Голя краще зберігають високочастотні складові сигналу, проте забезпечують гірше подавлення шуму у порівнянні із звичайними нерекурсивними фільтрами [190].

Фільтри Савіцького-Голя з дійснюють поліноміальну апроксимацію окремих кадрів вхідного сигналу за критерієм мінімуму квадратичної помилки [191]. В цьому сенсі вони є оптимальними.

Результати застосування процедури згладжування дозволили підвищити точність розпізнання між корисними сигналами та шумами (рисунок 4.62).

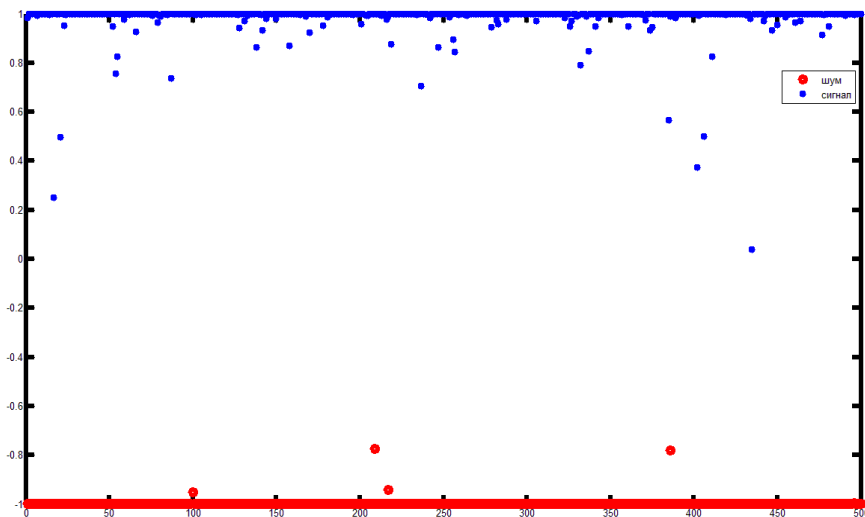


Рисунок 4.62 - Значення виходів неймережі після процедури згладжування вхідного сигналу

Точність розпізнання зашумлених сигналів при використанні процедури згладжування склала 99,8 %, при відношенні сигнал/шум вхідного сигналу -6,1дБ (1 із 500 сигналів був невірно класифікований). При роботі із шумами проблем у розпізнанні не було виявлено.

При зменшенні відношення сигнал/шум на вході до значень близьких -8дБ точність розпізнання зашумлених сигналів склала 95%, а при відношенні сигнал/шум -8,5дБ – близько 82%. При такому рівні завад взаємкореляційний

метод із застосуванням кодів Баркера вже не дозволяв виявляти корисні сигнали.

Таким чином, можемо сказати, що нами запропоновано новий метод виявлення зашумлених сигналів, результати моделювання дозволили стверджувати наступне:

- доведено можливість використання неймереж для виявлення корисного сигналу в шумі при відношенні сигнал/шум $-6,1$ дБ, з рівнем помилки $4,2\%$;

- використання процедури згладжування вхідних сигналів методом фільтрації Савицького-Голя, дало можливість зменшити рівень помилки до $0,2\%$, при відношенні сигнал/шум $-6,1$ дБ.

До характерних переваг розробленого неймережевого методу у порівнянні із класичним підходом слід віднести наступне: незалежність від форми вхідного сигналу і її характеру; можливість удосконалення шляхом зміни в архітектурі неймережі, застосування більш досконалих методів тренування та згладжування; простота апаратної реалізації методу на базі мікропроцесорної техніки, на якій побудовані практичні усі сучасні технічні засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Додатково, в роботі [186] було виконано більш широке експериментальне перевіряння запропонованого методу у порівнянні взаємкореляційним методом – за допомогою безконтактного ультразвукового контролю проводились вимірювання сталевих зразків різної товщини. Запропонований метод, що базується на використанні нейронних мереж дозволив забезпечити вимірювання товщини в діапазоні від $0,55$ до $9,53$ мм, а взаємкореляційний – від $0,55$ до 5 мм.

4.4 Методи ідентифікації типів дефектів під час ультразвукової дефектоскопії

Найбільш широке застосування ультразвуковий метод контролю отримав в галузі дефектоскопії матеріалів та виробів. В загальному, на ультразвуковий контроль припадає велика частина неруйнівного контролю, причому частка ручного контролю залишається найбільшою. Це пов'язано з тим, що переважна частина контролю виконується на об'єктах, що перебувають в експлуатації (трубопроводах, металоконструкціях тощо). Серійні засоби ультразвукового контролю призначені для вимірювання інформативного параметру дефектів, такого як амплітуда відбитого чи пройшовшого імпульсу. Удосконалення ультразвукових дефектоскопів і методик контролю часто проводиться в рамках вимірювання наведеного інформативного параметру.

При ультразвуковому контролі луно-імпульсним методом класифікація несучільностей або дефектів, вирішується шляхом порівняння амплітудної характеристики луно-імпульсу від несучільності в об'єкті контролю з амплітудною характеристикою луно-імпульсу від еталонного відбивача, який розташований на тій же глибині, що і несучільність, в стандартному взірці підприємства. При ультразвуковому контролі луно-імпульсним методом для визначення типу несучільності (плоска чи об'ємна), слід провести контроль з щонайменше 3-х взаємно-перпендикулярних поверхонь. При виявленні 3-х луно-імпульсів з співрозмірною амплітудною характеристикою несучільність можна вважати об'ємною. У випадку коли контроль відбувається тільки з однієї поверхні об'єкта контролю, визначення типу несучільності стандартними методами за амплітудою луно-імпульсу стає неможливим.

Метою даної роботи є розроблення підходу для визначення типу порушення суцільності за допомогою

ультразвукового контролю луно-імпульсним методом за умови одностороннього доступу до об'єкту контролю.

Найбільш наближеними моделями розглядуваних порушень суцільності (плоскої та сферичної) будуть слугувати плоскодонний та напівсферичний відбивач, що є найбільш розповсюдженими типами штучних відбивачів. Амплітудна характеристика луно-імпульсу від плоскодонного відбивача, що знаходиться в дальній зоні пезоперетворювача, з врахуванням затухання в ОК, описується залежністю [192]:

(4.69)

де S_a – площа випромінювача, м²; S_b – площа відбивача, м²; v – швидкість ультразвуку в ОК, м/с; x – глибина залягання відбивача, м; f – частота ультразвукового зондуючого сигналу (імпульсу), Гц; δ – коефіцієнт затухання ультразвуку в об'єкті контролю, Нп/м.

Амплітудна характеристика луно-імпульсу від сферичного відбивача, з врахуванням затухання в об'єкті контролю, що знаходиться в дальній зоні пезоперетворювача, описується залежністю [192]:

(4.70)

де d – діаметр півсферичного відбивача, м.

Проте слід мати на увазі, що наведені формули дійсні для відбивачів, що знаходяться в дальній зоні пезоперетворювача, що повинна задовольняти умову [192]:

$$x > \frac{3 \cdot S_a}{\pi \cdot f \cdot v} \quad (4.71)$$

В попередній роботі авторів [193], для ідентифікації типів несучільностей було використано той факт, що амплітудна характеристика луно-імпульсу від несучільності різного типу буде різною, за інших однакових впливових факторів (глибина залягання несучільності). Проте, спостерігались випадки, коли несучільності різних типів давали однакову амплітудну характеристику відбитого луно-

імпульсу для різни розмірів несучільностей, що цілком вірогідно, з точки зору можливої рівності сукупності кількох впливових параметрів (площа відбивача та площа випромінювача, площа відбивача та діаметр напівсферичного відбивача), так званого коефіцієнта форми дефекта A [192].

На рисунку 4.63 Наведено залежність амплітуди відбитого луно-імпульсу для несучільностей двох типів. Вихідними даними для розрахунку були: діаметр випромінювача, $d_a = 12$ мм; $v = 5930$ м/с; $x = 5$ мм; $f = 2,5$ Гц; $\delta = 0,46$ Нп/м. Як видно з графічно залежності, одному значенню амплітуди відбитого луно імпульсу може відповідати наявність як сферичного так і плоского відбивача різного розміру.

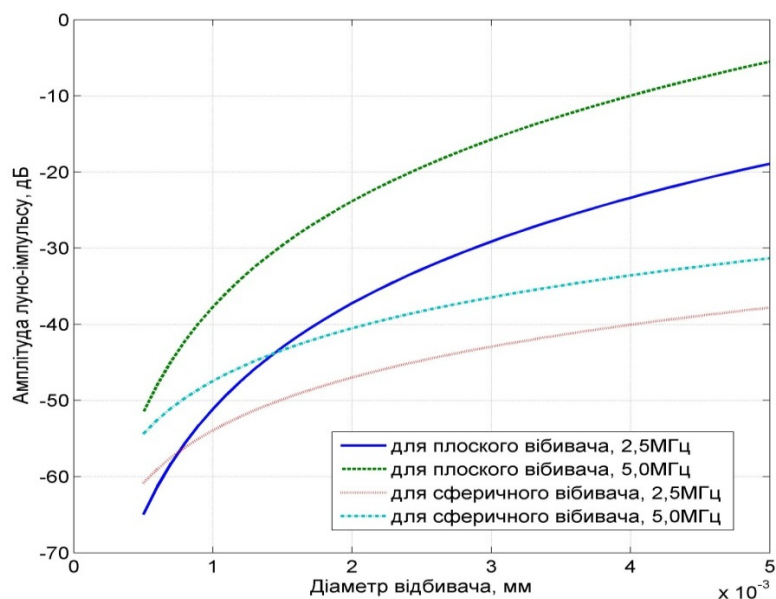


Рисунок 4.63 - Залежність амплітуди відбитого луно-імпульсу для відбивачів двох типів від їхнього діаметру

В даній роботі пропонується покращити запропонований раніше метод ідентифікації типу несучільності, використавши той факт, що можливу рівність сукупності названих параметрів можна виключити шляхом проведення контролю на 2-х різних частотах зондуючого сигналу. Таким чином вдасться забезпечити лінійну незалежність сукупності впливових параметрів на амплітудну характеристику відбитого луно-імпульсу. Тобто, в тому випадку коли амплітудна характеристика від двох несучільностей різного типу буде однаковою на одній частоті, вона буде відрізнятися на іншій.

Для підтвердження можливості ідентифікації типу несучільності було вирішено провести моделювання відбитого луно-імпульсу від відбивачів різного типу на двох різних частотах зондувального сигналу. Вихідні дані для розрахунку були вибрані такі ж, як у попередньому випадку, частоти зондувального імпульсу 2,5 МГц та 5,0 МГц. У якості характеристичного параметру конкретного типу несучільності було вибрано різницю амплітуди відбитого луно-імпульсу на двох різних частотах. На рисунку 4.64 наведено залежність отриманого характеристичного параметру для двох типів відбивачів від їхнього діаметру.

Як видно з отриманих графічних залежностей, характеристичний параметр типу несучільності значно відрізняється для несучільностей різного типу. Це дозволить чітко ідентифікувати тип несучільності при проведенні автоматичного контролю без втручання дефектоскопіста.

Реалізувати запропонований підхід пропонується шляхом використання штучних нейронних мереж для класифікації типу несучільності за амплітудними характеристиками. Це дозволить здійснювати контроль різних матеріалів та за допомогою різних первинних перетворювачів.

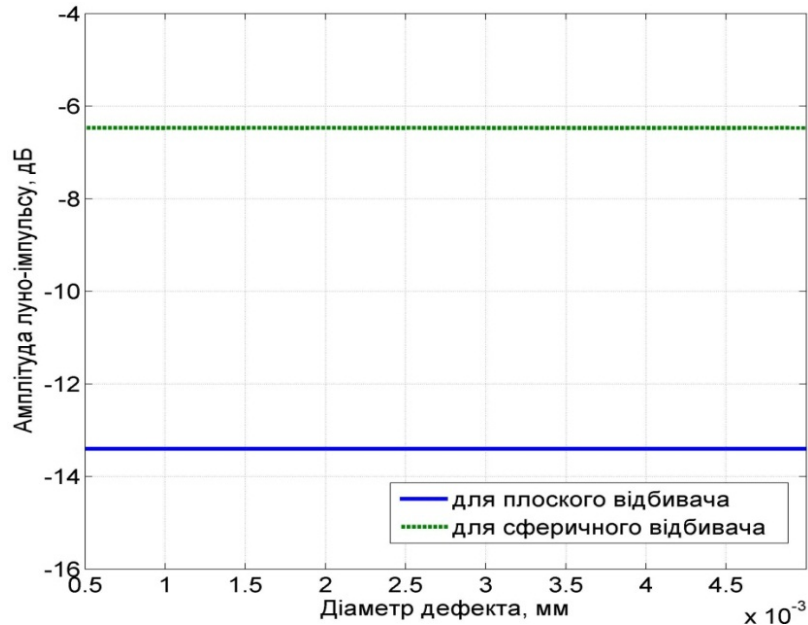


Рисунок 4.64 - Залежність характеристичного параметру для типів несучільності від їхнього діаметру

Здійснити це можна завдяки здатності нейронної мережі до тренування, згідно методики запропонованої в [193], на взірцях підприємства з змодельованими штучними несучільностями типу сферичний пропи́л та сферичний отвір, для 2 різних частот ультразвукового сигналу, різних розмірів.

Для вирішення означеної задачі використовується нейронна мережа зі зворотним поширенням помилки, яка тренується шляхом подавання на її вхід 2-х значень амплітудних характеристик отриманих на 2-х різних частотах від змодельованих несучільностей у взірці, а на вихід – умовно тип несучільності: 1 – плоский дефект, 0 – напівсферичний дефект. В нейронній мережі передбачається один прихований шар із довільною кількістю нейронів, в межах 5-13, та вихідний шар з одним нейроном. Такий тип

нейронної мережі добре зарекомендував себе в задачах простої класифікації двох ознак [193,194]. Процедура тренування полягає у налаштуванні вагових коефіцієнтів у вузлах (нейронах) мережі, на основі даних отриманих на взірці. Мережа із одним прихованим шаром тренується із заданим рівнем похибки (не більше 1-2%).

Власне ідентифікацію типу несущільності слід проводити попередньо виключивши вплив глибини залягання несущільності з амплітудної характеристики отриманого луно-імпульсу. Тобто значення отриманого сигналу амплітуд слід умовно привести до глибини залягання змодельованих дефектів у взірці. Це здійснюється шляхом виключення втрат на затухання в матеріалі об'єкта контролю. Для цього можна використовувати або попередньо відому характеристику об'єкта контролю, або донний сигнал на ділянці без дефекту.

4.5 Підвищення точності контролю в середовищі природного газу

Питання забезпечення надійності та безпечності постачання природного газу магістральними трубопроводами набуває дедалі більшої актуальності, з огляду на значний ступінь зношеності та старіння устаткування вітчизняного нафтогазового комплексу. Близько 60% магістральних трубопроводів експлуатуються понад 30 років [194]. Заміна та модернізація цього парку металоконструкцій проводиться значно нижчими темпами, ніж це необхідно для безпечного експлуатування магістральних трубопроводів. Основною причиною виходу з ладу магістральних трубопроводів є внутрішні та зовнішні корозійні пошкодження, що постає причиною 28,9% відмов, для порівняння у Європейському Союзі – 15% [22]. Для визначення фактичного технічного стану трубопроводів та можливості прогнозування його зміни слід періодично проводити його технічне діагностування.

Однією з задач технічного діагностування трубопроводів є визначення фактичної товщини стінки трубопроводу. Як правило, бракувальним критерієм служить зменшення товщини стінки труби понад 12,5% від номінального значення.

На даний час найбільш поширеним методом визначення поточного стану магістральних газових трубопроводів є внутрішньотрубна діагностика з використанням автономних снарядів-дефектоскопів (поршнів), з магнітними давачами, що рухаються в середині труби під напором транспортованого продукту [195]. Проте, згадані пристрої характеризуються рядом суттєвих недоліків: ймовірність виявлення дефектів, точного визначення їх розмірів та геометричних параметрів тіла труби не перевищує 75%; існують серйозні складнощі із виявленням поздовжніх дефектів, розшарувань; висока вартість та трудомісткість обстежень, складність інтерпретації результатів, низька повторюваність результатів тощо. Окрім того, на результати вимірювання мають вплив і неоднорідні магнітні характеристики металу.

Перспективним для вирішення задачі внутрішньотрубною діагностики на даний момент також є електромагнітно-акустичний контроль [196]. Проте, поршні, що реалізують даний вид контролю знаходяться на етапі впровадження в промисловість, мають високу вартість і ряд технологічних обмежень.

Таких недоліків позбавлений метод ультразвукового контролю, що дозволяє достатньо точно визначити товщину стінок труби. Застосування ультразвукового контролю для внутрішньотрубною діагностики має місце при контролі нафтопроводів, де транспортована нафта служить контактним середовищем (КС) [195, 197]. В газопроводах, як КС, іноді використовують водяний корок, проте це можливо тільки на відносно коротких ділянках трубопроводів. Основними проблемами застосування ультразвукового контролю при

внутрішньотрубній діагностиці є значна втрата ультразвукової енергії на границі розділу середовищ [198, 199] і, як наслідок, низьке співвідношення корисний сигнал/шум. Одним із способів подолання цих перешкод є врахування особливостей середовища та правильного підбору погоджувальних шарів перетворювача, призначеного для безконтактного контролю [148, 200].

Проблема ультразвукового контролю стінок газопроводів досліджувалась раніше. Зокрема, у звіті [195] та праці [200] зазначається, що використання ультразвукового контролю для внутрішньотрубного діагностування стінок трубопроводів є цілком здійсненою задачею, а отже потребують удосконалення конструкції п'єзоперетворювачів та методики проведення контролю.

Таким чином, метою даної роботи є спроба розробити спосіб оцінки втрат енергії ультразвукового сигналу за внутрішньотрубного ультразвукового контролю товщини стінки трубопроводу в середовищі природного газу з урахуванням фізичних параметрів середовища, об'єкта контролю та п'єзоперетворювача. Основною ідеєю в даному випадку є те, що як КС за ультразвукового контролю виступатиме природний газ під робочим тиском, що може сягати 8 МПа. Зокрема, пропонується використати те явище, що природний газ під тиском має більший акустичний імпеданс та менший коефіцієнт зникання звукових хвиль [201], що може значно зменшити втрати енергії ультразвукового сигналу підчас його поширення через КС та на границях розділу середовищ, як це показано в працях [202-204]. Оцінка рівня втрат сигналу в акустичному тракті за ультразвукового контролю з урахуванням згаданих властивостей КС (природного газу під тиском) дозволить правильно підібрати матеріали для виготовлення погоджувальних шарів для п'єзоперетворювача та

розрахувати їхні геометричні розміри, визначити необхідну потужність зондувального ультразвукового сигналу.

У випадку проведення контролю стінок труби з одностороннім доступом (рисунок 4.65) до внутрішньої стінки сталевого трубопроводу (ОК - об'єкт контролю в даному випадку) в КС (природній газ), ультразвуковий сигнал зазнає значних втрат на таких границях розділу середовищ – п'єзоелемент(ПЕ)/КС, КС/ОК та внаслідок зникання під час поширення в КС, у прямому, та в зворотному напрямках.

У випадку, що розглядається, враховуючи те, що одне із середовищ є газовим, а напрямок поширення хвилі перпендикулярний до границі розділу середовищ, розглядатимуться тільки однонаправлені плоскі повздовжні хвилі [205]. Для спрощення вважатимемо, що поперечні хвилі в достатньому наближенні не виникатимуть. Тому скористаємось спрощеними моделями для розрахунку коефіцієнту проходження та відбиття ультразвукових коливань на границі розділу двох середовищ, запропонованими у праці [206], що часто використовуються для вирішення задач безконтактного ультразвукового контролю [186].

Втрати енергії ультразвукового променя за здійснення контролю можна записати таким чином:

- для акустичних коливань відбитих від внутрішньої поверхні стінки труби (∂B):

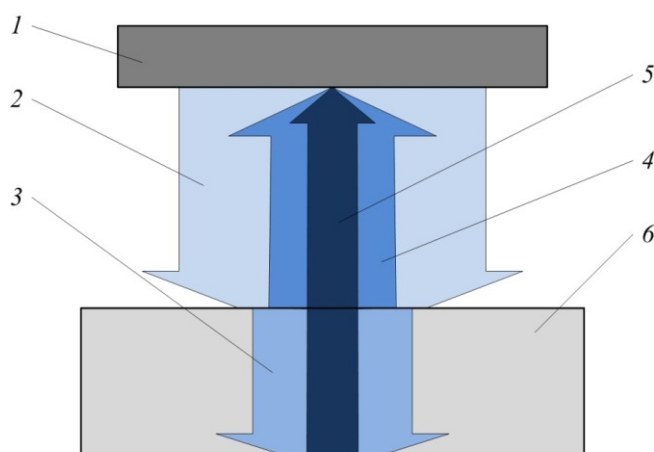
$$N_1 = T_{11} + A_1 + R_1 + A_1 + T_{12} , \quad (4.71)$$

де T_{11} – втрати у на границі розділу ПЕ/КС (∂B), A_1 – зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в КС (∂B), R_1 – втрати енергії відбитої хвилі на границі КС/ОК (внутрішня поверхня стінки труби) (∂B), T_{12} – втрати на границі розділу КС/ПЕ (∂B).

- для акустичних коливань відбитих від зовнішньої поверхні стінки труби (∂B):

$$N_2 = T_{11} + A_1 + T_{21} + A_2 + R_2 + A_2 + T_{22} + A_1 + T_{12}, \quad (4.72)$$

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



1 – п'єзоелектрична пластина, 2 – падаюча хвиля, 3 – пройшовши в тіло труби хвиля, 4 – хвиля відбита від внутрішньої поверхні стінки труби, 5 - хвиля відбита від зовнішньої поверхні стінки труби, 6 – ОК – стінка труби

Рисунок 4.65 – Схема проходження ультразвукового променя

Тому втрати енергії хвилі, що пройшла на границі розподілу двох середовищ (ПЕ/КС, КС/ОК), за енергетичним коефіцієнтом проникнення [205], обчислюються за формулою:

$$T_{1,2} = 10 \lg \frac{4\xi}{(1+\xi)^2}, \quad (4.73)$$

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

Втрати енергії відбитої хвилі на границі розподілу двох середовищ (КС/ОК та ОК/зовнішнє середовище), за коефіцієнтом відбиття за енергією [205], можна визначити як:

$$R_{1,2} = 10 \lg \left(\frac{1-\xi}{1+\xi} \right)^2, \quad (4.74)$$

Втрати енергії хвилі в матеріалі ОК та газоподібному середовищі, визначаються за формулою [207]:

$$A_l = -8.686 \cdot \delta \cdot h, \quad (4.75)$$

де δ – коефіцієнт затухання ультразвуку в матеріалі або середовищі (I/M), що залежить від частоти ультразвукових коливань, h – відстань поширення ультразвуку.

Коефіцієнт поглинання ультразвуку в газах, визначається сумою коефіцієнтів поглинання, зумовлених різними впливовими чинниками [204]:

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_l + \alpha_{st}. \quad (4.76)$$

де α_r – поглинання ультразвуку, викликане в'язкими властивостями середовища, α_l – поглинання ультразвуку, викликане теплопровідністю середовища, α_{st} – коефіцієнт затухання, зумовлений поглинанням тепла, цей коефіцієнт настільки малий, що ним можна знехтувати у порівнянні з іншими [6].

Сумарний коефіцієнт поглинання ультразвуку у в'язкому та теплопровідному середовищі визначається за формулою Стокса-Кірхгофа [201]:

$$\alpha = \alpha_l + \alpha_r = \frac{\pi^2 \cdot f^2}{2 \cdot \bar{c}^3 \cdot \rho} \left(\frac{4 \cdot \eta}{3} + \frac{\chi - 1}{C_p} \cdot K \right) \quad (4.77)$$

де f – частота звуку, \bar{c} – швидкість звуку, η – коефіцієнт в'язкості, ρ – густина середовища, K – коефіцієнт

теплопровідності, χ – відношення питомих теплоємностей, C_p – питома теплоємність при $P = const$.

Відповідно, враховуючи наведені формули можна отримати наступні залежності для оцінки втрат енергії ультразвукових коливань відбитих від зовнішньої та внутрішньої поверхонь ОК відповідно:

$$N_1 = 10 \lg \frac{4\xi_{11}}{(1+\xi_{11})^2} + 10 \lg \frac{4\xi_{12}}{(1+\xi_{12})^2} - 2 \cdot 8.686 \cdot \alpha \cdot d + 10 \lg \left(\frac{1-\xi_{21}}{1+\xi_{21}} \right)^2, \quad (4.78)$$

$$N_2 = 10 \lg \frac{4\xi_{11}}{(1+\xi_{11})^2} + 10 \lg \frac{4\xi_{12}}{(1+\xi_{12})^2} - 2 \cdot 8.686 \times \\ \times \alpha \cdot d + 10 \lg \frac{4\xi_{21}}{(1+\xi_{21})^2} + 10 \lg \frac{4\xi_{22}}{(1+\xi_{22})^2} - 2 \cdot 8.686 \cdot \delta \cdot h + 10 \lg \left(\frac{1-\xi_{31}}{1+\xi_{31}} \right)^2 \quad (4.79)$$

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

Акустичний імпеданс середовища може бути знайдений за формулою [203]:

$$Z = \rho \cdot \bar{c}. \quad (4.80)$$

Величини, що входять у формули (4.79) та (4.80) характеризують стан газу, залежать від його складу, тиску та температури та визначаються за відомими фізичними залежностями, детально наведеними в довіднику GPSA

Engineering databook GPSA Engineering databook [208]. Наведені в довіднику експериментальні та статистичні відомості стосовно вуглеводнів є найновішими в даній області та дозволяють проводити розрахунок фізичних параметрів природного газу в залежності від його складу.

Оцінку втрат енергії ультразвукових згідно з наведеними формулами було вирішено здійснити для повітря та для природного газу, зі складом, що є типовим, для частоти зондувального ультразвукового сигналу $f = 1\text{МГц}$. Моделювання проводилось за умов збільшення тиску КС від стандартних умов до 8МПа .

Для моделювання було вибрано наступні вихідні умови: контактне середовище – природний газ; склад: метан – $93,42\%$, етан – $0,05\%$, діоксид вуглецю – $2,292\%$, азот – $1,79\%$; робоча температура – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Акустичний імпеданс матеріалу ПЕ – $25 \cdot 10^6\text{ кг/м}^2\text{с}$. Об'єкт контролю – пластина з марки сталі 17Г1С, товщиною – $h = 10\text{мм}$, коефіцієнт затухання для ультразвукових хвиль частотою 1 МГц – $\delta = 0,46\text{м}^{-1}$, акустичний імпеданс – $46,2 \cdot 10^6\text{ кг/м}^2\text{с}$. Відстань поширення ультразвуку в КС – 50мм .

Необхідні для розрахунку акустичного опору середовища та коефіцієнту затухання ультразвуку, фізичні властивості газу були знайдені за допомогою відповідного програмного забезпечення (*Worksheet: Properties of Hydrocarbon based Gas Mixtures using the GPSA Engineering Data Book – 11 Edition*) [209]. Дане безкоштовне програмне забезпечення, що є у вільному доступі, дозволяє розраховувати основні фізичні параметри природного газу, для заданого хімічного складу та робочих умов згідно з основними фізичними залежностями наведеними в [208], рисунок 4.66.

ENGINEERING DESIGN CALCULATION - DENNIS KIRK ENGINEERING									
Calculation of Gas Properties - GPSA Engineering Data Book - SI Units - 11th Edition 1998								Version 1.510	
CALCULATION TITLE									
		Uniformly Normalised							
		mole %	mole %						
CH4	Methane	93,42	95,7417	%					
C2H6	Ethane	0,05	0,0512	%					
C3H8	Propane	0	0,0000	%	R=	8,314510	kJ/kg.mol.degK		
C4H10	i-Butane	0	0,0000	%	MW air=	28,9625	kg/kmol		
C4H10	n-Butane	0	0,0000	%	Zb air=	0,99958			
C5H12	i-Pentane	0	0,0000	%	Pb=	101,325	kPa(g)		14,69618 psi(g)
C5H12	n-Pentane	0,016	0,0164	%	Ps=	101,325	kPa(abs)		
C6H14	n-Hexane	0,007	0,0072	%	Pb=	202,650	kPa(abs)		
C7H16	n-Heptane	0	0,0000	%	Tb=	20	degC		68 °F
C8H18	n-Octane	0	0,0000	%	Te=	273,15	degK		
C9H20	n-Nonane	0	0,0000	%	Tb=	293,15	degK		
C10H22	n-Decane	0	0,0000	%					
C6H6	Benzene	0	0,0000	%					
CO	Carbon Monoxide	0	0,0000	%					
CO2	Carbon Dioxide	2,292	2,3490	%					
H2S	Hydrogen Sulfide	0	0,0000	%					
N2+O2	Air	0	0,0000	%					
H2	Hydrogen	0	0,0000	%					
O2	Oxygen	0	0,0000	%					
N2	Nitrogen	1,79	1,8345	%					
H2O	Water	0	0,0000	%					
		97,5750	100,0000	%					
MW		16,9409		kg/kmol				16,9163	from AGA8 GCM2 Method
SG ideal		0,5649		Specific Gravity				0,5860	from AGA8 GCM2 Method
SG real		0,5859						0,9963	from AGA8 GCM2 Method
Zb [15°C, 0 kPa(g)]		0,9890		Compressibility at base conditions					
HHV ideal		36,1734	MJ/Sm ³	Higher Heating Value					
HHV real		36,2456	MJ/Sm ³	Wobbe Index		47,354064		71,4488	from AGA8 GCM2 Method
LHV ideal		32,5688	MJ/Sm ³	Lower Heating Value					
LHV real		32,6338	MJ/Sm ³						
P		10000	kPa(g)	Operating Pressure		1450,4	psi(g)		
T		30	°C	Operating Temperature		86	°F		
P		10101,325	kPa(abs)						
T		303,15	°K						
Pc		4590,88	kPa(abs)	Pseudo Critical Pressure					includes Wichert & Aziz Correction for Sour Gas
Tc		190,06	°K	Pseudo Critical Temperature					includes Wichert & Aziz Correction for Sour Gas
Vc		0,00958	m ³ /kg	Pseudo Critical Specific Volume					
Zc		0,2870		Pseudo Critical Compressibility					
Pr (Pro)		2,2003	0,0441	Pseudo Reduced Pressure					
Tr		1,5950		Pseudo Reduced Temperature					
Z (MW<40, P<70MPa)		0,8511		Compressibility (Pr 0 to 15, Tr 1 to 3)				0,8611	from AGA8 GCM2 Method
d		79,7673	kg/m ³	Density				78,7309	from AGA8 GCM2 Method
Cpo (T<25 to 150°C)		35,8617	kJ/kmole.°C	Heat Capacity (Pconstant)		2116,8645	J/kg.°C		
Cvo		27,5472	kJ/kmole.°C	Heat Capacity (T constant)		1626,0709	J/kg.°C		
ko=Cpo/Cvo		1,3018		Thermal Conductivity		0,0473228	W/m.°C		(MW>16, 20<T<200°C, Pr<8, 1<Tr<3)
Cp		46,0623	kJ/kmole.°C	refer Redlich-Kwong		2718,9899	J/kg.°C		
Cv		34,2345	kJ/kmole.°C	Equations of State		2020,8157	J/kg.°C		
k=Cp/Cv		1,3455		Velocity of Sound		383,72817	m/sec		
w		0,0174		Acentric Factor					
u (T<130 to 500°C)		0,0156	cP (mPa.s)	Viscosity from Fig 23-23 (P 0 to 21 Mpa)				0,0138212	from John M Campbell & Co
ua @101.325 kPa(a)		0,01099353	cP (mPa.s)	or Viscosity from 23-22 (if Tr > 1.0)					
u/ua		1,25183201		and pressure correction from 23-24					
u		0,0138	cP (mPa.s)						
				or if high levels of non hydrocarbons are present (eg 20%)					
E		0,04585		Eq 23-20 (corrected)					
E ua		0,00051		Eq 23-21 (corrected) and Eq 23-22					
ua @101.325 kPa(a)		0,01121	cP (mPa.s)	for high levels of non hydrocarbons					
u		0,0140	cP (mPa.s)	with pressure correction from 23-24					
H (T<30 to 480°C)		8652,58732	kJ/kmol	Enthalpy (Pr 0.1 to 10, Tr 1 to 4)				Note:H=0 for T=0°K and P=0 kPa(abs)	
JT		510,749858	kJ/kg	Note: Values for Hexane, Heptane, Octane, Nonane, Decane are approximate only					
S (T<80 to 240°C)		0,26516386	cC/100 kPa	JT Effect of Gas Expansion					
		168,370632	kJ/kmole.K	Entropy (Pr 0.1 to 10, Tr 0.8 to 4)				Note:S=0 for T=0°K and P=0 kPa(abs)	
		9,939	kJ/kg.K	Note: Values for Hexane, Heptane, Octane, Nonane, Decane are not available!					
	denniskb@ozemail.com.au								www.ozemail.com.au/~denniskb

Рисунок 4.66 - Розрахунок фізичних властивостей газу за допомогою *Worksheet: Properties of Hydrocarbon based Gas Mixtures using the GPSA Engineering Data Book (11 Edition)*

За результатами проведеного моделювання, на рисунок 4.67 наведено сумісну залежність втрат ультразвуку внаслідок затухання в КС від частоти ультразвукових коливань та тиску КС. З отриманої залежності видно, що при збільшенні тиску КС, втрати внаслідок затухання ультразвуку значно зменшуються. За значень тиску КС понад 3 МПа, втрати енергії внаслідок затухання в КС є незначними (порядку -2 дБ), а їх значення не значно залежить від частоти ультразвуку. Врахування того факту, що за прийнятого спрощення, про те, що частота ультразвукових коливань не впливає на втрати енергії ультразвуку при проходженні границь розділу середовищ, дозволяє стверджувати, що при здійсненні ультразвукового контролю за збільшеного тиску КС (понад 3 МПа) можна вибирати частоту ультразвукових коливань згідно з вимогами щодо матеріалу ОК без урахування фізичних властивостей КС.

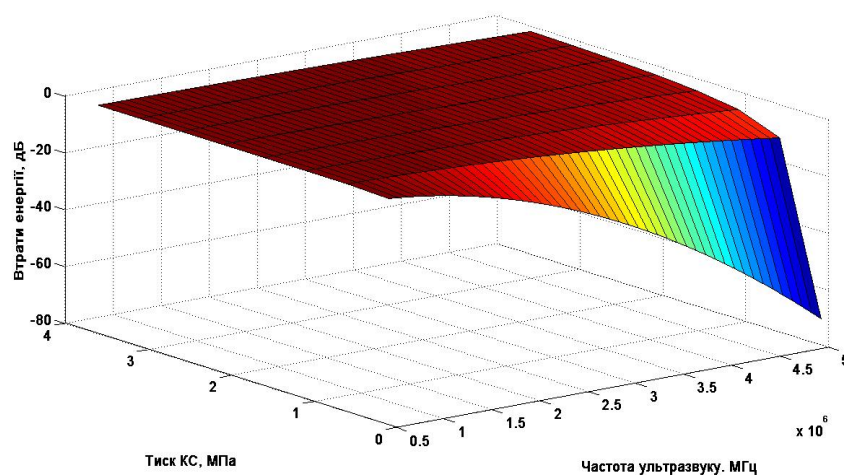
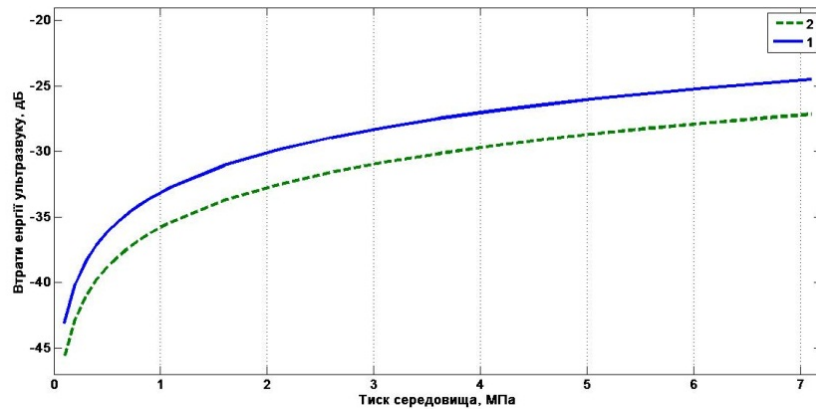


Рисунок 4.67 - Поверхня втрат енергії ультразвуку при затухання в КС в залежності від тиску КС та частоти УЗ променів.

На рисунок 4.68 наведено втрати енергії ультразвуку при проходженні границі розділу ПЕ/КС та КС/ОК від тиску контактного середовища для ультразвукових коливань частотою 1МГц. На рисунку 4.69 приведено залежність втрат енергії ультразвуку при поширенні в середовищі від тиску цього середовища, для ультразвукового променя, відбитого від внутрішньої та зовнішньої стінок тіла труби відповідно.

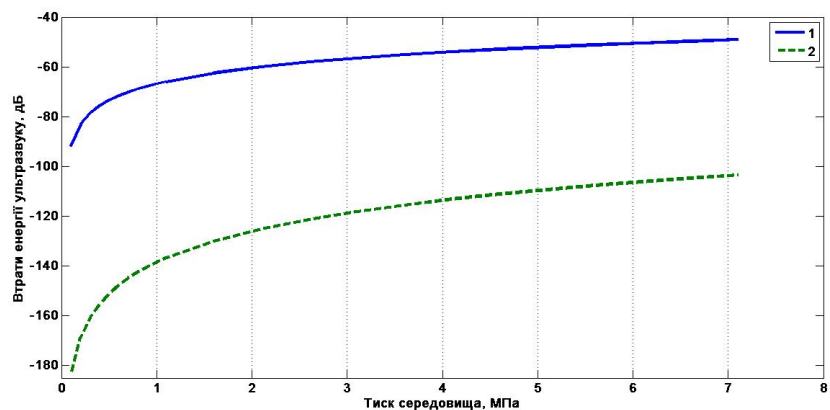


1 – для ультразвукових коливань, при проходженні границі розділу ПЕ/КС; 2 – для ультразвукових коливань, при проходженні границі розділу КС/ОК

Рисунок 4.68 Втрати енергії ультразвуку при проходженні границі розділу середовищ в залежності від тиску середовища поширення (для природного газу)

Як видно з отриманих графічних залежностей, за збільшення тиску середовища поширення ультразвуку, значно зменшуються втрати енергії ультразвукового променя при проходженні на границі розподілу середовищ від тиску контактного середовища. Це відбувається за рахунок збільшення акустичного імпедансу КС при збільшенні тиску і відповідно кращого узгодження акустичних імпедансів середовищ що контактують. В наслідок цього, а також за

рахунок зменшення коефіцієнту затухання ультразвуку в КС при збільшенні тиску, отримуємо значне зменшення втрат енергії ультразвукових коливань при ультразвуковому контролі.



1 – для ультразвукових коливань відбитих від поверхні внутрішньої стінки труби; 2 – для ультразвукових коливань відбитих зовнішньої стінки труби

Рисунок 4.69 - Втрати енергії ультразвуку в залежності від тиску КС

Виконані розрахунки втрати енергії ультразвукових коливань для п'єзоперетворювача, що працює в КС природного газу за нормальних умов становлять $N_{1_0} = -91,89\text{дБ}$ та $N_{2_0} = -183,53\text{дБ}$. Тиск, за якого відбувається внутрішньотрубна діагностика за допомогою поршневих снарядів, зазвичай становить 70-80% від робочого, і це становить 4-5 МПа. Втрати енергії ультразвукових коливань для п'єзоперетворювача без погоджувального шару, що працює в КС природного газу під тиском 4 МПа, є меншими майже у 1,65 рази і становлять $N_{1_4} = -53,98\text{дБ}$ та $N_{2_4} = -113,21\text{дБ}$ відповідно.

Попередньо проведені авторами дослідження [210,211] безконтактного способу ультразвукового контролю товщини металоконструкцій підчас двостороннього доступу, дозволяють стверджувати, що підбір відповідного погоджувального шару з врахуванням акустичного імпедансу середовища поширення ультразвуку та матеріалу ПЕ, та відповідних умов середовища, дозволить додатково зменшити втрати енергії ультразвукового променя на границі розділу ПЕ/середовище. В попередньо проведених дослідженнях [210] авторам, на практиці, вдалось досягнути зменшення втрат енергії ультразвукового імпульсу для границі розділу ПЕ/КС, для повітря за нормальних умов, шляхом врахування особливостей КС та використання погоджувальних шарів на величину, рівну 32 дБ.

У поєднанні з сучасними алгоритмами обробки сигналу [212] з низьким відношенням сигнал-шум (менше одиниці), що дозволяють обробляти сигнали з високим рівнем затухання, запропонований метод оцінки втрат енергії (врахування параметрів КС, ПЕ, ОК з метою зменшення втрат енергії) дасть можливість чітко детектувати відбиті імпульси та здійснювати дефектоскопію та/або товщинометрію стінки трубопроводу. Розроблений авторами метод оброблення вимірювальної дефектоскопічної інформації, на базі штучних нейронних мереж [178], дозволяє чітко виявляти відбиті луно-імпульси в зашумленому сигналі при рівні втрат енергії ультразвукового сигналу -100 дБ за співвідношення сигнал/шум -8 дБ [211].

5 ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ УСТАТКОВАННЯ, ІНСТРУМЕНТУ ТА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ

Відповідно до існуючої світової та вітчизняної практики, головне місце у виявленні небезпек і оцінці їх вагомості займає технічне діагностування, що в основному реалізується методами неруйнівного контролю [213].

Так, на сучасному етапі розвитку науки і техніки України, ставиться завдання не тільки локалізації та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу, але й: контроль за утворенням та докритичним розвитком тріщини; контроль напружено-деформованого стану матеріалу; вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дозволить через вимірювання цих параметрів вийти на оцінку залишкового ресурсу об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного (технічного) стану металоконструкцій [214].

Для переважної більшості об'єктів нафтогазової галузі можливо застосувати принцип визначення фактичного технічного стану за наступними трьома групами параметрів:

- геометричні характеристики;
- наявність/відсутність дефектів типу порушення суцільності;
- фізико-механічні характеристики.

Визначення геометричних параметрів

Своєчасне виявлення та правильне визначення фактичних геометричних розмірів (величин зносу) в нафтогазовому обладнанні є однією із вимог забезпечення його безаварійної експлуатації, а прогнозування залишкового

ресурсу різних видів устаткування має здійснюватися з дійсної величини зносу та його характеру.

В нафтогазовій галузі найбільше поширення отримали ультразвукові методи контролювання цих характеристик.

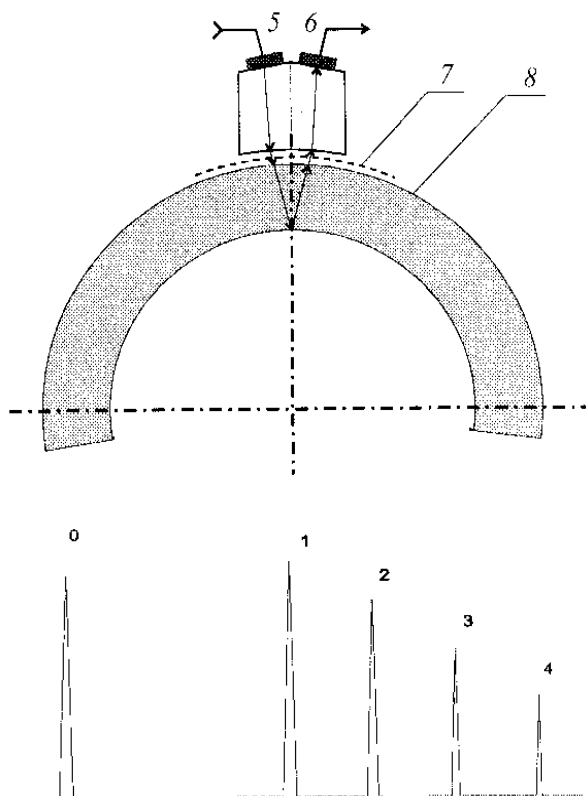
Зокрема, авторами вперше були досліджені способи, розроблені та впроваджені технічні засоби для вимірювання товщини стінки методом безперервного сканування [67]. Такі засоби можуть використовуватися в автоматизованих комплексах неруйнівного контролю. Сканування об'єкта контролю може відбуватися або по гвинтовій лінії, або по декількох твірних, використовуючи багатоканальну систему вимірювання. В якості інформативного параметра для оцінки технічного стану труб нафтогазового сортаменту за величиною зношення стінки вибрано екстремальні значення товщини стінки, тобто максимальне і мінімальне її значення в поперечному перерізі труби.

Схема вимірювання товщини стінки труби за вказаним способом наведена на рисунку 5.1. Якщо випромінювач 5 та приймач 6 роздільно-сумішеного перетворювача установлені на невеликій відстані від зовнішньої поверхні контрольованої труби, то на приймальному п'єзоперетворювачі 6, крім зондувального імпульсу з індексом 0 і імпульсу з індексом 1, відбитого від зовнішньої поверхні труби, спостерігається серія імпульсів з індексами 2, 3, 4, 5 і т. д., отриманих в результаті багаторазового відбивання УЗК в стінці труби.

Інтервал часу, який розділяє багатократно відбиті в стінці труби імпульси, а відповідно час зміщення кожного з них відносно імпульсу, відбитого від зовнішньої поверхні стінки труби, змінюється залежно від зміни товщини стінки труби. Тому, вимірюючи інтервал часу t між сусідніми імпульсами, можна тим самим вимірювати товщину стінки.

Проведені авторами дослідження показали, що найбільш надійним та достовірним є спосіб визначення товщини стінки труб за вимірним часовим інтервалом між імпульсами 1 і 2,

відбитими від зовнішньої та внутрішньої поверхонь стінки, за схемою акустичного тракту з роздільними приймачем та випромінювачем, які конструктивно об'єднані в один роздільно-суміщений п'єзоперетворювач.



0 – зондувальний імпульс; 1-4 – імпульси, відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби; 5 – випромінювач п'єзоелектричний; 6 – приймач п'єзоелектричний; 7 – контактна рідина; 8 – стінка труби

**Рисунок 5.1 - Схема проходження ультразвукових
коливань в тілі труби та зображення багаторазового
відбиття**

Використовуючи як інформативний параметр часовий інтервал між імпульсами 1 і 2, підвищується точність вимірювання, бо виключається вплив на результат вимірювання величини зазору між випромінюючою поверхнею п'єзоелектричного перетворювача і зовнішньою поверхнею контрольованої труби. Використання щільного способу створення акустичного контакту виключає прямий контакт перетворювача з об'єктом контролю, що особливо важливо при неперервному автоматизованому вимірюванні.

В останні роки наша увага була прикута до проблеми виявлення та оцінки ступеню корозійного пошкодження трубопроводів нафти та газу. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено та впроваджено ультразвуковий корозиметр-товщиномір КТУ-1 (рисунок 5.2), який призначений для визначення ступеня корозійного пошкодження поверхні з одночасним вимірюванням залишкової товщини матеріалу виробу як з плоскою так і з циліндричною поверхнею [215].



Рисунок 5.2 - Ультразвуковий корозиметр-товщиномір КТУ-1

В основу роботи приладу покладено принцип вимірювання часу розповсюдження ультразвукових коливань від перетворювача до поверхні (корозія на зовнішній стороні) і від зовнішньої до внутрішньої поверхні (залишкова товщина стінки) виробу, що контролюється, при русі перетворювача вздовж об'єкта контролю на фіксованому базовому рівні (рисунок 5.3).

Програмне забезпечення приладу КТУ-1 дає змогу проводити контроль виробів в режимі реального часу одночасно з переміщенням перетворювача вздовж поверхні контролю на екрані комп'ютера відображаються текучі значення ступеня корозійного пошкодження й залишкової товщини стінки (в міліметрах). Таким чином можна отримати зображення січення виробу вздовж лінії руху перетворювача.

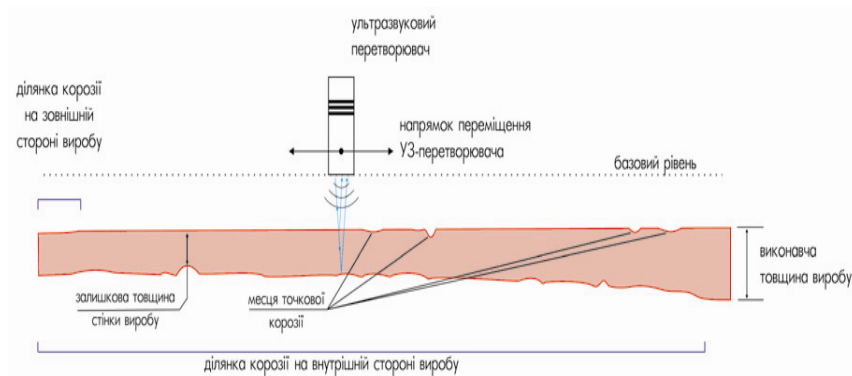


Рисунок 5.3 - Схема контролю товщини стінки, корозії приладом КТУ-1

Прилад оснащено стандартним інтерфейсом RS-232, який дає змогу підключати прилад як до настільного, так і до портативного комп'ютера, що особливо зручно при роботі в цехових або польових умовах, на борту судна або на крилі літака. Вбудована FLASH-пам'ять розширює сферу застосування приладу, оскільки дає можливість зберегти отримане при контролі сичення виробу й передати його на комп'ютер для наступної візуалізації в будь-який зручний для оператора час.

Програмне забезпечення, розраховане на використання в операційних системах Windows 95/98, Windows 2000/XP, що входить в комплект поставки приладу, дозволяє здійснювати зчитування результатів вимірювань з приладу, їх запис на жорсткий диск комп'ютера і підготовку для друку сторінки-звіту за результатами контролю (рисунок 5.4).

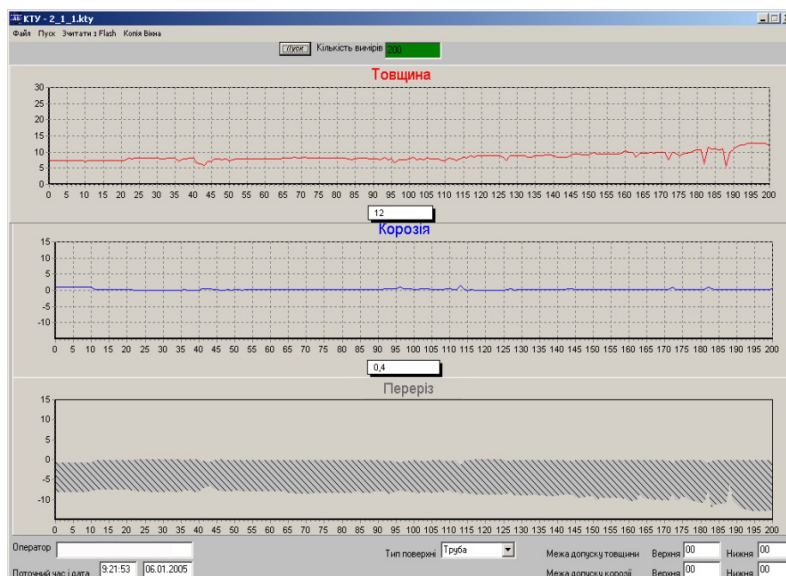


Рисунок 5.4 – Вікно програмного забезпечення приладу КТУ-1

Основні технічні характеристики КТУ-1: діапазон товщин, що контролюються 4-30мм, діапазон вимірювання глибини корозії 1-10 мм, абсолютна похибка вимірювання товщини не перевищує ± 0.3 мм, абсолютна похибка вимірювання глибини корозії ± 0.1 мм, максимальна швидкість сканування до 0.9 м/хв.

Проте, необхідність забезпечення якісного акустичного контакту між п'єзоп'єрторювачем та поверхнею об'єкта контролю за допомогою контактних рідин значно обмежує його застосування.

Принципове вирішення даного завдання може було знайдене шляхом використання безконтактного акустичного методу, що базується на використанні повітряного акустичного зв'язку [216].

Дослідно-експериментальна установка, що реалізує даний метод ультразвукового контролю БКТУ-2 (рисунок 5.5) являє собою ручний переносний прилад у металевому корпусі, до якого приєднуються акустичні перетворювачі та автоматичний сканер. Зв'язок БКТУ-2 з персональним комп'ютером здійснюється через інтерфейс USB.

Для забезпечення достовірності результатів контролю розроблено методику використання дослідно-експериментальної установки в промислових умовах [217].

Конструктивно ультразвуковий безконтактний перетворювач складається з корпусу, демпфера, корпусу резонатора, п'єзоелектричної пластини, виготовленої з титанату барію ТБК-3 діаметром 20мм, резонансна частота якої складає 1МГц, багат шарового узгоджувального шару та фіксувального кільця.

Демпфер, п'єзоелектрична та узгоджувальний шар склеюються між собою за допомогою епоксидної смоли і утворюють резонатор, що розміщується в корпусі резонатора. Резонатор кріпиться в корпусі перетворювача за допомогою фіксувального кільця.

Для проведення експериментальних випробувань було відібрано 12 сталевих зразків товщиною від 0,55мм до 9,53мм. Випробування проводились згідно з розробленою методикою. У ході проведених експериментальних досліджень встановлено, що приведена до діапазону (6,57мм) похибка вимірювань за допомогою удосконаленого безконтактного методу не перевищує 5,5% [218].

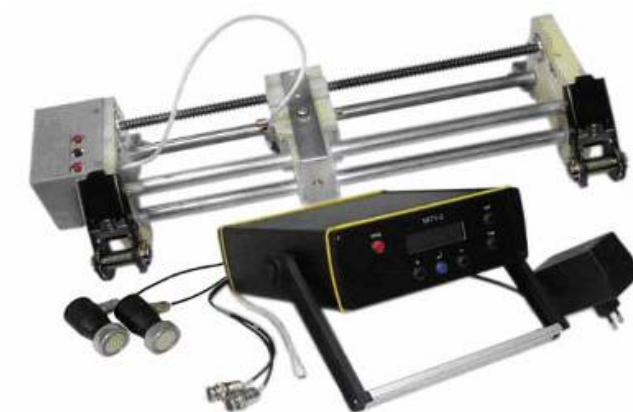


Рисунок 5.5 - Дослідна установка БКТУ-2

Промислову апробацію установки було виконано в умовах лабораторій НВФ «Зонд» та промислу Богородчанського ЛВУМГ.

6 ТЕХНОЛОГІЯ ДАЛЕКОДІЮЧОЇ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ АКУСТИЧНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ТРУБОПРОВІДІВ

6.1 Опис технології низькочастотної акустичної дефектоскопії трубопроводів

Тому важливе значення для забезпечення працездатності трубопроводів має постійний моніторинг їх технічного стану. Однак проводити моніторинг технічного стану трубопроводів звичайними методами НК досить складно, тому що трубопроводи перебувають в ізоляції під землею, деякі секції труб підняті над землею, окремі ділянки занурені у воду, перебувають у рукавах під залізничними й іншими переходами. Тому в наш час діагностика трубопроводів в основній своїй масі вимушено базується на поняттях і критеріях дефектності металу як зварного шва, так і труби, щоб мати хоч які-небудь, нехай і непрямі, оцінки поточного технічного стану трубопровідних систем загалом [219-224].

Істотним прогресом у розвитку методів контролю технічного стану трубопроводів є розроблення новітньої технології й систем дистанційної акустичної дефектоскопії трубопроводів із використанням методу далекодійного низькочастотного ультразвукового контролю (НЧ УЗК) спрямованими хвилями. Найбільший розвиток така технологія контролю трубопроводів різного призначення одержала в середині 1990 років в Англії, США, а потім у Японії. Значною перевагою цього методу перед традиційними методами УЗК є те, що він може бути використаний як для експрес-контролю технічного стану трубопроводів різного призначення після їх монтажу шляхом формування первісної дефектограми трубопроводу, так і для наступного моніторингу й створення інформаційної бази для розрахунку експлуатаційного ресурсу трубопроводів.

Метод НЧ УЗК ґрунтується на збудженні в контрольованому трубопроводі низькочастотних ультразвукових коливань з однієї точки акустичного блока на трубопроводі. Акустичні блоки створюються на основі різних типів випромінювачів: п'єзоелектричних, магнітострикційних і електромагнітоакустичних перетворювачів [225]. Найчастіше для діагностики трубопровідних систем використовуються акустичні антени на основі п'єзоелектричних перетворювачів, що використовуються як для збудження УЗК у трубопроводі, так і для приймання відбитих луно-сигналів. Принцип збудження НЧ УЗ хвиль і їх відбиття від несуцільностей і кінця труби наведено на рисунку 6.1.

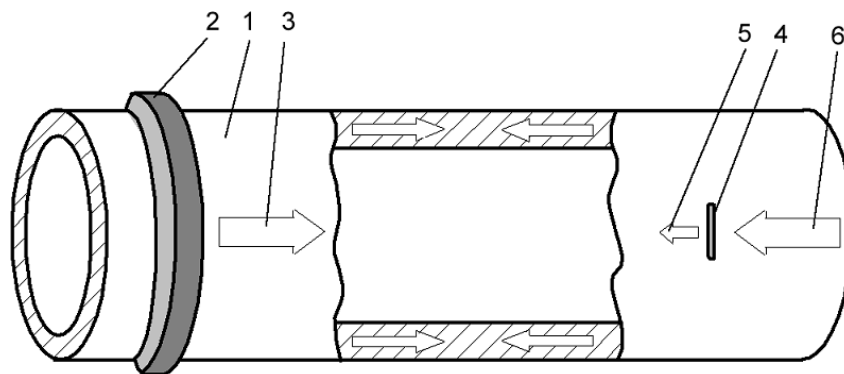


Рисунок 6.1 - Принцип збудження й відбиття низькочастотних ультразвукових хвиль від несуцільностей і кінця труби

Під час проведення діагностики технічного стану трубопроводів НЧ УЗ спрямованими хвилями на трубі 1 встановлюється акустична антена 2 у вигляді кільця п'єзоперетворювачів. Перетворювачі рівномірно розташовуються по еквідистанті до поверхні труби з однаковим кроком для створення по всьому поперечному перерізу труби рівномірної характеристики спрямованості

збуджуваної кільцевої хвилі 3 НЧ УЗК. Під час зустрічі спрямованою хвилею якого-небудь відбивача 4, зумовленого, наприклад, зміною поперечного перерізу стінки труби, частина акустичної хвилі 5 відбивається назад до п'єзоперетворювача. Інша частина хвилі проходить по трубі, а потім хвиля 6 повністю відбивається від кінця труби.

Адаптація адекватної технології ультразвукової діагностики й моніторингу технічного стану трубопроводів, яким є метод далекодіючого НЧ УЗК спрямованими хвилями, має велике значення для зниження втрат потенційно небезпечних продуктів, що транспортуються цими трубопроводами. У зв'язку зі збільшенням обсягу продуктів, що транспортуються, потреба в такому добротному контролі буде згодом тільки зростати [226]. Великою перевагою НЧ УЗК спрямованими хвилями є можливість 100 % охоплення контролю стінок труб по всій довжині ділянки трубопроводу, що діагностується.

6.2 Особливості поширення низькочастотних спрямованих хвиль у трубопроводах

Термін «спрямована хвиля» означає ультразвукову низькочастотну хвилю, що поширюється на довжині стержнів, пластин і труб з однаковою формою поперечного перерізу в певному напрямку.

У загальному випадку спрямовану хвилю можна визначити як хвильовий рух, що поширюється в межах границь поверхонь по перерізу стержнів, пластин та труб.

Відмінною рисою хвильового руху є поширення енергії, причому в процесі коливань енергія періодично переходить із потенційної в кінетичну й назад. Однак, оскільки кожна частка середовища коливається щодо свого положення рівноваги, у хвильовому процесі має місце перенесення енергії без перенесення речовини [227].

Спрямовані хвилі в трубах можуть бути поздовжніми, зігнутими й крутильними (торсіонними). Всі ці типи хвиль у трубах поширюються з різною швидкістю. Достовірні значення швидкості ультразвукових хвиль в обсязі металу одержують тільки експериментальним шляхом. Швидкість спрямованих хвиль залежить від діаметра труби, товщини стінки, властивостей матеріалу, частоти й т.д. При цьому утворюються моди всіх хвиль, характерною рисою яких є дисперсність, тобто залежність швидкостей поширення хвиль від частоти збуджуваних коливань [228]. Тому, залежно від геометрії й матеріалу досліджуваного об'єкта, поведження спрямованих хвиль під час їх поширення буде принципово різним. Наявність дисперсності спрямованих хвиль спричиняє необхідність відрізняти фазові швидкості (швидкості руху фаз) від групових (швидкостей переміщення енергії).

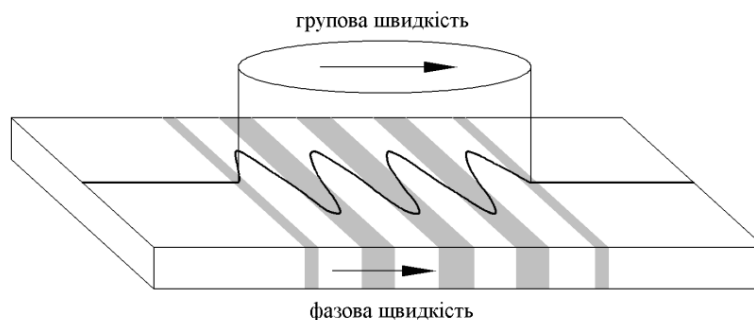


Рисунок 6.2 - Спрощене подання фазової й групової швидкостей ультразвуку, що поширюється в пластині

На рисунку 6.2 зображено спрощене подання фазової й групової швидкості хвилі ультразвуку, що поширюється в пластині. Рисунок уздовж поздовжньої лінії на бічній грані пластини - це фази стану середовища під час стискання й розтягання середовища. Фазова швидкість - це швидкість

переміщення фази станів часток середовища, з якою переміщається в просторі фаза плоскої монохроматичної хвилі $y = A \sin \varphi$. Тут A – амплітуда, $\varphi = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$ – фаза хвилі (λ – довжина хвилі, x – відстань від джерела хвилі, T – період коливань, t – час). Якщо фаза $\varphi = \text{const}$, то фазова швидкість $v = \frac{\lambda}{T}$.

Для характеристики монохроматичної (сінусоїдальної) хвилі використовується також поняття хвильового числа:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}, \quad (6.1)$$

де ω – кругова частота хвилі.

Кругла пляма на рисунку – це хвильовий пакет, у який під час поширення передається енергія хвилі. Швидкість переміщення круглих ділянок є груповою швидкістю u . Групова швидкість $u = dx/dt = d\omega/dk$ та придатна для опису перенесення енергії (передачі сигналу). Зв'язок між груповою й фазовою швидкостями хвиль має вигляд:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (6.2)$$

У недисперсному середовищі $dv/dx=0$ і групова швидкість дорівнює фазовій. Тому швидкість поширення фази й хвильового пакета не розділяють і називають швидкістю звуку. Якщо ж уважно подивитися на круглі зони розповсюджувальної хвилі звичайного ультразвуку, то стане зовсім очевидно, що рисунок усередині зони не змінюється. Не змінюється також форма переданого сигналу й сигналу, прийнятого в точці, що перебуває на певній відстані.

Що ж стосується спрямованих хвиль, то тут має місце значна різниця між фазовими й груповими швидкостями. Наприклад, якщо фазова швидкість більше групової, то

рисунок усередині круглої плями буде як би просуватися усередині кола вперед, а якщо фазова швидкість менша групової, то як би назад. У результаті прийнятий сигнал здобуває форму, відмінну від форми переданого сигналу. У дійсності спрямовані хвилі поширюються з різною фазовою й груповою швидкістю. Тому дисперсність найчастіше спричиняє таке поширення, за якого кругла зона буде ніби розсовуватися, витягаючись уперед і втягуючись назад. Окрім того, у випадку спрямованої хвилі виникає безліч мод. Для інтерпретації сигналів від несучильностей у трубах необхідно використовувати хвильові моди, що дають можливість ідентифікувати сигнали від дефектів.

Можна побудувати дисперсійні діаграми залежностей фазової й групової швидкості від частоти для різних мод спрямованих хвиль. Хоч дисперсійна крива фазової швидкості щонайкраще ілюструє теорію спрямованих хвиль, у неруйнівному контролі спрямованими хвилями до безпосереднього застосування дисперсійних кривих фазових швидкостей прибігають у рідких випадках. Дисперсійні криві групових швидкостей виражають швидкість спостережуваного хвильового пакета. Ці криві використовують для підтвердження наявності відбитого луно-сигналу від неоднорідності в трубопроводі по хвильовому пакету.

На рисунку 6.3 зображено криві залежності групових швидкостей від частоти різних мод спрямованих хвиль у трубах. Моди спрямованих хвиль традиційно для зручності називають T -, L - і F -модами від слів *torsional*, *longitudinal* і *flexural*, відповідно. Додатково їх прийнято позначати буквами n і m , наприклад, $T(n,m)$, щоб підкреслити розходження в розподілі зсувів мод (тобто по окружності труби або по товщині стінки). Під час вивчення розподілу зсувів кожної моди букви T , L і F означають тільки крутильний, поздовжній і зігнутий тип коливання, відповідно.

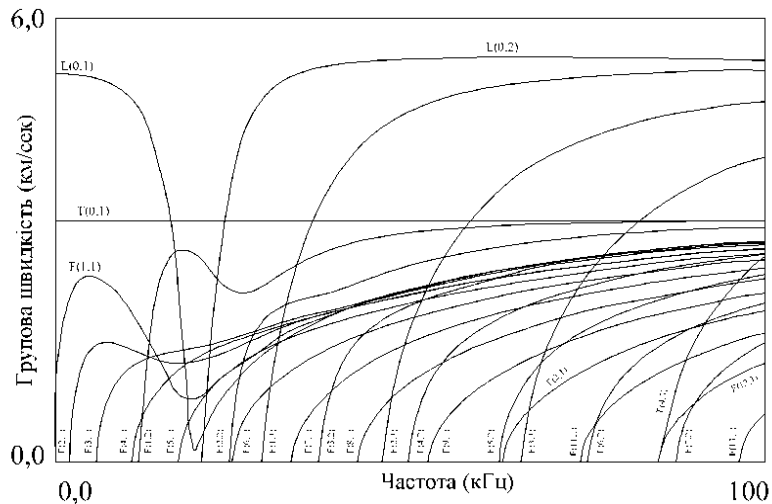


Рисунок 6.3 - Залежності групових швидкостей від частоти різних мод спрямованих хвиль у трубопроводах

Криві ілюструють наявність дисперсності L - і F -мод спрямованих хвиль, що відноситься до однієї з основних характеристик поширення спрямованих хвиль і викликає чимало ускладнень в процесі виконання неруйнівного контролю. Під час роботи в діапазоні низьких частот з високою дисперсністю складно аналізувати форму відбитого сигналу, тому прагнуть використовувати зону відсутності дисперсності. За дисперсійною діаграмою визначають існування мод хвиль з різною швидкістю звуку навіть на одній частоті.

Для якісного виявлення дефектів трубопроводів спрямованими хвилями необхідно вибирати недисперсійну моду спрямованої хвилі й мінімізувати амплітуди всіх інших небажаних мод для того, щоб можна було бачити відповідні сигнали від неоднорідностей і підвищити відношення сигнал - шум. Для цього необхідно працювати в частотному діапазоні, де моди хвиль, таких як $L(0,1)$ і $L(0,2)$ не розсіюються, тобто

їх швидкості не залежать від частоти, і вони не нижчі теоретичної частоти від перетину для більш високих хвильових мод. Для товщин матеріалів, використовуваних у нафто- і газопроводах варто використовувати частоти в діапазоні десятка кГц. Найбільш прийнятною модою є поздовжня мода $L(0,2)$, що швидко рухається і швидкість якої не залежить від частоти в діапазоні частот вище 20 кГц. Також корисно використовувати той факт, що в цьому діапазоні частот мода $L(0,2)$ симетрична вісі.

Під час розповсюдження по перетину труби спрямована хвиля поздовжньої моди L_0 в зоні мінімальної дисперсії викликає поздовжні деформації труби, які є однорідними по перетину труби і являють собою прості розтягання і стиснення у вигляді зсуву часток середовища в кожній довільній точці усередині стінки труби уздовж її поздовжньої вісі z та невеликими поперечними зміщеннями [229].

Поздовжні деформації у вигляді зсуву часток середовища труби під час розповсюдження спрямованої хвилі поздовжньої моди зображено на рисунок 6.4,а.

Крутильні хвилі з модою $T(0,1)$ нульового порядку, у яких поперечні перерізи труби повертаються як ціле на деякий кут щодо поздовжньої осі, характеризуються рівністю фазової й групової швидкостей та не мають дисперсності. Під час розповсюдження по перетину труби спрямована хвиля крутильної моди T_0 , що є аналогом поперечної хвилі в пластинах, викликає тільки одну азимутальну компоненту зміщення часток середовища труби симетрично відносно вісі z , тобто представляє собою обертання поперечного перетину труби як цілого на деякий кут відносно вісі z . Азимутальну компоненту зміщення часток середовища труби під час розповсюдження спрямованої хвилі крутильної моди зображено на рис. 6.5,б.

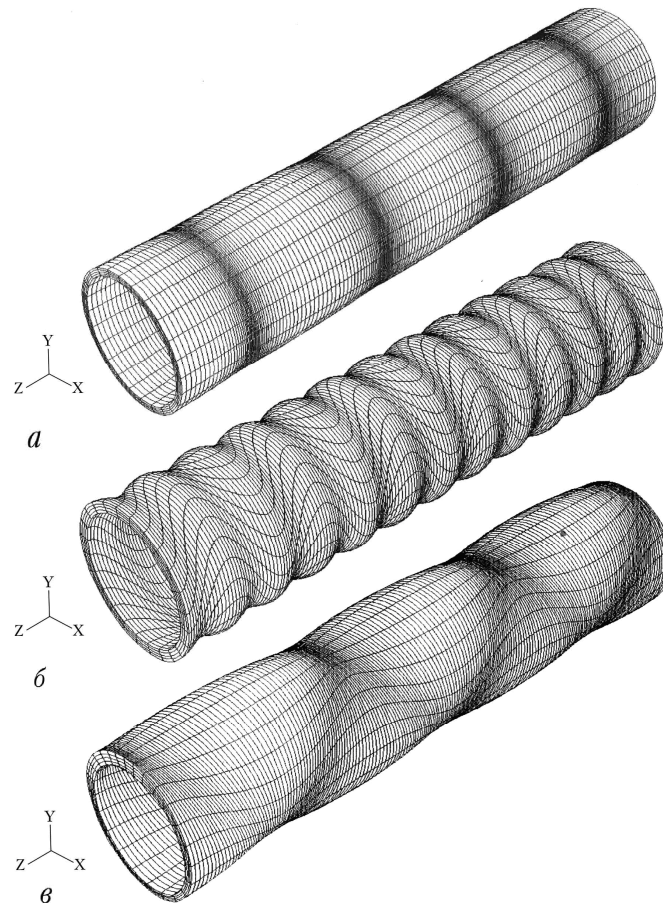


Рисунок 6.4 - Представлення про розподіл зміщення часток середовища труби під час поширення поздовжньої (а), крутильної (б) мод нульового порядку та згинної моди (в) першого порядку

Хоч направлені хвилі крутильної моди поширюються в трубі з меншою швидкістю, вони мають більш високу чутливість до поверхневих й підповерхневих неоднорідностей порівняно з поздовжньою хвилею. Відсутність дисперсії й

низька швидкість крутильної хвилі дають змогу зменшити мертву зону й покращити роздільну здатність. Крутильна хвиля обов'язково проявляється від нульової частоти зі швидкістю поперечних хвиль, існує на будь-якій частоті за постійної швидкості поперечних хвиль і є вісесиметричною «скрученою» модою.

Спрямовані хвилі згинної моди, що поширюються в трубах, мають ненульовий порядок (перший та вище). Під час поширення згинної моди ненульового порядку по перетину труби її поздовжня вісь зазнає змін і тому переважає поперечна компонента зміщення часток середовища труби. Згинна мода спрямованої хвилі характеризується складним розподіленням зміщення часток середовища труби (з вузлами та пучкостями) по її поперечному перерізу та сильною залежністю фазової і групової швидкостей від діаметра труби та величини поперечних зміщень часток середовища. Розподіл зміщень часток середовища труби спрямованої хвилі згинної моди першого порядку зображено на рисунку 6.4,в.

Із залежностей групових швидкостей спрямованих хвиль різних мод (рисунку 6.3) видно, що існує група згинних хвиль [$F(1.3)$, $F(2.3)$, $F(3.3)$], групові швидкості яких в полосі високих частот наближуються до швидкості поздовжньої моди $L(0.2)$, але не перевищують її. Розподіл зсувів під час наближення до швидкості поздовжньої хвилі свідчить про поздовжній тип коливань. Моди цих згинних хвиль з максимальною груповою швидкістю є вісесиметричними, а з підвищенням порядку n їх групові швидкості знижуються небагато. Решта згинні моди хвиль несиметричні і тому їх потрібно обмежувати шляхом створення симетричних систем збудження та приймання спрямованих хвиль по діаметру труби [230].

На рисунку 6.5 зображено схему зсуву часток середовища по окружності труби залежно від параметра й мод спрямованих хвиль. За умови значення $n = 0$ хвилі є вісесиметричними. Зсув

часток труби для L - і F -мод проходить по окружності лицьовою поверхнею із зовнішнього боку. Щодо зсувів часток по лицьовій поверхні із внутрішнього боку, то коливання будуть асиметричними щодо зсуву із зовнішнього боку, якщо параметр m моди має непарне значення, і симетричними, якщо він має парне значення. За відсутності зсуву часток по окружності по лицьовій поверхні із зовнішнього й внутрішнього боків труби для спрямованої хвилі T -моди число вузлів зсуву часток у тілі труби виражається числом $2n$.

Теоретично зсув часток середовища в кожній довільній точці усередині стінки трубопроводу можна виразити накладенням порядкових мод спрямованих хвиль, позначених nm , і записати формулою наступного виду:

$$u_x = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=1}^{+\infty} A_{x_{nm}} N_{x_{nm}}(r) \exp(in\varphi - i\zeta_{nm}z) \exp(-i\omega t), \quad (6.3)$$

де: u_x - зсув часток у певному напрямку ($x = r, \varphi, z$); r - радіальна координата; φ - окружна координата (кут у радіанах); z - відстань уздовж осі протяжного об'єкта; $A_{x_{nm}}$ - амплітуда спрямованої хвилі nm ; $N_{x_{nm}}$ - функція розподілу в напрямку r ; ζ_{nm} - хвильове число моди nm ; $i = 1, 2, 3 \dots$; ω - кругова частота збуджуваної хвилі; t - час.

Наведений вираз (6.3) відомий як теоретична формула для опису спрямованої хвилі. Порядок кожної моди n і m у формулі (6.3) відповідає позначенням мод n і m на рисунку 6.3 і використовується для всіх мод $L(n,m)$, $F(n,m)$ і $T(n,m)$. Спосіб розкладання за формулою (6.1) прийнято називати «розкладанням нормальної моди» (розкладанням власних коливань), тому що в цьому випадку застосовується нормальна функція.

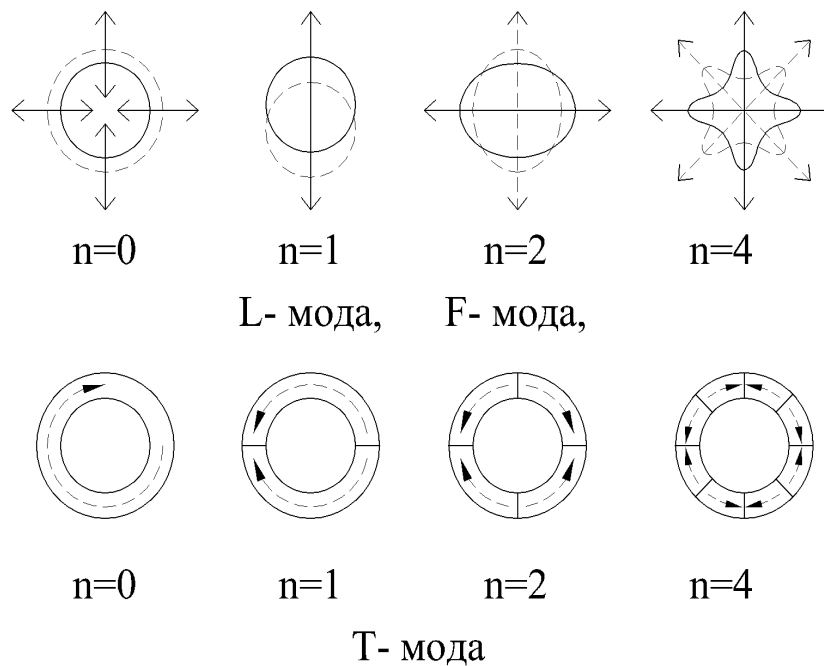


Рисунок 6.5 - Схема зсуву часток середовища по окружності труби залежно від параметра й мод спрямованих хвиль

У формулі (6.3) значення $N_{x_{nm}}$ і ζ_{nm} можна одержати, знаючи діаметр трубопроводу, товщину стінки труби й властивості металу. Амплітуду $A_{x_{nm}}$ можна одержати, визначивши режим збудження коливань (сигналу).

Під час вибору частоти й моди спрямованої хвилі в трубопроводах необхідно враховувати, що спрямована хвиля є результатом взаємодії вібрацій, створюваних перетворювачем, з поверхнею труби. Оскільки товщина стінки досліджуваної труби може змінюватися, то для попереднього вибору робочої частоти користуються добутком частоти на товщину стінки

труби ($f \times t$). Як вихідне для розрахунку робочої частоти спрямованих хвиль використовується співвідношення $f \times t \approx 1$ мм·МГц. Досить істотним чинником, що визначає ефективність передачі енергії від п'єзоперетворювачів акустичної антени в тіло трубопроводу, є узгодження внутрішніх опорів перетворювача й навантаження, що визначається якістю сухого акустичного контакту в системі «п'єзоперетворювач – трубопровід».

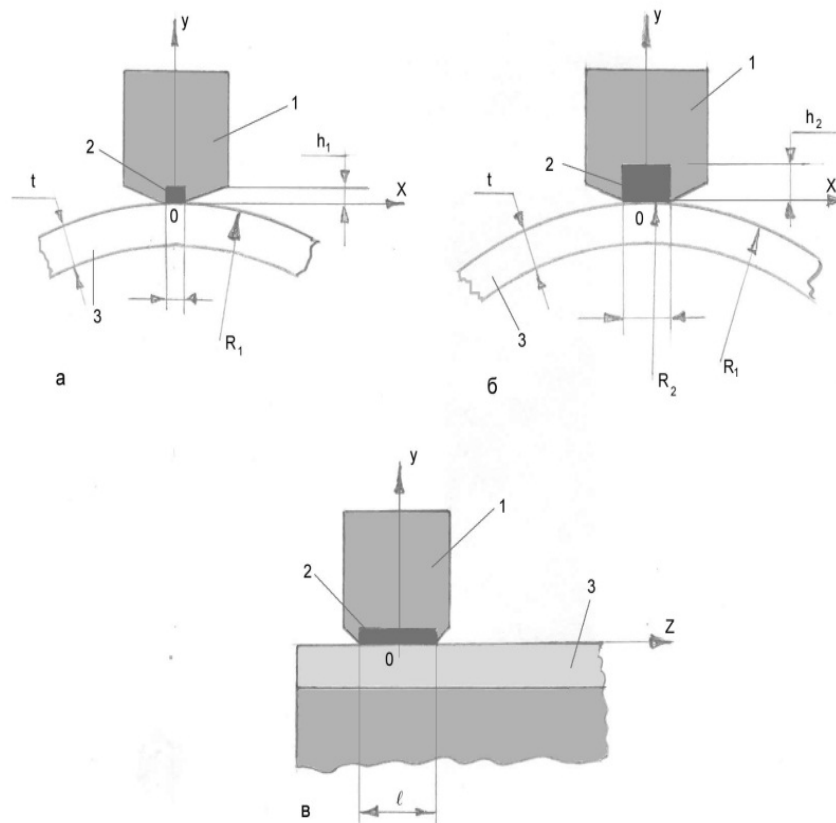
6.3 Сухий контакт у технології акустичної дефектоскопії трубопроводів

У технології ультразвукової дефектоскопії трубопроводів використовуються пружні коливання ультразвукових хвиль низької частоти в діапазоні частот до 100-120 кГц. У зв'язку з цим технологія акустичної дефектоскопії трубопроводів відрізняється від традиційних ультразвукових методів неруйнівного контролю фізичними принципами й експлуатаційними можливостями. Сюди відноситься, насамперед, сухий акустичний контакт, що забезпечує з'єднання між електроакустичним і акустичним трактами дефектоскопа, тобто з'єднання робочої поверхні електроакустичного перетворювача з поверхнею труби для передачі акустичної енергії між ними в системі «перетворювач – трубопровід» [231].

У даному випадку акустичний контакт в системі «перетворювач – трубопровід» здійснюється без застосування додаткових змочувальних матеріалів, а з використанням додаткової постійної статичної сили притискання поверхні перетворювача до поверхні труби. При цьому використовуються перетворювачі з одним п'єзоелементом, що призначений для збудження імпульсних пружних поздовжніх або поперечних коливань, які через сухий контакт у системі «перетворювач – трубопровід» формують у стінці труби

спрямовані хвилі відповідно поздовжньої й крутильної мод. Прийом відбитих сигналів від несучільностей у трубопроводі здійснюється тим же п'єзоелементом перетворювача. На рисунку 6.6 наведені види контакту в системі «перетворювач – трубопровід».

Сухий контакт перетворювача з поверхнею труби (рисунок 6.6,а) здійснюється безпосередньо поверхнею п'єзоелемента і відбувається по утворюючій труби на довжині $l = 12$ мм (рисунок 6.6,в). Ширина п'єзоелемента $a = 3$ мм, товщина становить $h = 2$ мм. Площа робочої зони контакту залежить від діаметра труби й може становити одиниці або десятки міліметрів. П'єзоелемент по ширині захищений двома алюмінієвими пластинами товщиною близько 1 мм. Корпус перетворювача виконаний з нержавіючої сталі. Перетворювач заповнений демпферним матеріалом з великим коефіцієнтом затухання, що дозволяє зменшити резонансну частоту п'єзоелемента з 2 МГц до 40 кГц. За допомогою п'єзоелемента збуджуються коливання поперечних хвиль по розкриву п'єзоелемента на 12 мм, які спрямовані по зовнішній окружності труби. Коливання поперечних хвиль перетворюються в крутильну хвилю моди $T(0,1)$ нульового порядку й поширюються по перерізу труби. Сухий контакт поверхні аналогічних п'єзоперетворювачів з поверхнею труби використовується в системі *Teletest*, що представляє собою технологію дистанційного ультразвукового контролю низькочастотними спрямованими хвилями трубопроводів переважно в нафтогазовій і хімічній промисловості. У системі *Wavemaker G3*, призначеної також для діагностики технічного стану трубопроводів, сухий контакт поверхні п'єзоелемента із трубою відбувається по утворюючій труби на довжині $l = 13$ мм [229].



1 – демпфер; 2 – п'єзоелемент; 3 – труба; R_1 – зовнішній радіус труби; R_2 – радіус п'єзоелемента

Рисунок 6.6 - Види контакту в системі «перетворювач - трубопровід»

Новий тип перетворювача, наведений на рисунок 6.6,б. Сухий контакт у системі «перетворювач – труба» здійснюється по утворюючій труби безпосередньо площиною п'єзоелемента на довжині $l = 12,5$ мм (рисунок 6.6,в). При цьому п'єзоелемент проходить попередню обробку для одержання певної опуклої форми, що

відповідає зовнішній поверхні труби. Ширина п'єзоелемента $a = 8$ мм, товщина $h = 4,5$ мм. Площа робочої зони контакту при цьому може становити кілька десятків квадратних міліметрів. П'єзоелемент містить верхню й нижню п'єзопластини, які поляризовані по напрямку товщини п'єзоелемента. При подачі збуджувального сигналу верхня й нижня п'єзопластини вібрують у протилежному напрямку, у результаті чого виникає деформація зрушення по напрямку уздовж окружності труби й збуджується спрямована хвиля крутильної моди $T(0,1)$.

Вид зони контакту розглянутих перетворювачів з поверхнею труби залежить від форми контактної поверхні перетворювачів. Наведений на рисунок 6.6,а вид контакту перетворювача з поверхнею труби варто розглядати як контакт площини п'єзоелемента із циліндричною поверхнею труби радіуса R_1 . У цьому випадку зона контакту буде представляти еліпс, витягнутий уздовж утворюючої труби у вигляді смужки, обмеженої паралельними прямими. Вид контакту п'єзоперетворювача з поверхнею труби (рисунок 6.6,б) являє собою контакт двох циліндричних поверхонь із радіусами R_1 і R_2 , з яких радіус R_2 має негативне значення. У цьому випадку зона контакту буде еліпсоїдом також витягнутим уздовж утворюючої труби [232].

Основною умовою сухого акустичного контакту, що забезпечує якість з'єднання перетворювача з поверхнею труби в акустичній дефектоскопії, є наявність зусилля притиску робочої поверхні перетворювача до поверхні труби шляхом додаткової постійної статичної сили. Постійна сила є розподіленою, що прикладається безупинно на протязі деякої довжини або площі поверхні труби. Відомо, що якщо постійна сила прикладається до якого-небудь пружного або твердого тіла за посередництвом деякого іншого пружного або твердого тіла, то подібна задача в більшості випадків є контактною задачею теорії пружності.

Теорія контактних задач знаходить широке застосування в машинобудуванні. Відомо, що передача зусиль у машинах супроводжується контактуванням деталей, які в більшості випадків розглядаються як пружні тіла. На основі теорії контактних задач у машинобудуванні розробляються питання контактної піддатливості під дією статичної сили, коли необхідно брати до уваги деформацію нерівностей, що перебувають на поверхні твердого тіла. Однак питання теорії контактних задач вирішені в основному тільки для тіл правильної форми, що володіють ідеальними властивостями. Складність задачі пов'язана з різноманіттям форми нерівностей, різною висотою виступів, неоднаковими умовами їхньої взаємодії при контакті, фізико-механічними властивостями матеріалів, пружно-пластичним характером деформацій і т.д.

Уперше положення контактної задачі теорії пружності були використані в неруйнівному контролі у зв'язку з розвитком методів низькочастотної дефектоскопії на основі сухого точкового контакту наконечника перетворювача зі сферичною контактною поверхнею при його притисненні до поверхні багатоплощинної конструкції постійною зосередженою силою. Сухий контакт у наш час одержав також поширення у зв'язку з розвитком методу далекодіючого ультразвукового контролю протяжних об'єктів низькочастотними спрямованими хвилями [233].

Базою для вивчення явищ у зоні контакту тіл є теорія деформації двох пружних тіл, що вперше була вирішена Г.Герцом. Розроблена ним теорія контактних деформацій розглядає два випадки контакту двох тіл з ідеальними поверхнями: перший, коли первісний контакт визначається в точці, і другий, коли початковий контакт здійснюється по лінії. Задача вирішується в припущенні, що контактуючі тіла є однорідними й ізотропними, у зоні контакту мають місце тільки пружні деформації, сили тиску нормальні до поверхні торкання й розміри площадки контакту малі в порівнянні з

розмірами контактуючих тіл. Суть контактної задачі, сформульованої Г.Герцом, полягає в тому, що якщо обоє тіл притиснуті друг до друга нормальною зосередженою силою F_0 , то внаслідок виникаючих у них пружних деформацій вони будуть стикатися по деякій частині своїх поверхонь біля деякої точки контакту. Загальну частину поверхні обох тіл прийнято називати поверхнею тиску, а її контур - контуром тиску.

Відповідно до теоретичних досліджень Герца загальна постановка й рішення контактної задачі теорії пружності полягає в наступному: задаються рівняння поверхонь двох дотичних тіл залежно від їхньої форми, фізичні постійні тіл (коефіцієнти пружності) і сила, що стискає тіла.

Потрібно визначити:

- форму й величину поверхні тиску;
- зближення тіл під дією стискаючої сили;
- переміщення й напруги матеріалу в різних точках зони контакту обох тіл.

Герц установив, що форма поверхні тиску (площинки контакту) у загальному випадку є еліпсом, що переходить у граничних випадках у коло або смугу, обмежену паралельними прямими. Перший граничний випадок має місце для двох тіл, обмежених сферичними поверхнями, для сфери й площини або двох однакових циліндрів із взаємно перпендикулярними осями. Другий випадок здійснюється при контактуванні двох циліндрів, осі яких паралельні. Тому при аналізі різних варіантів контакту двох пружних тіл рішення контактної задачі теорії пружності зводиться до визначення розмірів площадки контакту (радіуса кола, півосей еліпса, ширини й довжини прямокутної смуги), величини зближення двох тіл, розподілу тиску по поверхні площадки тиску.

Герц показав, що напруги на площадці зіткнення паралельні вертикальній осі (осі z) і розподіляються за наступним законом, що представляє собою рівняння еліпса:

$$q(x, y) = q_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (6.4)$$

де a - більша піввісь еліпса, спрямована по осі x ; b - мала піввісь еліпса, спрямована по осі y ; q_0 - напруга в центрі площадки зіткнення двох тел.

Для точок на контурі поверхні зіткнення, де $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$,

$q(x, y) = 0$, а в центрі контуру, де $x = y = 0$, $q(x, y) = q_0$.

Теоретичні роботи Герца, будучи лише першим кроком у вивченні контакту пружних тіл, одержали подальший розвиток у наступних роботах і особливо були піддані всебічному експериментальному дослідженню А.М. Динником, яким глибоко й оригінально викладена контактна задача, досліджене питання про напружений стан при контактному стиску в точках, що перебувають у районі місцевого стиску. Він обчислив компоненти напруги, дав аналіз головних напруг і вперше встановив, що найбільші дотичні напруги досягають максимуму на деякій глибині під поверхнею. У своїх дослідженнях контактної задачі А.М. Динник перейшов до рішення принципово відмінного завдання від зіткнення двох тіл у точці. Він вирішив задачу торкання пружних тіл, обмежених поверхнями сферичною, циліндричною й площинною, коли ці поверхні мають кінцеві розміри й за умови, що поверхня їхнього зіткнення мала в порівнянні з розмірами тіл [228].

Викладемо коротко підхід до рішення контактної задачі для випадку зіткнення двох пружних тіл з ідеально гладкими сферичними поверхнями. Для цього скористаємося зображенням задачі про контакт двох пружних тіл у вигляді їхнього розрізу через обидві поверхні поблизу точки дотику O (рисунок 6.7), що не є особливою точкою їхньої поверхні. У цій точці обидві поверхні мають загальну дотичну площину x ,

у. Проаналізуємо механізм зближення двох пружних тіл зі сферичними поверхнями.

Припустимо, що радіуси кривизни R_1 й R_2 обох тіл (I і II), що входять у зіткнення, великі в порівнянні з розмірами площадки контакту, що дозволяє розглядати кожне із цих тіл як пружний півпростір. Помістимо початок координат у точці O первісного торкання двох тіл. Позитивний напрямок осі z прийнято вважати різним для обох тіл, – для кожного з них відлік координати здійснюється в напрямку в глиб тіла, позначаючи її відповідно як z_1 і z_2 . Рівняння поверхонь, що обмежують кожне з тіл, мають вигляд

$$z_1 = f_1(x, y); \quad z_2 = f_2(x, y). \quad (6.5)$$

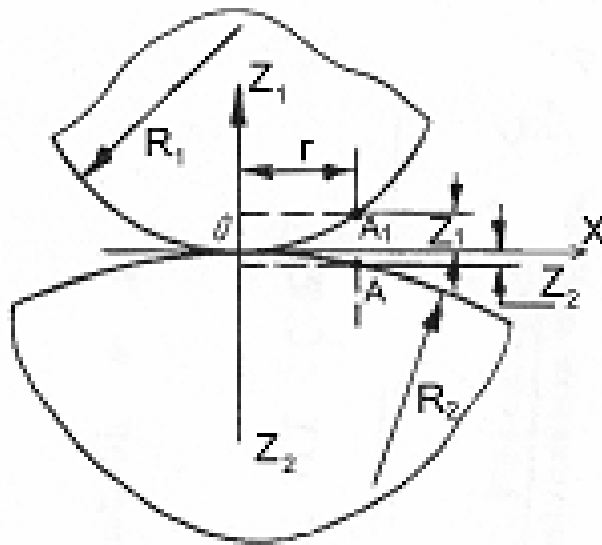


Рисунок 6.7 - Зображення задачі про контакт двох пружних тіл зі сферичними поверхнями у вигляді розрізу

Виділимо поблизу точки O на поверхні тіла I точку A_1 , а на тілі II точку A_2 із загальними координатами x, y . Поки між

точками A_1 і A_2 не діє тиск, ми маємо торкання тіл в одній точці O . При цьому відстань між ними до деформації дорівнює $z_1 + z_2$. При стиску під дією зосередженої сили F_0 точки A_1 і A_2 спочатку зближуються до збігу, а далі на цьому місці починається вдавнення одного тіла в інше. Тому що тіла стискаються уздовж нормалі в крапці O зосередженою силою F_0 , то в точці контакту виникають місцеві деформації, що приводять до контакту по деякій малій поверхні. Наведене просторове подання задачі про контакт двох тіл зі сферичними поверхнями (рисунок 6.8) показує, що їхня площадка контакту являє собою коло діаметром $2a$.

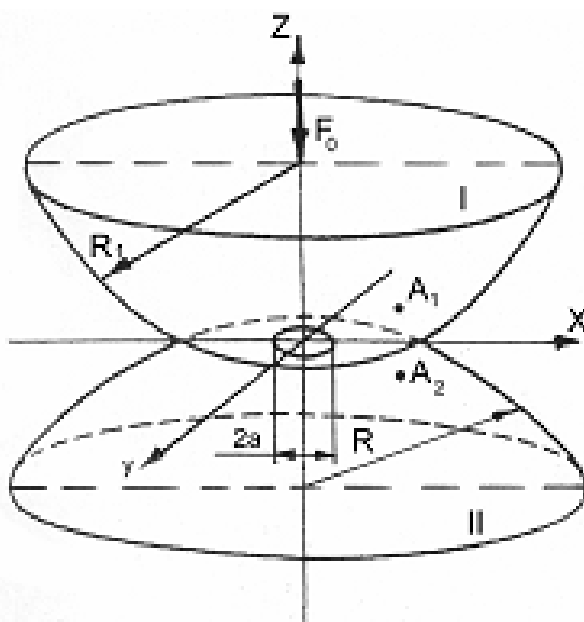


Рисунок 6.8 – Просторове подання задачі про контакт двох пружних тіл зі сферичними поверхнями

Позначимо через ω_1 переміщення, викликане місцевою деформацією точки A_1 у напрямку z_1 поверхні верхньої сфери, а через ω_2 – таке ж переміщення в напрямку z_2 для точки A_2

нижні сфери. Вважається, що в процесі місцевого стиску площина торкання в точці 0 залишається нерухливою, а будь-які дві точки тіл, що розташовані на осях z_1 і z_2 на досить великій відстані від точки 0 , зближуються один з одним на деяку величину α під дією сили F_0 . Тоді для кожної пари відповідних дотичних точок у всіх точках області зіткнення тіл (усередині поверхні тиску) має місце рівність

$$z_1 + z_2 + \omega_1 + \omega_2 = \alpha. \quad (6.6)$$

У точках же поза цією областю, де обидві поверхні не стикаються, має місце нерівність

$$z_1 + z_2 + \omega_1 + \omega_2 > \alpha. \quad (6.7)$$

Відстань між точками A_1 і A_2 при стиску тіл буде поступово зменшуватися на величину $\alpha - (\omega_1 + \omega_2)$. Якщо внаслідок місцевого стиску точки A_1 і A_2 увійдуть в область контакту, то вираз (6.4) буде мати вигляд

$$\alpha - (\omega_1 + \omega_2) = z_1 + z_2. \quad (6.8)$$

Відповідно до виразу (6.5) відстані z_1 і z_2 від площини, дотичної в точці 0_1 до точок A_1 і A_2 є рівняннями поверхонь, що обмежують кожне з тіл. Тоді ці відстані до точок A_1 і A_2 , розташованих на меридіальному перетині кожної сфери й перебувають на малій відстані r (у порівнянні з R_1 і R_2) від осей z_1 і z_2 , можна з достатньою точністю представити формулами

$$f_1(x, y) = z_1 = \frac{r^2}{2R_1}; \quad f_2(x, y) = z_2 = \frac{r^2}{2R_2}. \quad (6.9)$$

Взаємна відстань між точками A_1 і A_2 буде дорівнювати

$$z_1 + z_2 = r^2 \left(\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2} \right) = \frac{r^2 (R_1 + R_2)}{2R_1 R_2}. \quad (6.10)$$

Перетворюючи вираз (6.8) щодо суми переміщень точок A_1 і A_2 при стиску двох тіл і підставляючи в нього значення z_1 і z_2 з виразу (6.8), для будь-якої точки поверхні контакту двох

тіл зі сферичними поверхнями залежність суми переміщень ω_1 і ω_2 буде мати вигляд

$$\omega_1 + \omega_2 = \alpha - \beta r^2, \quad (6.11)$$

де β - постійна, залежна від радіусів R_1 і R_2 тіл, що стикаються. У нашій випадку з виразу

$$\beta = \frac{R_1 + R_2}{2R_1R_2}. \quad (6.12)$$

На підставі розглянутого механізму зближення двох пружних тіл з ідеально гладкими сферичними поверхнями шляхом визначення переміщень ω_1 і ω_2 для точок A_1 і A_2 з урахуванням симетрії розподілу тиску між дотичними тілами й приймаючи, що відповідні деформації тіл також симетричні щодо центра O поверхні контакту, наведемо вирази для визначення радіуса a кругової поверхні контакту й величини α зближення тіл, що отримані в припущенні чисто пружних деформацій контактуючих тіл з ідеально гладкими сферичними поверхнями [230].

Радіус окружності, що обмежує площадку контакту стислою силою F_0 пружних тіл з ідеально гладкими поверхнями, визначається по виразу

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\pi F_0(k_1 + k_2)R_1R_2}{4(R_1 + R_2)}}. \quad (6.13)$$

Позначаючи у виразі (6.13)

$$D = \frac{3\pi}{4}(k_1 + k_2), \quad (6.14)$$

де $k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}$; $k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}$, одержимо вираз (6.14) у вигляді

$$D = \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right). \quad (6.15)$$

Тут μ_1 і μ_2 - коефіцієнти Пуассона; E_1 і E_2 - модулі Юнга першого й другого тіл відповідно.

Тоді вираз (6.13) для визначення радіуса a кругової поверхні контакту буде

$$a = \sqrt[3]{\frac{F_0 D R_1 R_2}{R_1 + R_2}}. \quad (6.16)$$

Величина зближення α двох пружних тіл, що лежать на лінії дії зосередженої сили, дорівнює

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2 F_0^2 (k_1 + k_2)^2 (R_1 + R_2)}{16 R_1 R_2}}, \quad (6.17)$$

а з урахуванням виразу (6.11) одержимо

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{F_0^2 D^2 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2}}. \quad (6.18)$$

З виразів (6.16) і (6.18) видно, що радіус a кругової поверхні контакту двох тіл зі сферичною поверхнею пропорційний стискаючій зосередженій силі F_0 у ступені $1/3$, а величина зближення α - силі F_0 у ступені $2/3$.

Виходячи з формули (6.15) і з огляду на те, що для кола $a = \rho$, то нормальну напругу усередині кола можна визначити по виразу:

$$q(x, y) = \frac{3F_0}{2\pi a^2} \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{a^2}}, \quad (6.19)$$

де $3F_0 / 2\pi a^2 = q_0$.

Якби стискаюча сила F_0 розподілялася рівномірно по площі зіткнення тіл у вигляді кола, то, ділячи силу F_0 на площу кола зіткнення πa^2 , ми всюди мали б середнє значення напруги $F_0 / \pi a^2$. Отриманий результат для q_0 показує, що тиск у центрі кола в 1,5 рази перевищує середню величину.

Розглянемо контактну задачу в застосуванні до системи «перетворювач – трубопровід» при оцінці властивостей сухого контакту поверхні п'єзоелементу перетворювача із циліндричною поверхнею труби при контролі технічного стану трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями. Прийmemo контактуючі поверхні п'єзоелементу перетворювача й труби також ідеально гладкими. При цьому будемо вважати, що поверхня п'єзоелементу перетворювача має скінченну величину уздовж утворюючої труби й притискається до поверхні труби статичною силою F_0 , спрямованої перпендикулярно до лінії торкання й рівномірно уздовж її розподіленої [222].

Проаналізуємо механізм зближення двох пружних тіл (площини п'єзоелемента й труби) під дією статичної сили F_0 притиску, використовуючи реальні кільцеві розміри п'єзоелементу: ширина – 3 мм, довжина – 12 мм, номінальна площа поверхні п'єзоелементу – 36 мм². Для аналізу скористаємося зображенням задачі про контакт п'єзоелементу й труби у вигляді розрізу через обидві поверхні їхнього зіткнення (рисунок 6.9). Точку O початку координат розмістимо по середині лінії первісного торкання п'єзоелемента й труби. Відповідно до прийнятого позначення координат труб вісь z направимо уздовж утворюючої труби; вісь y у загальної дотичної площини y,z ; вісь x буде збігатися з нормаллю в точці O . Координату x для п'єзоелемента будемо називати x_1 , для труби – x_2 . Радіус труби позначимо R_2 . Тому що притиск п'єзоелемента до поверхні труби здійснюється по всій довжині п'єзоелемента, то постійну силу F_0 необхідно розглядати як розподілену по всій поверхні перетворювача.

Виходячи із загальної постановки контактної задачі теорії пружності запишемо для розглянутого випадку рівняння поверхні контактуючих п'єзоелемента й труби.

Рівняння плоскої поверхні п'єзоелемента буде мати вигляд $f_1(y, z) = x_1 = 0$, а для циліндричної поверхні труби $f_2(y, z) = x_2 = \frac{r^2}{2R_2}$.

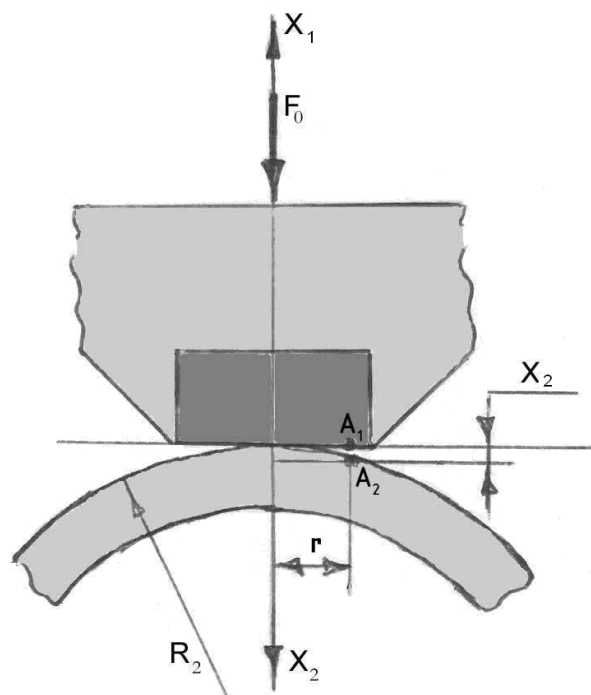


Рисунок 6.9 - Зображення задачі про контакт п'єзоелемента перетворювача із трубою у вигляді розрізу

У процесі первісного торкання поверхні п'єзоелемента перетворювача з поверхнею труби під дією розподіленої статичної сили F_0 ширина їхньої лінії зіткнення буде становити частки міліметра. При подальшому збільшенні стискаючої сили F_0 , спрямованої по осі x і розподіленої

рівномірно по довжині п'єзоелемента, внаслідок деформації п'єзоелемент і труба будуть стосуватися не по лінії, а по деякій смужці шириною $2b$. Цю смужку можна розглядати як межу еліпса, одна з осей якого $2c = 12$ мм. Просторове подання задачі про контакт п'єзоелемента перетворювача й труби наведено на рисунок 6.10.

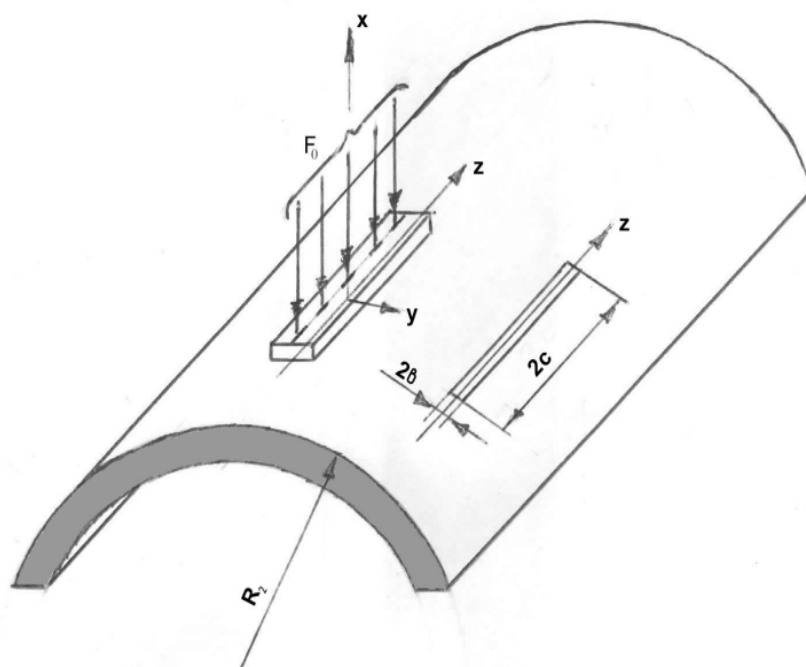


Рисунок 6.10 – Просторове подання задачі про контакт п'єзоелемента перетворювача й труби

Для визначення напівширини смужки контакту поверхні п'єзоелемента перетворювача з поверхнею труби скористаємося результатами теорії, отриманими в процесі аналізу контактної задачі при зіткненні двох циліндрів. Вираз

для визначення напівширини смужки при контакті двох циліндрів має вигляд

$$e = \sqrt{\frac{4F_0(k_1 + k_2)R_1R_2}{R_1 + R_2}}. \quad (6.20)$$

Оскільки для випадку контакту п'єзоелемента з поверхнею труби рівняння плоскої поверхні п'єзоелемента, радіус якого R_1 дорівнює нескінченності, а відношення $\frac{1}{R_1}$ прагне до 0, то вираз (6.20) для визначення напівширини e

смужки контакту п'єзоелемента із трубою буде мати вигляд

$$e = \sqrt{4F_0R_2(k_1 + k_2)}. \quad (6.21)$$

Вираз (6.21) показує, що зі збільшенням радіуса труби напівширина e смужки контакту поверхні п'єзоелемента із трубою буде збільшуватися під дією розподіленої сили F_0 . У межі співвідношення ширини й довжини смужки контакту при повнім зіткненні поверхонь п'єзоелемента й труби буде дорівнює $2c/2e = 4$.

Для визначення величини зближення п'єзоелемента з поверхнею труби скористаємося формулою для визначення зближення двох циліндрів під дією розподіленої сили, що має вигляд:

$$\alpha = F_0(k_1 + k_2) \ln \frac{4e}{e^2}, \quad (6.22)$$

де e – основа натуральних логарифмів.

Підставляючи у вираз (6.22) значення e з формули (6.21), одержимо зближення п'єзоелемента з поверхнею труби під дією розподіленої сили у вигляді

$$\alpha = F_0(k_1 + k_2) \ln \frac{e}{F_0R_2(k_1 + k_2)}. \quad (6.23)$$

Для оцінки розподілу тиску при контакті поверхні п'єзоелемента з поверхнею труби скористаємося виразом, що

отримано з формули еліптичного розподілу тиску шляхом граничного переходу $c/\epsilon \rightarrow \infty$ при зіткненні двох циліндричних поверхонь. Тоді розподіл тиску на напівширині смужки контакту п'єзоелемента з поверхнею труби буде функцією виду

$$q(y) = \frac{2F_0}{\pi\epsilon} \sqrt{1 - \frac{y^2}{\epsilon^2}}, \quad (6.24)$$

де $2F_0 / \pi\epsilon = q_0$.

Найбільший тиск q_0 у центрі площі смужки контакту п'єзоелемента із трубою можна визначити, підставляючи значення напівширини ϵ (6.18) у вираз

$$q_0 = \frac{2F_0}{\pi\epsilon} = \frac{2F_0}{\pi \sqrt{4F_0 R_2 (k_1 + k_2)}}. \quad (6.25)$$

Зробивши відповідні перетворення, одержимо значення найбільшого тиску

$$q_0 = \sqrt{\frac{F_0}{\pi^2 R_2 (k_1 + k_2)}}. \quad (6.26)$$

Покажемо, яким чином зв'язані між собою розподілена сила F_0 притиснення площини п'єзоелемента перетворювача до поверхні труби і її дія, що врівноважується тиском $q(x)$ відповідно до виразу (6.24) уздовж ширини 2ϵ прямокутної смужки. У загальному випадку такий розподіл тиску буде являти собою напівеліпс. У реальних умовах для притиску п'єзоелементів до поверхні труби найчастіше використовується надувне кільце шляхом застосування пневматичного тиску повітря більше 10 бар залежно від діаметра труби. Прийmemo, що для радіуса труби R_2' згідно виразу (6.22) при постійному зусиллі притиску $F_0 = 10$ бар, ширина смужки $2\epsilon_1 = 2$ мм. У зоні контакту під дією сили F_0 відповідно до формули (6.24) розподіл тиску $q(y)$ буде мати вигляд, наведений на

рисунок 6.11 (крива 1). Для радіуса труби $R_2'' < R_2'$ приймемо ширину смужки $2e_2 = 1$ мм. Розподіл тиску $q(x)$ у зоні контакту буде мати вигляд, наведений на рисунок 6.11 (крива 2).

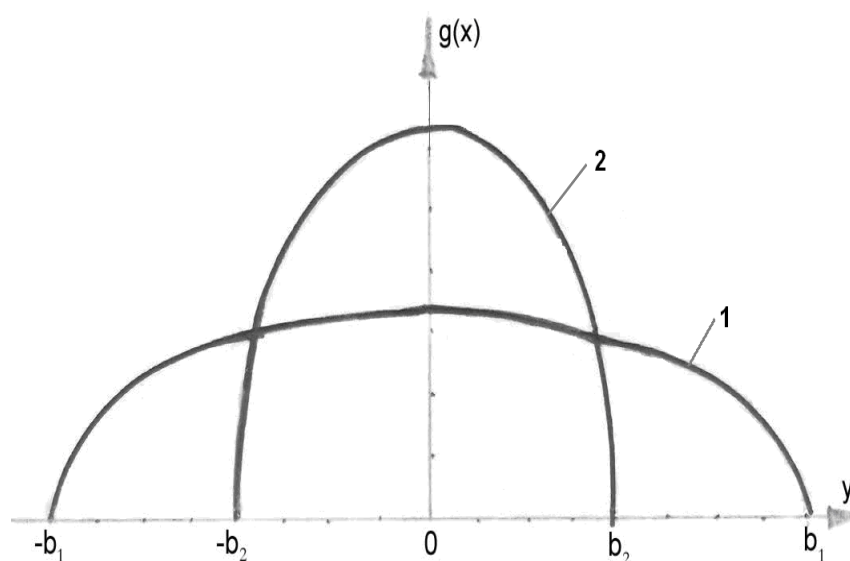


Рисунок 6.11 – Розподіл тиску в контактній зоні залежно від ширини смужки площадки контакту

Криві розподілу тиску $q(x)$ мають напівеліптичний вигляд, мала піввісь яких (ширина смужки контактної площадки) залежить від зусилля притиску статичною силою F_0 п'єзоелемента перетворювача до поверхні труби, радіуса труби й фізичних постійних стисканих тіл. Максимальна контактна напруга σ_{\max} відповідає центру смужки контактної площадки $q(x) = \sigma_{\max} = 2F_0 / \pi e$ й перевищує середню напругу $\sigma_{cp} = F_0 / \pi e$ у два рази.

Криві розподілу тиску (рисунок 6.11) показують, що при зменшенні ширини смужки контактної площі у два рази при одній і тій же силі F_0 тиск $q(x)$ зростає у два рази при контакті п'єзоелемента з поверхнею труби.

Викладений вище аналіз контактної задачі теорії пружності в додатку до системи «перетворювач – трубопровід» під дією постійної розподіленої сили F_0 відіграє важливу роль у низькочастотній ультразвуковій дефектоскопії спрямованими хвилями протяжних трубопровідних систем при забезпеченні передачі коливань у трубопровід і прийомі відбитих сигналів від різного роду несучільностей. Однак контактні задачі в системі «перетворювач - трубопровід» розглянуті тільки для одного перетворювача й за умови, що контактуючі поверхні п'єзоелемента перетворювача й труби є ідеально гладкими. Відмінною рисою технології ультразвукової дефектоскопії трубопровідних систем спрямованими хвилями є використання багатоелементних акустичних систем, що містять велику кількість перетворювачів, число яких залежить від діаметра труби. При цьому необхідно створити рівномірне зусилля притиску індивідуально для всіх перетворювачів системи «перетворювач - трубопровід» з метою забезпечення збудження кільцевої хвилі по всьому перетині труби.

Однак у реальних умовах поверхні п'єзоелемента перетворювача й труби не є ідеально гладкими. Труба, на якій установлюється акустична антена з перетворювачами, звичайно має неопрацьовану поверхню, шорсткість якої більше шорсткості поверхні оброблених деталей у машинобудуванні. Крім того, у реальних умовах зовнішня поверхня труби може бути уражена корозією, у результаті чого фактична площа контакту поверхонь п'єзоелемента й труби буде незначною, що не зможе забезпечити необхідну чутливість при збудженні коливань у трубопроводі й прийомі відбитих сигналів від несучільностей. Це вимагає проведення

додаткових досліджень по оцінці впливу шорсткостей, насамперед поверхні труби, на передачу коливань і прийом відбитих сигналів залежно від фактичної площі контакту поверхні п'єзоелемента із трубою під дією постійної розподіленої сили необхідної величини [229].

6.4 Види відбивачів спрямованих хвиль у трубопроводах

Характерною рисою трубопроводів тривалого експлуатування та різного призначення є наявність у них різного роду несучільностей, пов'язаних зі зміною щільності матеріалу й/або поперечного перерізу стінок труб на границі їхнього з'єднання й/або по довжині труби. Такі несучільності є відбивачами ультразвукових спрямованих хвиль, які поширюються уздовж осьової лінії труби. Ці несучільності можуть утворюватися як при будівництві трубопроводів, так і в процесі їхньої експлуатації. На рисунку 6.12 наведена класифікація видів відбивачів у трубопроводі й схема їхнього можливого розміщення на трубі.

Всі відбивачі в трубопроводі можна розділити на два види: симетричні й асиметричні. До симетричних відбивачів відносяться зварні шви, фланці, опори, патрубки й т.п., місце розташування яких на трубопроводі відомо відповідно до технічної документації. Луно-сигнали від симетричних відбивачів є важливими мітками для визначення місця розташування асиметричних відбивачів. До асиметричних відбивачів відносяться дефектні ділянки труби, обумовлені найчастіше ушкодженнями поперечного перерізу стінки труби через корозію й ерозійне зношування стінки труби й розташовані по траєкторії поширення спрямованої хвилі. Корозійні ураження стінки труби орієнтовані як уздовж окружності труби, так і уздовж поздовжньої осі труби. Вони можуть перебувати на внутрішніх і зовнішніх поверхнях, однак розпізнати, яка саме це поверхня за допомогою дистанційного ультразвукового контролю неможливо.

Ушкодження, обумовлені ерозійним зношуванням стінки труби, найчастіше орієнтовані уздовж поздовжньої осі труби й розташовані з боку внутрішньої поверхні. Асиметричні відбивачі можуть розташовуватися в різних місцях труби. Для ідентифікації їхнього місця розташування уздовж труби служать луно-сигнали від симетричних відбивачів. При наявності дефектів у зварному шві, обумовлених деформацією форми шва й корозійним ураженням, вони будуть ідентифікуватися синхронно зі зварним швом.

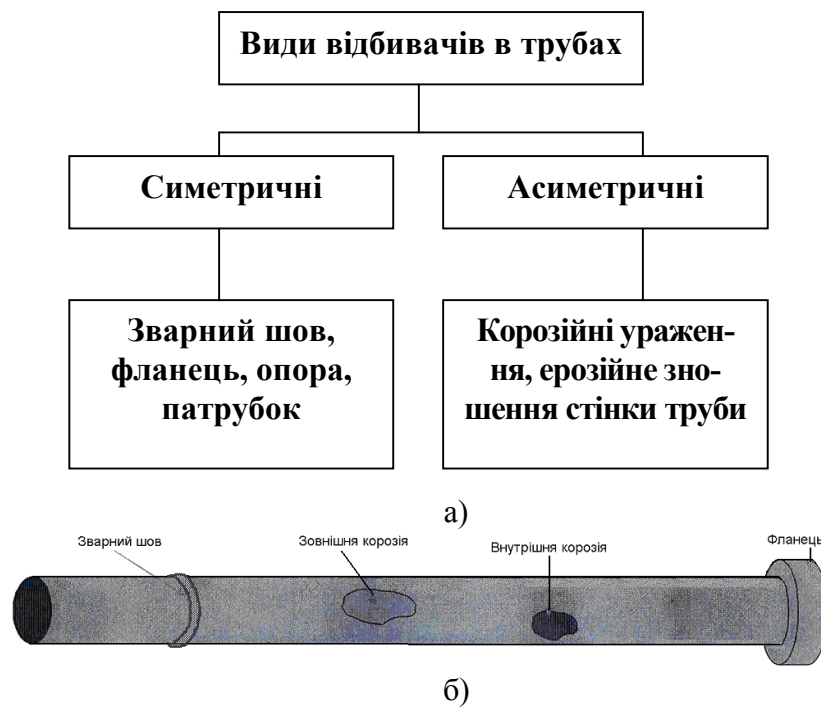


Рисунок 6.12 - Класифікація видів відбивачів у трубопроводі (а) і схема їхнього можливого розміщення на трубі (б)

6.5 Оцінка амплітуди відбитих від несуцільностей труби сигналів спрямованих хвиль

При вивченні процесів взаємодії пружних коливань спрямованої хвилі з несуцільностями трубопроводу необхідно враховувати параметри його середовища як нескінченного хвилеводу. До таких параметрів трубопроводу як акустичної системи відносяться питомий акустичний імпеданс Z_a та механічний імпеданс Z .

Питомий акустичний імпеданс Z_a є важливим параметром системи з розподіленими постійними та представляє собою хвильовий опір її середовища, який дорівнює $Z_a = \rho \cdot C$, де ρ – густина середовища, C – швидкість звуку в цьому середовищі. Ця величина подається на одиницю поперечного перерізу шляху розповсюдження пружної хвилі. При відсутності дисперсії швидкості звуку хвильовий опір не залежить від форми хвилі, є константою та характеризує середовище. Враховуючи, що спрямована хвиля розповсюджується в трубопроводі без затухання, то Z_a має активний характер. Суть активного характеру хвильового опору полягає в тому, що при розповсюдженні енергії коливань від п'єзоперетворювачів акустичної антени в кожному поперечному перерізі трубопроводу його середовище поглинає енергію за рахунок подальшої передачі цієї ж енергії наступній ділянці трубопроводу, який має той же опір. Хвильовий опір є важливим параметром середовища трубопроводу, тому що він характеризує відбиваючі властивості середовища та визначає умови відбиття та проходження звуку на межі двох середовищ. Якщо хвильові опори середовищ рівні, то хвиля проходить межу без відбиття.

Механічний імпеданс Z є другим важливим параметром середовища протяжного трубопроводу. Цей параметр пов'язаний з хвильовим опором залежністю: $Z = S \cdot Z_a$, де S – площа поперечного перерізу труби. В зонах труб без дефектів

контрольований трубопровід має кінцевий механічний імпеданс. Зміна механічного імпедансу пов'язана як зі зміною площі поперечного перерізу труби внаслідок його корозійного ураження та ерозійного зносу, так і зі зміною хвильового опору середовища зварного з'єднання та площі його поперечного перерізу із-за наявності в ньому несучільностей. Механічний імпеданс, по суті, показує ступінь опору середовища трубопроводу розповсюдженню ультразвукових спрямованих хвиль, що і приводить до виникнення відбитих сигналів від несучільностей в трубопроводі.

Взаємодія спрямованої хвилі з дефектами трубопроводів базується на принципі відбиття й проходження падаючої ультразвукової хвилі на кожній межі поділу, обумовленої зміною поперечного перерізу стінки труби. На кожній межі поділу падаюча хвиля розділяється на відбиту й на ту, що пройшла через межу поділу [225].

Проаналізуємо в загальному виді процеси відбиття й проходження спрямованих хвиль на границі переходу одного хвильоводу перетину S_1 до другого хвильоводу перетину S_2 . Будемо вважати границю переходу хвильоводів як нероз'ємний абсолютно твердий контакт двох труб з різними матеріальними постійними ρ_1, E_1 і ρ_2, E_2 для спрямованої хвилі поздовжньої моди. Принцип відбиття й проходження спрямованих хвиль на границі хвильоводів з різними перетинами показаний на фрагменті трубопроводу з різними внутрішніми діаметрами труб, що наведений на рис. 6.13, де t_1, r_{e1} і t_2, r_{e2} - товщини стінок і внутрішні радіуси першої й другої труби відповідно; r_n – зовнішній радіус труб.

Якщо на одному кінці трубопроводу збудити прямокутний імпульс із синусоїдальним заповненням необхідної частоти, то по товщині стінки труби уздовж поздовжньої осі трубопроводу буде поширюватися ультразвукова хвиля амплітуди A_1 . Поширюючись по ділянці

хвилеводу із площею поперечного перерізу S_1 падаюча хвиля амплітуди A_1 зустрічає на своєму шляху інший хвилевід, площа поперечного перерізу якого становить S_2 . При цьому падаюча хвиля перетвориться у відбиту, амплітуда B_1 який залежить від ступеня зміни поперечного перерізу труби, і в прохідну з амплітудою A_2 , що поширюється далі по перерізу труби.

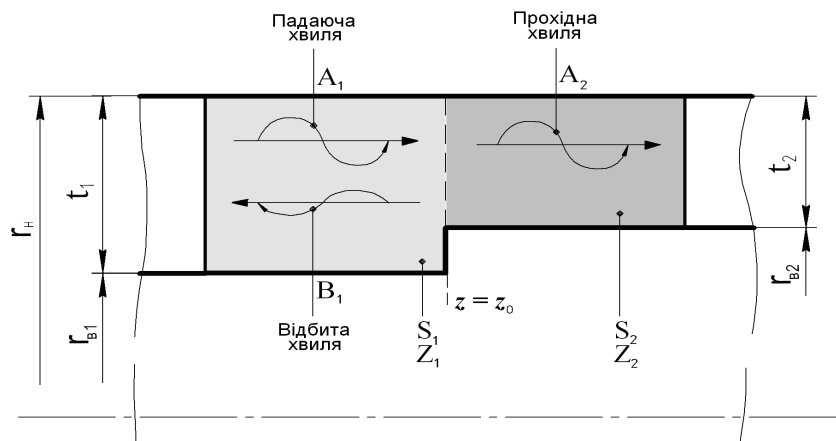


Рисунок 6.13 - Принцип відбиття й проходження спрямованих хвиль на границі зміни перетину труби

На рисунок 6.13 показано найпростіший випадок переходу від першої труби з механічним імпедансом $Z_1 = \rho_1 C_1 S_1$ до досить довгої труби з механічним імпедансом $Z_2 = \rho_2 C_2 S_2$.

Коефіцієнти відбиття R і проходження W спрямованої хвилі від стрибка механічного імпедансу на межі поділу двох середовищ визначаються виразами:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad W = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (6.27)$$

Якщо хвильові опори середовищ рівні, то коефіцієнти відбиття й проходження спрямованої хвилі будуть залежати тільки від зміни поперечного перерізу стінки труби.

Виходячи із цього, згідно рисунку 6.13, коефіцієнти відбиття R і проходження W низькочастотної ультразвукової хвилі від стрибка механічного імпедансу середовища труби будуть визначатися виразами:

$$R = \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1}; \quad W = \frac{2S_2}{S_2 + S_1}. \quad (6.28)$$

Враховуючи, що поширення спрямованої хвилі відбувається в напрямку зменшення поперечного перерізу труби ($S_2 < S_1$), то спостерігається зміна фази відбитої хвилі стосовно падаючої на протилежну. Прокідна хвиля має ту ж фазу, що й падаюча. Залежно від значення S_1 й S_2 коефіцієнт відбиття R буде мати негативне або позитивне значення. При позитивному R фаза відбитого сигналу не змінюється. При цьому частоти падаючої й відбитої хвилі рівні у всіх випадках, що значно полегшує вирішення завдання про відбиття спрямованої хвилі.

Оцінимо залежність амплітуд відбитої й прохідної низькочастотної хвилі від ступеня зміни поперечного перерізу труби через наявність дефектів по довжині труби. На кожній межі поділу падаюча хвиля буде розщеплюватися на одну відбиту й одну прохідну хвилю, у результаті чого ці хвилі утворять послідовність повністю розділених і незалежних друг від друга окремих імпульсів. При цьому кожна прохідна хвиля по амплітуді після межі поділу буде менше падаючої. На ділянці останнього дефекту по довжині труби падаюча хвиля амплітуди A_n перетвориться у відбиту амплітуди B_n і прохідну хвилю амплітуди A_k , що відбивається від кінця труби з амплітудою B_k . При відсутності загасання низькочастотної спрямованої хвилі на кінцевій ділянці трубопроводу амплітуди прохідної хвилі A_k і відбитої B_k будуть рівні. Тому

між амплітудами прохідних і відбитих від дефектів хвиль на всій ділянці контрольованого трубопроводу буде мати місце залежність:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= A_1 - A_2; \\
 B_2 &= A_2 - A_3; \\
 &\dots\dots\dots \\
 B_n &= A_n - A_{n+1}.
 \end{aligned}
 \tag{6.29}$$

Амплітуди кожного з імпульсів відбитої й прохідної хвиль можна розрахувати, якщо застосувати формули (6.25) до кожного окремого процесу відбиття й проходження спрямованої хвилі на межі поділу. Звуковий тиск послідовності імпульсів при цьому щораз буде зменшуватися внаслідок чергового розщеплення.

З урахуванням виразів (6.28) для визначення коефіцієнтів відбиття R і проходження W спрямованої хвилі на границі зміни поперечного перерізу стінки труби амплітуди відбитої B_1 і прохідної A_2 хвиль будуть визначатися формулами виду:

$$B_1 = R \cdot A_1 = \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} A_1,
 \tag{6.30}$$

$$A_2 = W \cdot A_1 = \frac{2S_2}{S_2 + S_1} A_1.
 \tag{6.31}$$

З виразу (6.30) видно, що величина амплітуди відбитої хвилі пропорційна різниці площ $S_2 - S_1$, тобто залежить від розмірів ураженої корозією площі поперечного перерізу стінки труби. Це значить, що низькочастотна спрямована хвиля чутлива до втрат металу в поперечному перерізі труби. З виразу (6.30) також слідує, що коефіцієнт відбиття по амплітуді, обумовлений стрибком поперечного перерізу труби через наявність дефекту, значно менше, ніж відношення

поперечних перерізів S_2/S_1 . Тому спрямована хвиля поширюється далі уздовж труби й тільки невелика її частина відбивається від стрибка поперечного перерізу труби.

Якщо прийняти, що поперечні перерізи в місці дефекту відрізняються у два рази, тобто $S_2 = \frac{1}{2}S_1$, то амплітуда відбитої хвилі B_1 буде дорівнювати:

$$B_1 = \frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} A_1 = -\frac{S_2}{3S_2} A_1 = -\frac{1}{3} A_1. \quad (6.32)$$

У цьому випадку амплітуда прохідної хвилі A_2 буде дорівнювати:

$$A_2 = \frac{2S_2}{S_2 + S_1} A_1 = \frac{2S_2}{3S_2} A_1 = \frac{2}{3} A_1. \quad (6.33)$$

Оцінімо, яка частина енергії збудженої хвилі відбивається при співвідношенні перетинів $S_2 = \frac{1}{2}S_1$. Відомо, що коефіцієнт відбиття R , падаючої плоскої звукової хвилі на границі зміни поперечного перерізу об'єкта з однаковими матеріальними постійними, оцінюваний по енергії, дорівнює:

$$R = \left(\frac{S_2 - S_1}{S_2 + S_1} \right)^2. \quad (6.34)$$

У загальному випадку це означає, що тільки невелика частина енергії звукової хвилі відбивається від дефекту назад, а значна частина енергії проходить далі по трубі. Для співвідношення перетинів труби $S_2 = \frac{1}{2}S_1$ з виразу (6.32) значення відбитої енергії звукової хвилі буде дорівнювати:

$$\left(\frac{B_1}{A_1} \right)^2 = \left(\frac{1}{3} \right)^2 = \frac{1}{9}. \quad (6.35)$$

З виразу (6.35) слідує, що якщо перетини доброякісної й ураженої дефектом труби відрізняються у два рази, то тільки $1/9$ частина падаючої енергії відбивається назад. При цьому

задовольняється закон збереження енергії, що говорить про те, що різниця енергій падаючої й відбитої хвилі повинна дорівнювати енергії прохідної хвилі. Оскільки щільність енергії пропорційна квадрату амплітуди, то виконується наступне співвідношення:

$$S_1(A_1^2 - B_1^2) = A_2^2 S_2. \quad (6.36)$$

Хоча тільки незначна частина енергії звукової хвилі відбивається назад від дефектів, амплітуда відбитого луно-сигналу є основним параметром, покладеним в основу механізму виявлення дефектів корозійного ураження й ерозійного зношування стінки труби.

Висота відбитих луно-сигналів, по суті, відповідає ступеню зміни площі поперечного перерізу труби під дією корозії, тобто залежить від розміру дефекту. При збільшенні розміру дефекту збільшується також тривалість (ширина) луно-сигналу. Відповідність амплітуди відбитих сигналів ступеня зміни площі поперечного перерізу труби через дію корозії є фундаментальною технологічною особливістю дефектоскопії протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями, які розповсюджуються по товщині стінки труби уздовж її поздовжньої осі [232]. Таким чином, вірогідно підтвердити наявність (відсутність) ушкоджень може тільки відповідна форма прийнятих відбитих сигналів. Однак точно визначити розміри ушкодження, його тип, ступінь небезпеки тощо майже неможливо, навіть якщо відомо його місце розташування по довжині труби.

6.6 Оцінка чутливості технології низькочастотного ультразвукового контролю протяжних трубопроводів

У процесі розвитку технології далекодіючого УЗК спрямованими хвилями основною метою була демонстрація чутливості методу при визначенні зовнішньої корозії під

ізоляцією й внутрішньої корозії в трубі протяжних трубопроводів. Дослідження проводилися на системних трубопроводах з ізоляцією й технологічними трубопроводами діаметром 50 – 300 мм, при передачі газу по трубах великого діаметра. Мінімумально необхідною чутливістю було визначення корозії на глибину 50 % товщини стінки, а також області $D/2 \times D/2$, що становило приблизно 9 % площі поперечного перерізу труби (D – діаметр труби) на відстані не менш 15 м від місця установки перетворювачів акустичної антени. Оскільки корозію можна розглядати як глибокі виїмки невеликої площі, то в процесі досліджень ставилося також завдання перевірити чутливість методу при визначенні корозії глибиною 50 % товщини стінки й області $3t \times 3t$, що становило приблизно 3 % площі поперечного перерізу стінки труби (t – товщина стінки).

Глибина досліджень і випробувань, що ґрунтувалися на моделюванні з використанням різних моделей несучільностей, показали, що спрямовані хвилі, що поширюються в трубах, можуть бути використані для визначення корозійного ураження трубопровідних систем різного призначення.

Також отримано результати теоретичних і практичних досліджень для визначення відбиттів від втрат поперечного перерізу труби діаметром 76 мм. Частота збуджуваного сигналу становила 70 кГц. При дослідженні використовувалися штучні дефекти у вигляді паза 50 % товщини стінки як функція довжини окружності й паза шириною більше 11 % довжини окружності як функція глибини дефекту. Потім ці дослідження були розширені й на більший розмірний діапазон дефектів, забезпечуючи, таким чином, пакет даних про знайдені відбиття. На рисунку 6.14 наведена залежність між амплітудою відбитого сигналу й площею дефекту, як пропорцією поперечного перерізу стінки труби.

Можна помітити, що не всі точки, що відповідають амплітуді відбитого сигналу при одній і тій же площі дефекту, лежать на середній лінії.

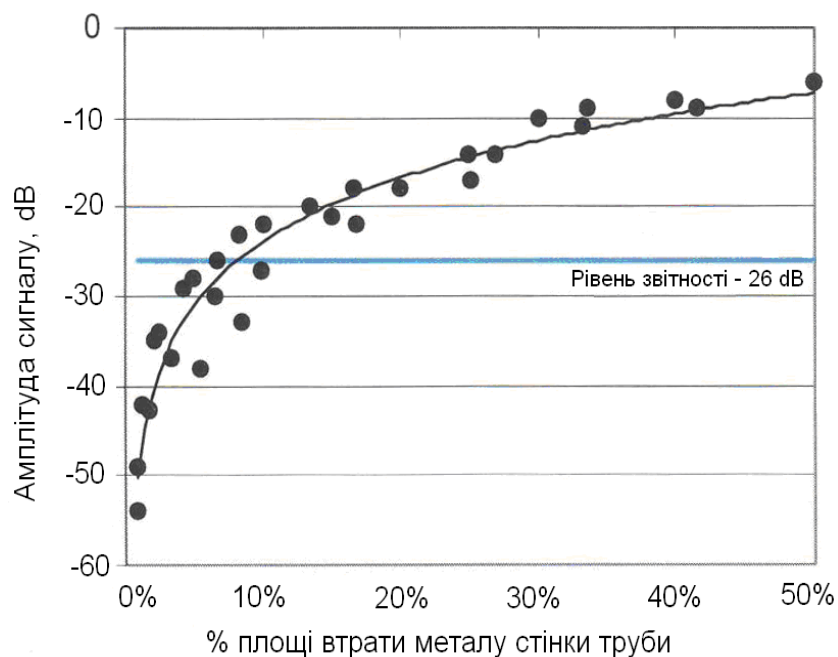


Рисунок 6.14 - Залежність амплітуди відбитого сигналу від площі втрат металу: (• відбиття від дефектів; - найкраща збіжність залежності)

Було висловлене припущення, що глибокі дефекти з малою довжиною по окружності труби дають більше відбиття, чим довгі по окружності, але неглибокі тієї ж площі. Це теоретичне припущення було експериментально перевірене на трубах діаметром 76 і 200 мм, що містять штучні дефекти у вигляді пазів відомих площ поперечного перерізу. У більшості випадків практичні результати були близькі до прогнозованого. Тому наведена на рис. 6.15 залежність була

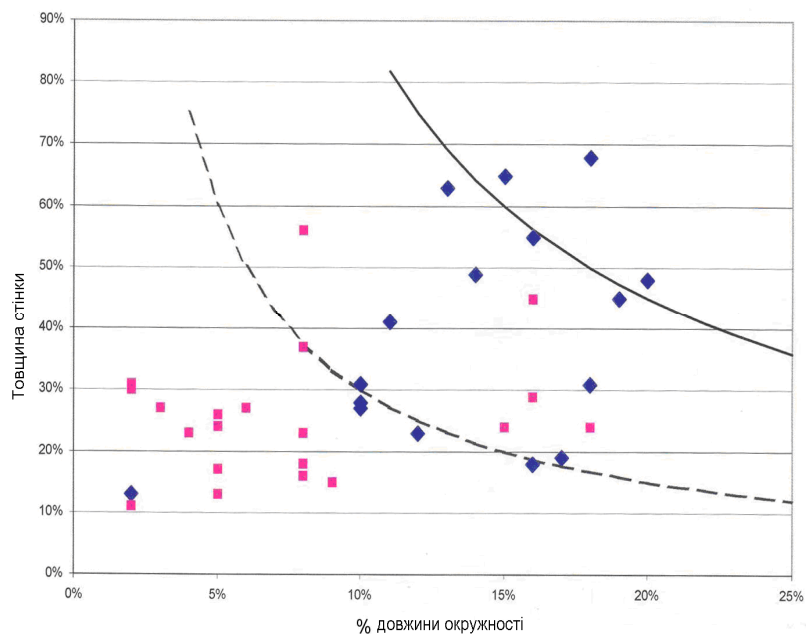
використана як база для опису чутливості методу УЗК спрямованими хвилями в системі *Teletest*. Із залежності рис. 6.15 видно, що в діапазоні від 10 % до 50 % площі ураженого дефектом поперечного перерізу труби крива чутливості змінюється більш плавно. У діапазоні від 3 % до 9 % чутливість методу проявляється сильніше.

Підтверджена також можливість за допомогою довгохвильового УЗК виявляти невеликі втрати металу на рівні 3 % поперечного перерізу труби та прийому відбитого луно-сигналу від реального еталонного відбивача на рівні 4 % дефектності поперечного перерізу труби. Тому в системі *Teletest* у як протокольного рівня відбитого луно-сигналу була прийнята амплітуда, що відповідає 9 % площі поперечного перерізу труби. Якщо чіткі індикації виявляються нижче протокольного рівня, то їх визначають як малі дефекти.

Підтвердження обраних порогів системи *Teletest* здійснювалося шляхом проведення дослідницьких робіт з європейського проекту *RACH*, очолюваного Лондонським університетом. Основна частина роботи складалася в зборі даних про неруйнівний контроль зразків труб, уражених корозією, з використанням восьми методів НК для порівняння їхньої здатності виявлення дефектів. Випробування проводилися «у сліпу» без знання існуючих дефектів. Оцінка результатів досліджень здійснювалася незалежною групою з Бюро *Veritas*, Париж. На рис. 6.16 наведені результати оцінки 36 різних дефектів для труб діаметром 150 мм. Графік побудований у вигляді залежності глибини ураження дефектами стінки труби від довжини по окружності й показує виявлені й невиявлені дефекти. Криві відбивають дефекти на рівні 3 % і 9 % площі поперечного перерізу труби.

Графіки на рисунку 6.15 показують, що при «сліпих» умовах контролю система *Teletest* працює як очікувалося. Очевидно обмежене виявлення дефектів при 3 % рівня й

нижче його. Дані показують класичну ймовірність характеристик виявлення, що збільшується в області вище рівня, що відповідає 3 % поперечного перерізу труби. Всі контрольовані дефекти навколо й вище 9 % рівня були виявлені. Ці результати дуже важливі, тому що вони демонструють можливості роботи системи *Teletest* на відомих зразках з відомими дефектами й можуть бути відтворені при проведенні діагностики трубопроводів з корозією в невідомих місцях.



◇ – виявлені дефекти; □ - не виявлені дефекти;
 — і границя 9 % зони; - - - границя 3 % зони

Рисунок 6.15 - Результати виявлення дефектів системою *Teletest* як залежності глибини поразки стінки труби від довжини по окружності

Такі ж дослідження були проведені на трубах діаметром 600 мм (товщина стінки 8,74 мм) на 86 видах моделей дефектів, виконаних механічним шляхом. У цьому випадку були виявлені дефекти значно нижче кривої 9 % площі поперечного перерізу труби, а також дефекти нижче, ніж 3 % площі. Результати цих досліджень показали, що у випадку труби з більшим діаметром мінімальна чутливість до виявлення втрат металу стінок, еквівалентна 9 % площі поперечного перерізу, вище, а практична мета обстеження 3 %-ої площі стінки труби була досягнута для більшості випадків. Чутливість до дефектів вище на лініях більших діаметрів труб, коли відношення діаметра до товщини стінки труби набагато більше, ніж при малих діаметрах труб. Однак на трубах великого діаметра досить складно виявити невеликі окремі ділянки корозії, тому що розмір кожної корозійної поразки не пропорційний внутрішньому діаметру труби [227].

Найбільш важливим є те, що метод і технологія низькочастотного УЗК є методом якісної дистанційної візуалізації місця розташування дефектів і чутливий до зменшення поперечного перерізу труби, тобто до будь-яких втрат металу в комбінації глибини й довжини по окружності труби через корозійне ураження або ерозійне зношування. Це досягається завдяки передачі кругової хвилі уздовж стінки труби, що взаємодіє з поперечним перерізом у кожній її точці. При цьому технологія низькочастотного УЗК рівною мірою чутлива до дефектів на внутрішній і зовнішній поверхнях труби. Однак уражена частина стінки труби погано виявляється далекодіючим методом у напрямку осьової лінії труби. Це пояснюється тим, що спрямована хвиля при поширенні вдаряється в границю зміни перетину труби й відразу ж відбивається, хоча від довгого дефекту в напрямку осьової лінії труби може відбитися більш сильний сигнал, чим від короткого за умови достатнього великого розміру окружності труби. У той же час довгі дефекти в осьовому

напрямку труби можуть привести до зниження міцності труби.

6.7 Аналіз форми подання інформації про несучільності у системах низькочастотного ультразвукового контролю трубопроводів

Наведені вище результати практичних досліджень чутливості низькочастотних спрямованих хвиль при відбитті від різних дефектів були використані як база для створення технології *Teletest*. *Teletest* – це технологія дистанційного неруйнівного контролю, що являє собою луно-імпульсну систему для контролю великих обсягів матеріалу з однієї точки установки перетворювачів. Спрямовані хвилі, відбиті від дефекту, приймаються п'єзоперетворювачами й після підсилення, обробки й придушення завад виводяться на екран персонального комп'ютера як випрямлені сигнали у вигляді *A-scan* залежності амплітуди від відстані, подібно використовуваному при звичайному ультразвуковому контролі, але в діапазоні виміру, що відповідає десяткам метрів, а не сантиметрів. Враховуючи, що спрямовані хвилі носять дисперсійний характер, то при калібруванні шкали *A-scan* для зчитування відстані, а не часу, у системі *Teletest* є комп'ютерна програма визначення швидкості поширення хвилі для обраної частоти випробувань із каліброваної або «дисперсійної» кривої. У програмне забезпечення *Teletest* убудована бібліотека дисперсійних кривих, які мають різний вигляд залежно від сполучення «діаметр труби/товщина стінки». Звичайно на дисплей накладені криві коригування «відстань - амплітуда», які призначені для тимчасового регулювання чутливості й відображають лінії рівної чутливості при рівній відстані від перетворювачів.

На рис. 6.16 наведений формат дисплея системи *Teletest* для труби довжиною 36 м, що подібний до дисплея звичайного УЗК. По горизонталі - відстань від перетворювачів

або початку відліку, по вертикалі - амплітуда відбитого сигналу. Дисплей *A-scan* використовується оператором для інтерпретації результатів контролю. На *A-scan* системи *Teletest* виведені чотири криві коректування «відстань - амплітуда».

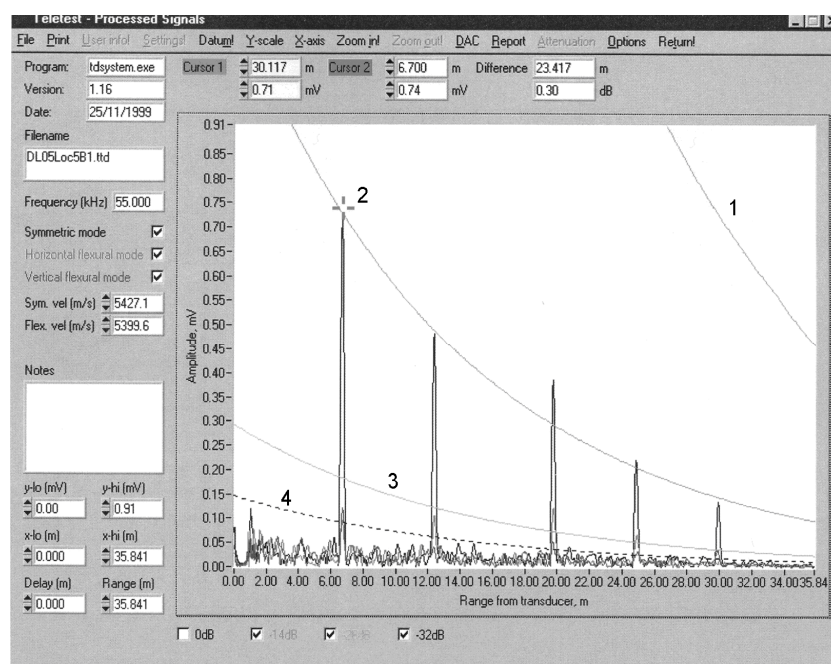


Рисунок 6.16 – Формат дисплея *A-scan* системи *Teletest* для труби довжиною 36 м

- Крива 1 (0 дБ). Кінець труби або фланець відіграє роль майже ідеального відбивача. Це можна продемонструвати на одиничному відрізку труби в лабораторії й використовувати для установки абсолютної стандартної чутливості. Цю еталонну величину звичайно називають відбивач 0 дБ. На дисплеї *A-scan* ця крива відбивається як крива 1.

• Крива 2 (-14 дБ). Сигнали від кільцевих зварних швів на трубі, які поступово загасають із відстанню, утворять ідеальні відбивачі для задання кривої коригування. Досвід використання системи *Teletest* показує, що кільцевий шов зі звичайним профілем верхнього й кореневого проходу має відбивну здатність, еквівалентну до 20 % (-14 дБ) сигналу від кінця труби. Поки існують невеликі коливання від шва до шва, це положення добре підтверджується на практиці. Крива коригування -14 дБ – це крива 2 на *A-scan*.

• Крива 3 (-26 дБ). Явище втрати металу із площею поперечного перерізу, еквівалентної до 9 % від поперечного перерізу стінки труби має відбивну здатність, еквівалентну до 5 % (-26 дБ) відбиття від кінця труби. Цей граничний рівень, видимий на *A-scan* у якості кривої 3, використовується для визначення аномалій. Аномалії, які дають сигнали, близькі, але не перевищуючи криву -26 дБ, звичайно розглядаються як *незначні*. Аномалії, які дають сигнали, що перевищують криву -26 дБ, описуються як *помірні*. Аномалії, які дають сигнали, що значно перевищують криву -26 дБ, настільки, що вони досягають лінії -14 дБ, розглядаються як *серйозні*.

• Крива 4 (-32 дБ). Крива 4 використовується як детермінанта ефективного діапазону тестування. Це дозволяє виявляється аномалії, що (-26 дБ) мають коефіцієнт сигнал-шум 6 дБ або краще. Цей рівень відношення сигналу до шуму необхідний для ефективною інтерпретації даних тесту, і практично відіграє роль межі, як діапазону тестування, так і чутливості до менших аномалій.

На дисплеї нижче рівня -26 дБ записані накладені одна на одну три криві, принцип утворення яких при відбитті спрямованої хвилі від симетричних і асиметричних відбивачів наведений на рис. 6.17.

Головна крива - це прямовідбитий (поздовжня $L(0,2)$ мода) сигнал від несучільностей. Якщо зварний шов трубопроводу є симетричним щодо труби, то відбитий сигнал

складається з тієї ж хвильової моди, що поширюється по трубопроводу.

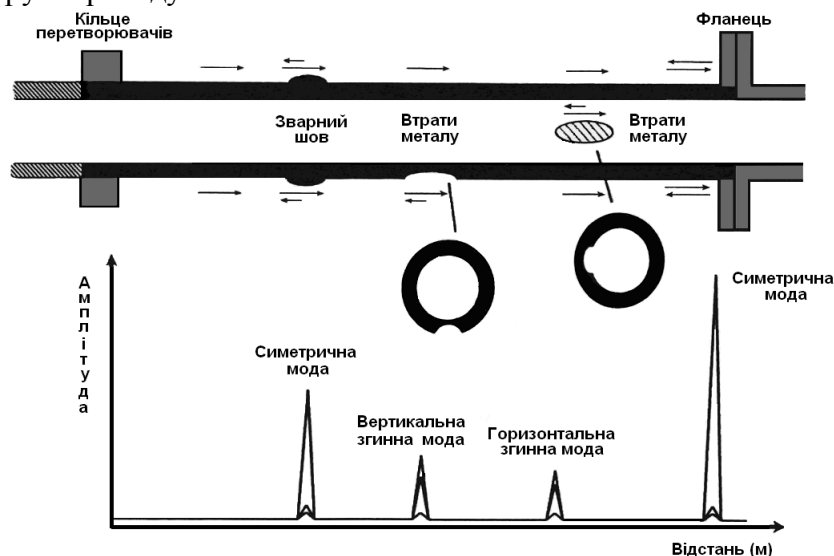


Рисунок 6.17 – Принцип відбиття спрямованої хвилі від симетричних і несиметричних відбивачів

Наявність дефектів типу корозійної поразки стінки труби приводить до перетворення (конвертації) спрямованої хвилі. Це значить, що відбита хвиля буде складатися з моди падаючої поздовжньої хвилі й конвертованої (згинної) хвилі, тому що останні викликають вигин труби внаслідок їхнього виникнення від неоднорідного джерела. Наявність таких відбитих луно-сигналів є явним свідченням присутності в стінці труби таких несучільностей як корозія. Наведені на дисплеї (рис. 6.16) дві інші криві є вертикальною і горизонтальною компонентами мод конвертованих сигналів, що утворюються, коли поздовжня мода відбивається від шорсткуватих і/або асиметричних несучільностей. Наявність рівнів амплітуд (вище 9 %) мод конвертованих сигналів означає наявність дефектів і є головним чинником процесу

їхньої інтерпретації в протяжних трубопроводах. Для інтерпретації дефектів по відбитим луно-сигналам оператор вибирає відповідні сигнали на екрані *A-scan* за допомогою курсору. Програма автоматично вимірює пік сигналу як значення вище або нижче кривої коригування -26 дБ і відстань до переднього краю луно-сигналу від центра лінії перетворювачів.

6.8 Оцінка ступеню ураження корозією стінки труби

Аналіз викладених вище досліджень амплітуди луно-сигналів, відбитих від реальних дефектів і штучних моделей дефектів, дає можливість до деякої міри судити про глибину ураження стінки труби залежно від зміни площі поперечного перерізу труби. Однак ця технологія не забезпечує такого розрішення, як обмірювана по місцю товщина, що залишилася, стінки труби, ураженої дефектом.

Висота відбитих луно-сигналів від дефектів відповідає ступеню зміни площі поперечного перерізу труби під дією корозії. Ця інформація про дефекти визначається ультразвуковими спрямованими хвилями, які поширюються уздовж поздовжньої осі труби. Величина амплітуди відбитого від дефекту сигналу характеризує ступінь дефектності поперечного перерізу труби. Ступінь дефектності D визначається по циліндричному перерізу труби у відсотковому відношенні площі дефекту S_q до всієї площі поперечного перерізу труби S_{Tp} , тобто

$$D = \frac{S_q}{S_{Tp}} \cdot 100\%. \quad (6.37)$$

Інформація про товщину стінки труби визначається при ультразвуковому вимірі товщини. При цьому ультразвукові хвилі спрямовані по товщині перпендикулярно осі труби. Тому в інформацію про амплітуду відбитого луно-

сигналу спрямованої хвилі не входить глибина корозії, що у принципі є інформацією, одержуваної по товщині. Глибина корозії характеризує ступінь H потоншення стінки труби, що визначається у відсотковому відношенні глибини корозії h до номінальної товщини t стінки труби, тобто

$$H = \frac{h}{t} \cdot 100\%. \quad (6.38)$$

Тому прямої кореляційної залежності між даними про дефекти, отриманими спрямованими хвилями, і даними про глибину потоншення, отриманими при вимірі товщини стінки, немає. Покажемо це на прикладі ураженою корозією рівною площею поперечного перерізу труби, виявленого спрямованими хвилями.

На рис. 6.18 наведена схема ураження корозією поперечного перерізу труби рівної площі з різною глибиною з боку внутрішньої поверхні труби.

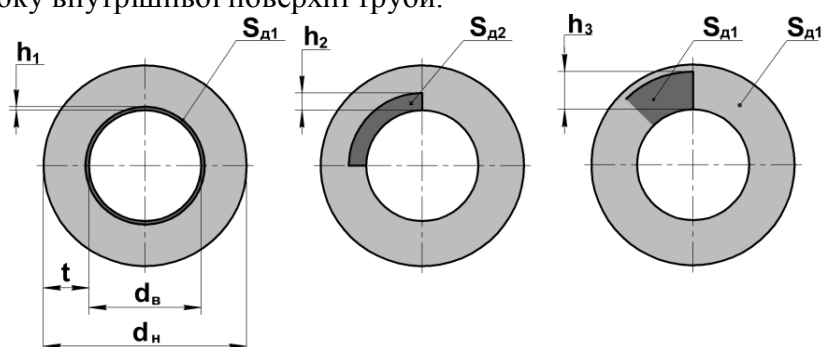


Рисунок 6.18 – Схема ураження корозією внутрішньої поверхні труби рівної площі з різною глибиною

Прийmemo, що площі ураженого дефектом перетину $S_{q1} = S_{q2} = S_{q3}$, а ступінь дефектності стінки труби $D = 9\%$. Стосовно до труби із зовнішнім діаметром $d_{н} = 114$ мм і товщиною стінки $t = 6$ мм глибина потоншення стінки при наявності рівномірної

корозії по всьому внутрішньому діаметрі труби складе $h_1 = 0,54$ мм (рис. 6.19,а). Якщо ж передбачається концентрація корозії на $1/4$ окружності труби (рис. 6.19,б), то тоді оцінюване значення глибини потоншення складе $h_2 = 2,16$ мм. При концентрації корозії на $1/8$ окружності труби (рис. 6.18,в) значення глибини потоншення буде $h_3 = 4,32$ мм.

Виходячи із цього, не можна затверджувати, що є пряма залежність між площею ураження поперечного перерізу труби й глибиною потоншення стінки. Спрямована хвиля в загальному випадку чутлива до зміни площі поперечного перерізу в комбінації глибини ураження стінки й довжини уздовж окружності труби. Хоча глибокий дефект тої ж площі з малою довжиною по окружності труби може давати більше відбиття, однак інформацію про ступінь поразки площі поперечного перерізу труби амплітуда відбитого сигналу несе в цілому й із цієї інформації неможливо обґрунтувати інформацію про глибину поразки стінки труби. Таку інформацію можуть дати інші фізичні засоби виміру стінки труби, наприклад, ультразвукова товщинометрія. На рис. 6.19 наведена схема алгоритму оцінки ступеня дефектності й потоншення стінки поперечного перерізу труби.

Нехай корозійне ураження стінки труби виявлено довгохвильовим ультразвуковим дефектоскопом, а глибина потоншення стінки обмірювана ультразвуковим товщиноміром. Про наявність корозійної поразки й ступеня поразки стінки труби судять по амплітуді відбитого луно-сигналу, що вимірюється у мВ. Така оцінка ступеня дефектності стінки труби є якісною. Величина потоншення (товщина) стінки труби вимірюється в мм, тому оцінка ступеня потоншення стінки труби є кількісною. Між цими величинами немає повної кореляції, тому що вимірюються різні фізичні параметри. Зробити оцінку глибини потоншення по амплітуді сигналу до деякої міри можна, якщо відомий вид корозії. Однак на практиці виконати це важко, коли спочатку

проводиться первинний контроль трубопроводу. Надалі такий зв'язок може бути встановлено в процесі моніторингу технічного стану трубопроводів у результаті формування картини розвитку корозійних уражень, нагромадження й аналізу фактичних статистичних даних про дефекти з використанням засобів далекодючого УЗК спрямованими хвилями й засобів локального неруйнівного контролю.

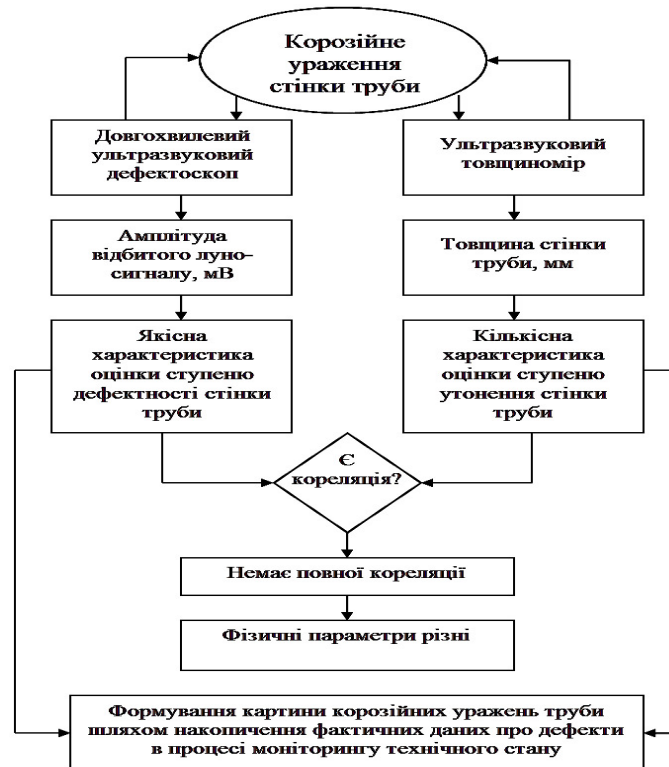


Рисунок 6.19 – Схема алгоритму оцінки ступеня дефектності й потоншення поперечного перерізу труби

Це значить, що для рішення завдань технології трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями

необхідно підтримувати зворотний зв'язок по фактичним статистичним даним, за допомогою якої між даними по спрямованих хвилях і даними по типі корозії (ступеня корозійного потоншення) може бути встановлена кореляційна залежність.

Виходячи із цього може бути запропонована загальна схема комплексу методів діагностики й неруйнівного контролю технічного стану трубопроводів різного призначення при використанні для виявлення дефектів далекодіючого УЗК низькочастотними спрямованими хвилями, що наведена на рис. 6.20.



Рисунок 6.20 - Комплексні методи діагностики й контролю технічного стану трубопроводів

Після повного контролю всієї довжини трубопроводу ділянки, на яких була виявлена корозія, оцінюються шляхом

виміру товщини ультразвуковим товщиноміром або іншими методами контролю (радіографічним, вихрострумовим), після чого при необхідності визначають точки для постійного спостереження й моніторингу технічного стану трубопроводу.

Слід також зазначити, що застосування технології й техніки далекодуючого УЗК спрямованими хвилями вимагає повного розуміння факторів, які впливають на результати контролю, практичного досвіду інтерпретації результатів.

7 НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ НАФТОГАЗОВОГО УСТАТКОВАННЯ

Розроблення та впровадження якісних нормативних документів є одним із ефективних способів забезпечення достовірності результатів неруйнівного контролю. Це зумовлено рядом причин:

- законодавство у сфері технічного регулювання стрімко розвивається, зазнаючи кардинальних змін майже кожних три роки;

- нормативна база системи стандартизації держави поки що формується. Її динамічний розвиток та рух в напрямку Євросоюзу та СОТ часто призводить до неузгодженості, а інколи й суперечливості багатьох понять, вимог та нормативних документів;

- галузева розмежованість суб'єктів стандартизації спричиняє відсутність координації в їх діях, невиправдані розбіжності у вимогах до споріднених об'єктів;

- науково-технічний прогрес, концептуальні зміни в державній політиці та економіці вимагають нових підходів до регламентації вимог щодо все більшої кількості об'єктів стандартизації.

Отже, акценти зміщуються від грамотної регламентації вимог до кваліфікованого вирішення технічної проблеми, яка стосується визначення цих вимог. Але якщо раніше нормативні документи розроблялись потужними профільними науково-дослідними інститутами, відомчими управліннями та іншими спеціалізованими організаціями, діяльність яких централізовано узгоджувалась органами Держстандарту, а тривалість цього розроблення становила приблизно два роки, то зараз, у силу різних обставин, більшість нормативних документів розробляють або фахівці в галузі стандартизації,

які не володіють усіма аспектами технічного розв'язку питань стандартизації щодо певного об'єкта, або вузькі спеціалісти з технічного розв'язку завдань, які не є висококваліфікованими фахівцями у сфері стандартизації. Тут криється ще одна небезпека – розв'язок, запропонований вузьким спеціалістом, не завжди є найбільш доцільним і ефективним.

Необхідно зауважити, що потреба в розробленні нових нормативних документів не завжди усвідомлюється власниками об'єктів стандартизації. Але нормативні документи, які розроблені у радянські часи, не тільки є непридатними через моральну застарілість, але й офіційно втратили чинність в Україні у 2005 р. Видатки на вирішення цієї проблеми порівняно з одержуваними перевагами є мізерними. Ми бачимо, що світова практика орієнтована на чітку регламентацію вимог, особливо щодо потенційно небезпечних об'єктів, які можуть спричинити загрозу життю чи здоров'ю людей, негативно вплинути на навколишнє середовище та екологічну безпеку.

Встановлення й однозначне розуміння таких вимог, а також визначення процедур, необхідних для їх підтвердження, сприятиме усуненню технічних бар'єрів у взаєминах України з державами як ближнього, так і дальнього зарубіжжя. Значним кроком у цьому напрямку стало довгоочікуване введення в дію технічних регламентів з підтвердження відповідності, у тому числі з вимогами щодо устаткування, яке працює під тиском, водонагрівальних котлів тощо.

Але ці документи подають тільки принципові підходи до підтвердження відповідності і не містять відповідних процедур для їх реалізації (навіть у вигляді посилань).

З огляду на це, все актуальнішим стає питання розроблення нормативних документів, які регламентували б процедури контролю технічного стану та технічного діагностування об'єктів підвищеної безпеки і могли бути використані для підтвердження їх відповідності до вимог

безпеки. У нафтогазовому комплексі більшість таких об'єктів відпрацювала призначений термін служби, але це зовсім не означає, що вони досягли критичного стану або втратили працездатність. Часто до переходу об'єкта в граничний стан може пройти ще багато років, а регулярний контроль характерних для нього критеріїв забезпечуватиме безпечність експлуатації та попередження раптових відмов. Тому виникає проблема розробки конкретних методик контролю технічного стану, яка може бути успішно вирішена тільки кваліфікованими фахівцями в галузі неруйнівного контролю, на професійному рівні обізнаними зі специфікою розроблення та експлуатації об'єктів нафтогазового комплексу і які мають досвід розроблення нормативних документів принаймні галузевого рівня.

З іншого боку, статус такої методики як самостійного документа є абсолютно невизначеним, оскільки, згідно з нормативним документом, який встановлює правила, загальні принципи чи характеристики різних видів діяльності або їх результатів, може бути тільки стандартом, кодексом усталеної практики чи технічними умовами. Якщо взяти до уваги, що і кодекс усталеної практики, і технічні умови можуть бути стандартом або його частиною, то, очевидно, оптимальним варіантом можна вважати доведення згаданої методики до рівня стандарту. Тим більше, що на даному етапі саме стандарт є єдиним нормативним документом з чітко прописаною структурою. Практичний досвід показав, що найбільш доцільною для викладення положень стандарту з неруйнівного контролю є структура, наведена у таблиці 7.1.

Пропонована типова структура узгоджується з вимогами щодо змісту стандартів на продукцію, процеси, послуги та методи контролювання і може бути конкретизована щодо вимог положеннями інших стандартів. Наприклад, вимоги до ультразвукового контролю регламентуються ДСТУ EN 583-1-2001 [234], згідно з якими документ на проведення контролю

повинен містити опис виробу, що підлягає контролю, перелік нормативних документів, вимоги до кваліфікації і сертифікації персоналу, який виконує контроль; опис устаткування для контролю; положення контрольованого об'єкта, зони контролю та схему сканування; порядок підготовки сканованих поверхонь, навколишні умови, та калібрування і настроювання устаткування; опис і послідовність операцій контролю, визначення характеристик дефектів та критерії приймання; рівні оцінки і реєстрації та звіт про результати контролю.

Для визначення технічного стану об'єкта в більшості випадків необхідним і достатнім є проведення таких видів контролю: візуально-оптичний; вимірвальний; ультразвуковий (товщинометрія, дефектоскопія основного металу та зварних з'єднань), радіографічний (для зварних з'єднань), методом проникних речовин, а також контроль фізико-механічних характеристик (групи міцності, межі текучості, твердості металу) та стану роз'єднувальних (різбових) з'єднань прийнятними для цього методами.

Оскільки технічний стан об'єкта визначається за результатами аналізування результатів усіх проведених видів контролю, стандарт необхідно доповнити методикою проведення такої оцінки. Зважаючи на те, що за наявності тих чи інших відхилень контрольованих параметрів від нормованих значень, як правило, необхідно проводити відповідні розрахунки, в яких вхідними даними є певні геометричні, фізико-механічні й інші і характеристики контрольованого об'єкта, то доцільно навести й необхідні довідкові дані. Таким чином, за типову структуру стандарту з контролю технічного стану можна прийняти наведену у таблиці 7.1.

На підставі результатів, одержаних у процесі контролю, перевіряють відповідність значень параметрів об'єкта вимогам технічної документації, проводять необхідні розрахунки і визначають технічний стан об'єкта у даний

момент часу, надаючи йому статусу справного, несправного, працездатного, непрацездатного тощо, і засвідчуючи це відповідними документами.

Таблиця 7.1 – Типова структура стандарту з неруйнівного контролю об'єкта

Назва та зміст структурного елемента
<i>Загальні та технічні структурні елементи</i>
1 Сфера застосування
2 Нормативні посилання
3 Терміни та визначення понять
4 Позначки та скорочення
<i>Технічні вимоги до об'єкта стандартизації</i>
5 Загальні вимоги
5.1 Види та обсяги контролю
5.2 Вимоги до організацій та персоналу, які здійснюють контроль
5.3 Вимоги до засобів контролю
5.4 Вимоги з охорони праці та екологічної безпеки під час виконання контролю
5.5 Вимоги до організації робіт
6 Аналіз технічної та оперативної документації щодо об'єкта контролю
7 Методика ультразвукового контролю
7.1 Зони контролю та види дефектів, які мають виявлятися
7.2 Апаратура, інструменти, устаткування
7.3 Підготовка до проведення контролю
7.4 Процедури контролю (опис і послідовність операцій; рівні оцінки, визначання характеристик дефектів)
7.5 Критерії відбракування
8 Оформлення результатів контролю
<i>Довідкові додатки</i>
Додаток А. Норми часу на проведення контролю
Додаток Б. Форми документів, що надаються за результатами контролю

Необхідно зауважити, що форми документів, які надаються за результатами контролю, повинні узгоджуватись з вимогами наглядових органів як за рівнем (технічний висновок, акт чи протокол), так і за порядком їх офіційного засвідчення (сертифікованим фахівцем другого або третього рівня, технічним експертом за напрямком тощо).

Розробці нормативних документів на рівні державних і галузевих стандартів на методи і засоби неруйнівного контролю, які базуються на методах визначення кореляційних зв'язків між контрольованими характеристиками якості та інформативними сигналами фізичного поля, приділяється велика увага. Сучасні засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики дають змогу проводити контроль із записом його результатів у реальному масштабі часу на носіях ПЕОМ.

Раніше і тепер цими питаннями займаються провідні академічні та галузеві інститути. На базі проведених досліджень напрацьована чітка система державних стандартів управління якістю продукції з використанням неруйнівних методів контролю. Ці документи лягли в основу галузевих стандартів, інструкцій, методик, технологічних карт контролю, стандартів підприємства.

Розробка стандартів з контролю технічного стану, затвердження їх на державному і галузевому рівнях та погодження їх з наглядовими органами дало б можливість класифікувати такі документи, як атестовані методики, придатні для підтвердження відповідності та сертифікації проконтрольованих об'єктів.

Для вирішення питань розроблення нормативних документів при інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона Держстандартом України створено технічний комітет ТК-78 "Неруйнівний контроль і технічна діагностика" та ТК 146 „Матеріали, устаткування технології і споруди для нафтогазової промисловості” створений при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу.

Увесь неруйнівний контроль повинен бути забезпечений нормативними документами, які можна розділити на:

1) Документи, які нормують:

- параметри і технічні характеристики засобів неруйнівного контролю;

- методи приймання і випробування засобів неруйнівного контролю;

- методи і засоби перевірки засобів неруйнівного контролю.

2) Документи, які регламентують:

- вимоги до персоналу, який проводить контроль;

- технічні вимоги до якості контрольованого виробу;

- вимоги до апаратури контролю, в тому числі і до стандартних зразків підприємства;

- критерії відбракування;

- методи і прийоми проведення контролю;

- періодичність проведення неруйнівного контролю;

- алгоритм дій дефектоскопіста з проконтрольованим виробом.

Таким чином, за останнє десятиліття, основні результати науково-дослідної щодо розроблення акустичних методів та засобів неруйнівного контролю були впроваджені шляхом розроблення ряду нормативних документів різних рівнів:

1) СОУ 60.3-31570412-027:2007 Магістральні нафтопроводи. Нафтоперекачувальні станції, морські термінали, технічний огляд, експертне обстеження технологічного устаткування і трубопроводів. Методи та методики;

2) ДСТУ 4615:2006 Магістральні трубопроводи. Деталі сталеві приварні на Ру до 10 МПа. Загальні технічні умови;

3) ДСТУ 4616:2006 Магістральні трубопроводи. Деталі сталеві приварні на Ру до 10 МПа. Типи, основні параметри та розміри;

- 4) СОУ 60.3-30019801-067:2009 Магістральні газопроводи. Оцінка фактичного технічного стану потенційно небезпечних діляниць. Методи і методики;
- 5) СОУ 60.3-31570412-028:2007 Магістральні нафтопроводи. Нафтоперекачувальні станції, продовження терміну експлуатування технологічного устаткування і трубопроводів за результатами технічного огляду, експертного обстеження. Правила та порядок;
- 6) СОУ 11.2-20077720-026:2007 Свердловини на газ і нафту. Розрахунок колон насосно-компресорних труб;
- 7) СОУ проект "Магістральні нафтопроводи. Підводні переходи. Правила технічного експлуатування";
- 8) ДСТУ EN 10301:2009 Сталеві труби та фітінги для наземних та морських трубопроводів. Внутрішні покриття для зменшення тертя під час транспортування некорозійного газу;
- 9) ДСТУ ISO 10405:2010 Нафтова і газова промисловість. Обслуговування та використання обсадних і насосно-компресорних труб;
- 10) ДСТУ ISO 10417:2010 Нафтова і газова промисловість. Системи свердловинних запобіжних клапанів. Проектування, встановлювання, експлуатування і відновлювання;
- 11) ДСТУ ISO 10424-1:2010 Нафтова і газова промисловість. Устаткування для роторного буріння. Частина 1: Елементи бурильної колони для роторного буріння;
- 12) ДСТУ EN ISO 10427-1:2009 Нафтова і газова промисловість. Устаткування для цементування свердловин. Частина 1. Пружинні центратори обсадних колон;
- 13) ДСТУ EN ISO13534:2008 Нафтова і газова промисловість. Устаткування для буріння та видобування. Обстежування, технічне обслуговування, ремонт та відновлювання підйимального устаткування;
- 14) ДСТУ EN ISO 13535:2008 Нафтова і газова промисловість. Устаткування підйимальне для буріння та

видобування. Загальні технічні вимоги та методи випробування;

15) ДСТУ EN ISO 13625:2008 Нафтова і газова промисловість. Устаткування для буріння та видобування. З'єднання водовіддільних колон для морського буріння;

16) ДСТУ ISO 13628-1:2011 Нафтова і газова промисловість. Проектування і експлуатування систем підводного видобування. Частина 1. Загальні вимоги та рекомендації;

17) ДСТУ ISO 13628-2:2011 Нафтова і газова промисловість. Проектування і експлуатування систем підводного видобування. Частина 2. Системи гнучких труб багат шарової структури без сполучених шарів для підводного і морського застосування;

18) ДСТУ ISO 13628-3:2011 Нафтова і газова промисловість. Проектування та експлуатування систем підводного видобування. Частина 3. Системи прохідних викидних трубопроводів (ПВТ);

19) ДСТУ EN ISO 13703:2008 Нафтова і газова промисловість. Проектування і встановлення трубопровідних систем на морських експлуатаційних платформах. Загальні вимоги;

20) ДСТУ ISO 14310:2010 Нафтова і газова промисловість. Свердловинне устаткування. Пакери та пакер-пробки;

21) ДСТУ EN ISO 15136-1:2009 Свердловинне устаткування для нафтової і газової промисловості. Установки насосні гвинтові для механізованого видобування. Частина 1. Насоси;

22) ДСТУ EN ISO 15761:2009 Сталеві клинові та дискові засувки і перекивні клапани розміром dn 100 і менше для нафтової і газової промисловості.

ВИСНОВКИ

1. Світовий та вітчизняний досвід показує, що акустичні методи неруйнівного контролю завдяки низці переваг (ефективність під час виявлення внутрішніх дефектів із малим розкриттям тріщини, чутливість до зміни структури і фізико-механічних характеристик матеріалів, висока продуктивність контролю об'єктів безпосередньо у виробничих умовах, безпечність засобів для обслуговуючого персоналу та інше) знайшли широке застосування в різних галузях економіки: енергетиці, машинобудуванні, нафтогазовій промисловості, будівництві, транспорті. Найпоширенішим (до 90%) є луно-імпульсний метод акустичного контролю.

2. У результаті виконаних авторами теоретичних науково-дослідних і дослідницько-конструкторських робіт одержано такі основні результати:

- досліджено особливості акустичного контролю конструкцій устаткування і споруд у нафтогазовій галузі, яке в переважній більшості (понад 80%) є криволінійної форми. Зокрема, встановлено закономірності поширення ультразвукових коливань у циліндричних виробках, матеріал яких знаходяться в попередньо-напруженому стані. На цій основі розроблено оригінальні дефектоскопічні і товщиноміри об'єктів криволінійної форми, а також способи і засоби контролю якості згвинчування (визначення діючих напружень) різьбових з'єднань різних конструкцій з натягом;

- розроблено нові способи підвищення чутливості акустичного контролю трубних виробів, суть яких полягає як у збільшенні частини акустичної енергії, що генерується п'єзоперетворювачем в об'єкт контролю, так і в спеціальних алгоритмах виділення корисних акустичних сигналів за співвідношення сигнал/шум менше 1;

- удосконалено методи та засоби безконтактного акустичного контролю матеріалів і виробів;

- досліджено та адаптовано до завдань нафтогазової галузі новітню технологію акустичної дефектоскопії трубопровідних систем із використанням низькочастотних спрямованих хвиль і так званого сухого контакту без застосування додаткових змочувальних матеріалів. Дана технологія може використовуватися для оцінки місця, розмірів і ступеня корозійного ураження стінки трубопроводу на відстані 15 м і більше від місця встановлення п'єзоперетворювачів.

3. З метою розширення меж застосування акустичних методів контролю необхідно розробляти чи гармонізувати з європейськими і світовими нормативні документи. Як приклад:

4. Основними напрямками, що вимагають проведення подальших теоретичних і дослідно-експериментальних досліджень є:

- підвищення чутливості методів і засобів безконтактного акустичного контролю матеріалів та виробів;
- розроблення нових методів оброблення дефектоскопічної інформації, в першу чергу для виділення корисних акустичних сигналів за високого рівня завад;
- удосконалення методів ідентифікації типів дефектів, виявлених акустичними методами, що дасть змогу підвищити ефективність контролю об'єктів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року : від 15.03.2006р. № 145-р / Розпорядження Кабінету Міністрів України - Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua>.
- 2 Карпаш О.М. Технічна діагностика систем нафтогазопостачання: навчальний посібник / Карпаш О. М., Возняк М. П., Василюк В. М. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 314 с.
- 3 Акользин П. А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования / Акользин П. А. – М: Энергоиздат, 1992. – 303 с.
- 4 Болотов А. С. Коррозионное растрескивание на магистральных газопроводах / А. С. Болотов // Газовая промышленность. – 1994. - №6. С. 3 - 10.
- 5 Коллакот Р. Диагностика повреждений // Пер. с англ.-М.: Мир.-1989.- 512 с.
- 6 ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.
- 7 ДСТУ 2925-94 Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення.
- 8 Системная надежность трубопроводного транспорта углеводородов / Под ред. Черняева В.Д. - М.: Недра, 1997 - 517 с., ил.
- 9 Васильев Ю.Н., Бакунин В.М., Миртыусян Я.С. // Протекторная защита обсадных и буровых труб. ОИ. – Вып. 2. – М., 1984. – 51с.
- 10 Why drill pipe failures must be curtailed? – “World Oil”, 1971, V173 1/VIII, №2. – P. 57-60.
- 11 Мулеман Т., Плотель С.Г., Серенко И.А. Анализ аварийности в некоторых районах глубокого бурения // РНТС, ВНИИОЭНГ. Сер.: Бурение. – 1973. - №11. С. 5-9.

- 12 Козаченко Н.И. Вопросы надежности бурильных колон // Обзор. техн. и технол. геол. развед. работ: орг. производства. – М.: ВИЭМС, 1978. – 37с .
- 13 Янышировский М.Я. Прогнозирование усталостной долговечности бурильных колон: Автореф. дисс. канд. тех. наук. – М., 1989. – 24 с.
- 14 Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование. – Екатеринбург, 2002. – 356 с.
- 15 Дубленич Ю.В., Нионович И.А., Кесельман А.Я. Анализ разрушений замковых резьб утяжеленных бурильных труб. / Э.И. Машины и нефтяное оборудование. – М., 1986. – Вып. 2. – С. 10-12.
- 16 Воронежский М.К., Романуха Д.А., Дитчук В.М. Результаты применения неразрушающего контроля качества труб // Бурение. – 1981. №7. – С. 12-13.
- 17 Северинчик Н.А., Копей Б.В. Коррозионно-усталостная прочность бурильных труб и способы ее повышения // Тематические научно-технические обзоры. – М.: ВНИИОЭНГ, 1977.
- 18 Карпаш О.М. Методи та засоби забезпечення робото здатності трубних колон: Автореф. дис. докт. тех. наук. – Івано-Франківськ, 1996. – 47 с.
- 19 Міцність та довговічність нафтогазового обладнання ; [під ред. В.І. Похмурського, Є.І. Крижанівського.] – Львів – Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – 1193 с.
- 20 Трубопровідний транспорт газу / За ред. М.П.Ковалка. – К.: Агенство з раціонального використання енергії. - 2002. - 600 с.
- 21 М. Д. Середюк , Й. В. Якимів, В.П. Лісафін. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів.- 2001.- 517с., іл.

- 22 Мазур И. И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. - М.: ИЦ Елима, 2004. – 1104 с., ил.
- 23 Контроль неразрушающий. Классификация методов : ГОСТ 18353-79. – [Чинний від 1980-07-01] – М.: Госстандарт СССР, 1980. – 12 с.
- 24 Контроль неруйнівний. Терміни та визначення : ДСТУ 2865-94. – [Чинний від 1996-01-01] – К.: Держспоживстандарт України, 1996. – 56 с.
- 25 Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник ; [под ред. В. В. Клюева]. – [2-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1986, – 488 с. – (в 2-х кн., кн. 1).
- 26 Неразрушающий контроль. : практ. пособие / [И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.П. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова.] – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с. – ("Акустические методы контроля» : в 5 кн., кн. 2).
- 27 Белокур И. П. Дефектоскопия материалов и изделий / И. П. Белокур, В. А. Коваленко. – К.: Тэхніка, 1989. – 192 с.
- 28 Алешин Н. П. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий : учеб. для ПТУ / Н. П. Алешин, В. Г. Щербинский. – М.: Высш. шк., 1991. – 271 с.
- 29 Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. / И.Н. Ермолов – М.: Машиностроение, 1981. – 240с.
- 30 Сароян А.Е. Теория и практика работы буровой колонны.– М.: Недра, 1990. – 263 с.
- 31 Recommended Practice for Care and Use of Casing and Tubing. API recommended practice 5C1(RP 5C1), fifteenth edition, May 31, 1987.
- 32 Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. – К.: Техніка, 1972. – 460 с.

- 33 Неразрушающий контроль материалов и изделий. Справочник. Под ред. Г.С.Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
- 34 Троїцький В.О., Загребельний В.І. Розробка технологій, методів і сучасних засобів технічної діагностики та неруйнівного контролю // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1997. - № 4. - С. 8 – 12.
- 35 Выборнов В.И. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с.
- 36 Методы акустического контроля металлов / Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х. и др. / Под ред. Н.П.Алешина. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
- 37 Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И.П.Голямина.–М.:Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
- 38 Ультразвуковой контроль материалов. Справочное издание. Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. - М.: Металлургия, 1991, 752 с.
- 39 Механіка руйнівань і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під загальною ред. В.В. Панасюка. Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т. Назарчука. - Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2001. - 1134 с.
- 40 Зінчак Я.М., Вісков О.В., Кійко Л.М. Сервісні пристрої для ультразвукової дефектоскопії обладнання в польових умовах // Матеріали науково-технічної конф. „Сучасні прилади, матеріали та технології для технічної діагностики й неруйнівного контролю нафтогазового, хімічного та енергетичного обладнання, сучасний підхід до підготовки спеціалістів з НК і ТД”. - Івано-Франківськ: - 1996. – С. 22-24.
- 41 Карпаш О.М., Криничний П.Я., Вісков О.В, Молчанов М.О. Мобільні засоби комплексного неруйнівного контролю якості труб нафтового сортамента // Матеріали

- 4-ї міжнар. наук.-практ. конф. „Нафта і газ України”. - Івано-Франківськ: - 2000. – С. 257-258.
- 42 Карпаш О.М., Зінчак Я.М., Кійко Л.М., Цюцяк І.І., Козоріз А.В. Надання послуг з неруйнівного контролю та технічної діагностики в світлі вимог системи якості НВФ «Зонд»// Тези. доп. на 4 Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання». - Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. - С. 67 – 71.
- 43 Gray, Don E., Stanley R.K.: Nondestructive evaluation: a tool for design, manufacturing, and service. New York: McGraw-Hill Book Company 1989
- 44 Ермолов И.Н. Амплитуда эхосигнала от угловых отражателей // Дефектоскопия. - 1997. № 1. - С. 3 – 11.
- 45 Неразрушающий контроль. В 5-ти кн. Кн.1. Общие вопросы. Практическое пособие. / Под ред. Сухорукова В.В. - М.: Высш. школа, 1992. - 242 с. Илл.
- 46 К вопросу о чувствительности методов к выявлению усталостных трещин / Заклунный А.И., Фельдман Л.С., Сабадаш А.И. и др.//Дефектоскопия, 1977, N 2, с. 123-125.
- 47 Сыркин М.М. Повышение достоверности автоматизированного ультразвукового контроля // Дефектоскопия – 2003, № 2. – С.11-23.
- 48 Розробка керівного нормативного документу “Інструкція по проведенню неруйнівного контролю труб нафтового сортаменту”: Звіт про НДР (проміжний) / НВФ “Зонд”. - № держреєстрації 0195U008513. –Івано-Франківськ, 1995. – 90 с.
- 49 В.А.Бархатов. Развитие методов ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений // Дефектоскопия, - 2003, №1. – С.28-55.
- 50 Требин А.Г., Гнедов Д.В. Методы и средства неразрушающего контроля нефтепромысловых труб,

- применяемые инспекционными компаниями США. - Тр. ВНИИТнефть.// Нефтепромысловые трубы. - Вып. 5, с. 128-136. - Куйбышев, 1974.
- 51 The Inspection Services. How good are they Drilling, 1988, v. 58, №5, p. 73-78.
 - 52 Tuboscope Mill Inspection Systems. Top Quality Tubular Flaw Detection, Look Catalog. Houston, Texas, 1992-1993, USA.
 - 53 Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits. API recommended practice 7G(RP 7G), Twelfth edition, May 1, 1987.
 - 54 Specification for Drill Pipe (Combination of Former Specs 5A and 5AX Drill Pipe Requirements). API Specification 5D (SPEC 5D), first edition, March 15, 1988.
 - 55 Specification for Casing and Tubing. (Combination of Former Specs 5A, 5AC, 5AX and 5AQ-Casing and Tubing Requirements). API Specification 5CT(SPEC 5CT), first edition, March 15, 1988.
 - 56 Эванс Дж. Р., Берман Б. Маркетинг. Сокр. Пер. с англ.— М. Экономика, 1993—335с.
 - 57 Приницкий А. А., Цеслер Л. Б., Саворовский Н. С. Обзор достижений зарубежной техники в области ультразвуковых и электромагнитных методов контроля.— М.: Машиностроение, 1976, с. 56.
 - 58 В.І.Михайленко, Н.П. Горулько. Портативна дефектоскопічна установка ПДУ-1СП для ультразвукового контролю критичних ділянок бурильних труб при спуско-підйомних операціях. – С. 259 – 260 // Збірн. наук. праць 6-ї Міжнар. Наук.-практ. Конф.»Нафта і газ України – 2000». Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада 2000 р.: У 3-х томах. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. Том. 3. – 412 с.
 - 59 А.Б. Ринкевич, Я.Г. Смородинский. Анализ параметров и технических характеристик современных ультразвуковых

- дефектоскопов общего назначения // Дефектоскопия. – 2002, №9. – с. 3-26.
- 60 Кубарев А.И. Технический контроль и испытания. Требования стандартов ИСО серии 9000 к контролю и испытаниям // Контроль. Диагностика. - М.: ВНИИНМАШ. - 1999. - № 6. - С. 41 – 50.
- 61 Шрайбер Д. С. Контроль изделий сложной формы ультразвуковым эхометодом.—М.: Машиностроение, 1977.—32с.
- 62 Измайлов Л.Б. Современные способы предупреждения повреждений обсадных колонн. – Бурение, М., ВНИИОЭНГ, 1978.
- 63 Распространение высокочастотных упругих волн в телах с неоднородными начальными напряжениями / Карпаш О.М., Мигаль И.Г., Подильчук Ю.Н., Рубцов Ю.К. // Прикладная механика, 1991, № 11, т. 27, с. 34-43.
- 64 Карпаш О.М., Рубцов Ю.К. Уточненный анализ отражения пучков высокочастотных упругих волн при поперечном распространении в цилиндрических волноводах // Междунар. научн. журнал “Прикладная механика”, т.30/40/№ 3, март 1994.
- 65 Карпаш О.М., Даниляк Я.Б, Кійко Л.М. Про один з підходів до прогнозування ресурсу труб нафтового сортаменту // Тези наук.-техн.конф. професорсько-викладацького складу Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу. – Ч. 2. – Івано-Франківськ. – 1997.
- 66 Криничний П.Я., Карпаш О.М., Кійко Л.М. Ультразвукова дефектоскопія різевих з'єднань обважнених бурильних труб в зібраному стані // Методи та прилади контролю якості. – 2000. - № 6. – С. 9 – 12.
- 67 Карпаш О., Криничний П., Крижанівський Є., Мигаль І., Рибчич І., Зінчак Я. Неруйнівний контроль труб

- нафтового сортаменту: Навч. підруч. - Івано-Франківськ.: Факел, 2001. - 380 с.: іл.
- 68 Мочернюк Д.Ю. Исследование и расчет резьбовых соединений труб, применяемых в нефтегазодобывающей промышленности. - М.: Недра, 1970.
 - 69 Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые соединения. - М.: Машиностроение, 1973. - 253 с.
 - 70 Lubinski A. Fatigue of Range Drill Pipe. *Revue de L'Institut Francais du petrole*, 1977, v. XXXII, #2, p. 209-231188.
Markyama K. Stress Analysis of a Boll - Nut Joint by the Finite Element Method and the Copper - Electroplating Method. "Bulletin of the ISME", April, 1976, vol. 19, #130, p. 360-368.
 - 71 РД-39-013-90. Инструкция по эксплуатации бурильных труб. - Куйбышев: ВНИИТнефть, 1990. - 228 с.
 - 72 А.с. 1677620 Устройство для ультразвукового контроля труб / Карпаш О.М., Ковалив Б.И., Турко Ф.И., Манеркин В.Н. - 1991, БИ № 34.
 - 73 К вопросу о стабилизации угла ввода ультразвуковых колебаний / Карпаш О.М., Турко Ф.И., Мигаль И.Г., Бажалук Я.М. // Дефектоскопия, 1988, N 6, с. 44-48.
 - 74 А.с. 869467 Способ повышения чувствительности при ультразвуковом контроле трубных изделий / Карпаш О.М., Бажалук Я.М., Турко Ф.И. - 1978, БИ.
 - 75 Мигаль И.Г., Карпаш О.М. К вопросу о неразрушающем контроле бурильных труб с трапецеидальной резьбой.-Тр. ВНИИТнефть, Куйбышев, 1981, вып.13, с. 81-84
 - 76 А.с. 1783417 Устройство неразрушающего контроля цилиндрических изделий / Карпаш О.М., Ковалив Б.И. - 1992, БИ № 47.
 - 77 Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1980. - 288 с.

- 78 Химченко А.В., Бобров В.А. Неразрушающий контроль в химическом и нефтяном машиностроении. - М.: Машиностроение, 1978. - 246 с.
- 79 Березовский Л.Б., Химченко Н.В. О прохождении ультразвуковых колебаний через напряженную слоистую среду. // Химическое машиностроение, Сб. научн. трудов НИИХИММАША, вып. 67, 1974, с. 140-157.
- 80 Wiegand H. Beelich K. H. Relaxation berkalten hochfester Schraubenverbindungen, "Konstruktion", 1965, 17, #8.
- 81 А.с. 1224550 Устройство для контроля диаметального натяга трубных изделий / Карпаш О.М., Антонюк Д.Ф., Турко Ф.И., Мигаль И.Г., Осецкая А.В., Футерко Л.Б., Шевчук В.В. - 1986, БИ № 14.
- 82 Кулагин Ю.В. Контроль контактного давления в продольнопрессовых соединениях с помощью ультразвука. - М.: ГОСИНТИ, 1967. - 34 с.
- 83 Бобренко В.М.б Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин. - Кишинев: Штиинца, 1981. - 147 с.
- 84 Benson R.W. Realsen V.G. Acoustoclasticity. - Product Engineering. 1959, 20p 56-56.
- 85 Хекл.Х., Мауэ А., Вестифаль К. Теория дифракции. - М.: Мир, 1964. - 428 с.
- 86 Мигаль И.Г., Карпаш О.М. Ультразвуковой контроль качества сборки бурильных труб с трапецеидальной резьбой // Нефтяное хозяйство, 1981, № 10, с.17-19.
- 87 А.с. 1719980 Способ ультразвукового контроля контактных напряжений / Карпаш О.М., Бажалук Я.М., Молчанов Н.А., Смерека А.С. - 1992, БИ № 14.
- 88 Карпаш О.М., Кійко Л.М., Даниляк Я.Б., Молодецький І.А. Про один з підходів до контролю якості різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту // Техническая

- діагностика и неразрушающий контроль. – 1996. - №4. – С. 58-61.
- 89 Карпаш О.М., Петришин И.С., Зинчак Я.М. К вопросу о метрологическом обеспечении специализированных средств неразрушающего контроля // Тезисы докладов “Неразрушающие методы контроля в народном хозяйстве”. - Рига: ЛатНИИИТИ, 1986.
- 90 А.с. 1728782 Способ ультразвукового контроля качества сборки соединений с натягом/КарпашО.М.-1992,БИ № 23.
- 91 А.с. 1767373 Способ контроля качества сборки резьбовых соединений / Карпаш О.М., Турко Ф.И. - 1992, БИ № 15.
- 92 Кажис Р.Й. Ультразвуковые информационно-измерительные системы.-Вильнюс:Мокслас,1986. – 216 с.
- 93 Карпаш О.М., Степура А.И. Повышение точности ультразвукового метода оценки величины контактных давлений в резьбовых соединениях // Дефектоскопия, 1993, № 11.
- 94 А.с. 1746297 Ультразвуковое устройство для измерения контактных давлений / Карпаш О.М., Ильницкий Й.И., Степура А.И. - 1992, БИ № 25.
- 95 Vetco Inspection Division. Prospect 1989-1990 (USA).
- 96 Seckler B.D. Keller I.B. Geometrical theory of diffraction in inhomogeneous media // I. Acoust Soc. Amer. - 1959. - 31, #2. - p. 192-205.
- 97 Зароченцев Е.В., Орел С.М., Степанчук Ю.С. Упругие постоянные высших порядков. Общая теория. - Донецк: Препринт / АН УССР. Донец.физ.-техн. ин-т, № 12 120, с. 26, 1986.
- 98 Wallace D.C. Thermoelastic theory of stressed crystals and higher-order elastic constants //Solid State Phys. - 1970. - 25. - p. 301-404.
- 99 Подильчук Ю.Н., Рубцов Ю.К. Лучевые методы в теории распространения и рассеяния волн. - К.: Наукова думка, 1988. - 220 с.

- 100 Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика не однородных сред. - М.: Наука, 1980. - 304 с.
- 101 ДСТУ Б В.2.7-73-98. Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови.
- 102 Шевалдыкин В.Г. Способ адаптации к качеству поверхности изделий при ультразвуковой толщинометрии металлов. //Труды 14-й Рос. научн.-техн.конф. “Неразрушающий контроль и диагностика” . – М.: Изд-во МГУ, 1997. - С. 112.
- 103 Щербинский В.Г. Влияние акустической прозрачности стохастического контактного слоя на выявляемость дефектов при ультразвуковом контроле //Труды Междунар. научн.-техн.конф. “Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования” . – Харьков: ХТУРЭ, 1998. - С. 167 –170.
- 104 Малыгин И.В. Коды, коды, коды... // Технология и средства связи. – 1999. - № 3. – С. 53 – 57.
- 105 Карпаш О.М., Зинчак Я.М., Криничный П.Я., Даниляк Я.Б. Состояние и перспективы развития неразрушающего контроля и технической диагностики бурильного инструмента и бурильного оборудования // ТДНК, 1996. – №2. – с.52-55.
- 106 Карпаш О.М., Криничный П.Я, Козоріз А.В. Автоматизований комплекс неруйнівного контролю бурового інструменту АКНК-1 // Методи та прилади контролю якості, 2000. – №6. – с. 15-18.
- 107 В.М.Веревкин, Н.Н.Егоров, Р.Н.Золотухо, В.А.Каширин, В.В.Ковалев, И.А.Кривочуров, В.К.Манчха, И.Э.Махов, А.А.Ряднов, С.В.Титов, К.Э.Тоом. Установка ДУЭТ-5 для ультразвукового контроля толстолистового проката // Дефектоскопия. – 1999. – №6. – С.68-77.
- 108 В.И. Уваров, А.С. Седыхов, С.С. Сароянц. Определение оптимальных углов ввода ультразвуковых колебаний при

- контроле бесшовных толстостенных труб // Дефектоскопия, 2001. – №7. – с. 64-57.
- 109 Ермолов И.Н. Оценка развития дефекта по высоте // Дефектоскопия. – 1996. № 4. – С. 63- 69.
- 110 Ермолов И.Н., Воронков В.А. К измерению условной протяженности дефекта // Дефектоскопия. – 1996. - № 3. – С. 58 – 61.
- 111 Карпаш О.М., Криничний П.Я, Козоріз А.В. Контроль екстремальних значень товщини стінки труб нафтового сортаменту // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №4. – С.47–49.
- 112 Козоріз А.В. Апроксимація форми поперечного контуру труб нафтового сортаменту // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – №8. – С. 90–91.
- 113 Способ ультразвукового контроля размеров труб: А. с. 699794 СССР, МКИ 173 G 01 B 17/00 / Я.М. Бажалук, М.И. Бучик, Р.В. Громов, О.М. Карпаш и другие. – №2456540/25-06; Заявлено 28.12.76; Опубл. 15.08.79, Бюл. №30. – 3 с.
- 114 Пат. UA 67342 А України, МКИ G01B17/02. Спосіб акустичного контролю геометричних характеристик внутрішньої поверхні труб / Карпаш О.М., Векерик В.В.; НВФ „Зонд”, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – №2003098122; Заявл. 01.09.2003; Опубл. 15.06.2004, Бюл. №6. – 5 с.
- 115 Гурвич А.К., Ермолов И.Н., Алешин Н.П. Неразрушающий контроль. В 5-ти кн. Кн. 2. Акустический контроль. Практическое пособие. – М.: Высшая школа, 1993. – 339 с.
- 116 Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с.

- 117 ГОСТ 26266-90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 24 с.
- 118 Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи: Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 419 с.
- 119 Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Ермолов И. Н., Гитис М.Б., Королев М. В. / Под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
- 120 Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х книгах. Кн.2 / Под ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
- 121 Сенюткин П.А., Чинейкина Е.Ф. Отбор пьезоэлементов при изготовлении пьезоэлектрических преобразователей // Дефектоскопия. – 2003. – №2. – С. 36–38.
- 122 Данилов В.Н., Королев В.Д. К вопросу о выборе параметров протекторов прямых совмещенных преобразователей. // Дефектоскопия. – 2002. – №1. – С. 71–77.
- 123 Карпаш О. М. Можливість застосування електромагніто-акустичних перетворювачів для неруйнівного контролю труб нафтового сортаменту в польових умовах / О. М. Карпаш, П. Я. Криничний, О. В. Вісков // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання : наук.-техн. конф. та вист : матеріали III . - Івано-Франківськ, – 2002. – С. 67 – 69.
- 124 Білокур І. П. Основи дефектоскопії : [підручник] / І. П. Білокур. – К.: Азимут-Україна, 2004. – 496 с.
- 125 J. David. Fundamental and Application of Ultrasonic Waves / J. David, N. Cheeke // CRC Series in Pure and Applied Physics. CRC Press LLS. – 2002. – 453 p.

- 126 Curie J., Curie P. Development par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémédres à faces inclinées. Bulletin no. 4 de la Société Mineralogique de France, 3 90 and C.R. Acad. Sc. Paris, 91, 294p.
- 127 Richardson, R.L. Apparatus for Warning a Ship at Sea of its Nearness to Large Objects wholly or partially under Water : British Patent Specification, 11,125, March 27, 1913.
- 128 Palmer S. B. Laser-Based Non-Destructive Testing Techniques / Palmer, S.B., Aindow, A.M., Scruby, C.B // Subsurface Flaws, NDT International, - 1984. – v. 15, P. 239 – 245.
- 129 Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля / Ю. М. Шкарлет. – М.: Машиностроение, 1974. – 57 с.
- 130 Kawashima K. Experiments with two types of electromagnetic ultrasonic transducers / Kawashima K // Acoust. Soc. Amer. – 1976, – №2, P. 365 – 373.
- 131 Kawashima K. Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radially polarized transverse wave) / Kawashima K., McClung R. // Mater. Eval., – 1976, – №4, P.81–90.
- 132 Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / [Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Филинов В. Н. и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1995. – 448 с.
- 133 F. Montero de Espinosa. Spherically Focused Ultrasonic Transducer / F. Montero de Espinosa, D. E. Chimenti // International Journal of Applied Science and Engineering. – 2007. – №4. – P. 15 – 24.
- 134 Castaings M. Single sided inspection of composite material using air-coupled ultrasound / Castaings M., P. Cawley, R. Farlow, G. Hayward. // Journal of Nondestructive Evaluation. – 1998. – v.17. – P. 37 – 45.

- 135 Gomez T. E.. Air-Coupled Ultrasonic Scanner for Brile / T. E. Gomez, F. Montero, Ana P. Pozas // IEEE Ultrasonics Symposium. - 2001. p. 591.
- 136 F. Montero de Espinosa. High Sensitive Piezoelectric Transducers for NDE Air Borne Applications / F. Montero de Espinosa, T.E. Gomez, A. Albareda, R. Perez, J.A. Casals // IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. –1073 p.
- 137 Gomez T.E. Bridging the Gap of Impedance Mismatch Between Air and Solid Materials / T.E. Gomez, F. Montero // IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. – 1069 p.
- 138 Boyle R.W. The relation between the thickness of a partition in medium and its reflection of sound waves by the ultrasonic method / Boyle R.W. Lehmann J.F. // Phys. Rev., 2, Vol. 27, P. 518-523.
- 139 Теумин И. И. Ультразвуковые колебательные системы / И. И. Теумин – М.: МАШГИЗ, 1959. – 331 с.
- 140 Кажис Р.И. Исследование динамических свойств волнового канала ультразвуковых измерительных приборов / Кажис Р.-И., Таму лис А. // Научные труды вузов ЛитССР, Ультразвук, - 1984, №16, с. 3 – 19.
- 141 Kazys R.-J., Milius P.-B., Butkus J. Ultrasonic measuring system for the determination of thermal fluctuations in gas-discharge flow // Proceedings of the XV International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Minsk, 1981, pt 2, p. 991-999.
- 142 Sutilov V.A. Physik de Ultraschalls / Sutilov, V.A. // Wien, New York, Springer Verlag. - 1984. – 241 p.
- 143 Loh J., Moeglichkeiten zur Verbesserung von Luftultraschallsystemen, PhD-thesis, Fachbereich 6, Verfahrenstechnik, Technischen Universitaet Berlin, (1998).
- 144 Смажевская Е.Г. Пьезоэлектрическая керамика / Е.Г. Смажевская, Н.Б. Фельдман. – М.: Изд-во «Советское радио», 1971, – 200 с.

- 145 Gomez T.E.. Paper Characterization by Measurement of Thickness and Plane Resonances Using Air-Coupled Ultrasound / T.E. Gomez, B. Gonzalez, F. Montero // IEEE Ultrasonics Symposium, Munich (Germany). 8 -11 October, 2002. – P. 36.
- 146 Малов В.В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
- 147 A. Turo, Ultra-low noise front-end electronics for air-coupled ultrasonic non-destructive evaluation / A. Turo, J. Salazar, J. Chavez, H. Kichou, T. Gomez, F. Espinoza, M. Garcia-Hernandez // NDT&E International. – 2003. - #36. – P. 93 - 100.
- 148 Рибіцький І.В. Математична модель узгоджуючого шару п'єзоперетворювача та розрахунок втрат енергії акустичних коливань при безконтактному способі вимірювання товщини / І. В. Рибіцький // Методи та прилади контролю якості. – 2007. - № 18. – с. 40 – 45.
- 149 Гурвич А. К. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов / А. К. Гурвич, Л. И. Кузьмина. – К.: Техника, 1980. – 101 с.
- 150 Ермолов И. Н. Измерение диаграммы направленности в дополнительной плоскости / И. Н. Ермолов, А. А. Щербаков // Дефектоскопия. – 1996. - № 110. – с. 3 – 10.
- 151 S.P. Kelly. An Air-Coupled Ultrasonic Matching Layer Employing Half Wavelength Cavity Resonance / S.P. Kelly, G. Hayward, T.E. Gomez // IEEE Ultrasonics Symposium, 2001, - P. 965-968.
- 152 T.E. Gomez. Low-Impedance and Low-Loss Customized Materials for Air-Coupled Piezoelectric Transducers / T.E. Gomez, F. Montero de Espinosa // IEEE Ultrasonics Symposium, 2001. P. 1073-1080.
- 153 Патент на корисну модель UA 40002 U. Ультразвуковий перетворювач для безконтактного вимірювання товщини

- матеріалів при використанні повітряно-акустичного зв'язку / Карпаш О.М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О. (Україна). – Опубл. 25.03.2009р, Бюл. № 6, 2009 р.
- 154 Патент на винахід UA №90007. Акустичний спосіб безконтактного контролю глибини корозійного пошкодження трубопроводів / Карпаш О.М., Карпаш М.О., Рибіцький І.В., Котурбаш Т.Т., (Україна). – Опубл. 25.03.2010, Бюл. №6, 2010 р.
- 155 S.Dixon, C.Edwards, S.B.Palmer. High accuracy non-contact ultrasonic thickness gauging of aluminium sheet using electromagnetic acoustic transducers. *Ultrasonics*, Vol.39, Issue 6, October 2001, pages 445-453.
- 156 Качанов В.К. Использование радиолокационных сигналов и методов их обработки в ультразвуковой дефектоскопии композиционных материалов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1995, №2. – С. 3-17.
- 157 D. Pagodinas. Ultrasonic signal processing methods for detection of defects in composite materials /D. Pagodinas// *Ultragarsas*, №4 (45). 2002. P.47-54.
- 158 Благітко Б. Виділення сигналу з суміші сигнал-шум за допомогою вейвлет-перетворення / Б. Благітко, В. Бригілевич, І. Ярмолівський // *Вісник Львів. УН-ТУ Серія фізична*. 2006. Вип. 39. с. 300-306.
- 159 A. Khireddine , J.P Salvestrini Signal Processing Techniques for the Characterization Ultrasound Complex Materials *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 5 December, 2009.
- 160 Wooh S.C., Wei C. Cepstrum-based deconvolution of ultrasonic pulse-echo signals from laminated composite materials. *Proceedings of the 12th Engineering Mechanics Conference: A Force for the 21st Century*. American Society of Civil Engineers. La Jolla, CA, May 17-20 1998.
- 161 M. Thavasimuthu. Improving the evaluation sensitivity of ultrasonic pulse echo technique using a neural network

- classifier / M. Thavasimuthu, C. Rajagopalan, P. Kalyanasundaram, Baldev Raj // NDT&E International. – 1996. Vol. 29, No. 3, P. 87-93.
- 162 Ewa Swiercz. A new method of detection of coded signals in additive chaos on the example of Barker code / Ewa Swiercz // Signal Processing 86. – 2006. P. 153 –170.
- 163 Grennberg A., Sandell M. Estimation of subsample time delay differences in narrowband ultrasonic echoes using the Hilbert transform correlation. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1994. Vol.41. No.5. P.588-595.
- 164 О.М. Карпаш, І.В. Рибіцький, М.О. Карпаш. Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. - № 2. – С.31-35.
- 165 Ik Keun Park, Un Su Park , Hyung Keun Ahn, Sook In Kwun, Jai Won Byeon Experimental Wavelet Analysis and Applications to Ultrasonic Non-destructive Evaluation PROCEEDINGS 15th World Conference on Non-Destructive Testing 2000 in Rome.
- 166 Kwong Ki Yau Split-Spectrum Processing for Nondestructive Testing NDTnet - August 1997, Vol.2 No.08.
- 167 Barry Lennox, Gary A. Montague, Andy M. Frith, Chris Gent, Vic Bevan. Industrial application of neural networks – an investigation // Journal of Process Control. – 2001. – Vol. 11. - P. 497-507.
- 168 В.М. Учанін, М.О. Карпаш. Застосування нейронних мереж для ідентифікації та оцінки параметрів дефектів вихрострумовим методом // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів: Зб. наук. пр. – 2002. – Вип. 7. – С. 67-72.3. Zgonc K., Achenbach J.D. A neural network for crack sizing trained by finite element

- calculations // NDT & E International, Vol. 29, No. 3, pp. 147-155, 1996. 4. Mohammed E. Haque, K.V. Sudhakar. ANN back-propagation prediction model for fracture toughness in microalloy steel. International Journal of Fatigue 24 (2002) 1003–1010.
- 169 Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский ; [пер. с польского И. Д. Рудинского.]. – М.: Финансы и статистика, 2004 . – 344 с.
- 170 Grossberg S. Contour enhancement, short-term memory, and consistencies in reverberating neural networks / S. Grossberg // Studies in Applied Mathematics. – 1973. – Vol. 52. – P.217-257.
- 171 Zgonc K. A neural network for crack sizing trained by finite element calculations / Zgonc K., Achenbach J.D. // NDT & E International. – 1996. – Vol. 29. – P.147-155.
- 172 Matsumoto Y. Automatic analysis of eddy current data using neural network / Matsumoto Y., Komatsu H., Badics Z., Aoki K., Nakayasu F., Hashimoto M., Miya K // Proc. Steam Generator and Heat Exchanger Conference. – Toronto (Canada), 1994. P. 2.35-2.45.
- 173 Райтер П. М. Про можливість використання нейронних мереж для контролю багатофазних потоків / П. М. Райтер, М. О. Карпаш // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2002. - № 1. – С.86 -88.
- 174 Neural Network Toolbox. For use with Matlab. User's guide. Howard Demuth, Mark Beale. <http://www.mathworks.com>, 2004 – 844 p.
- 175 Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
- 176 Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф. - М: Радиотехника, 2000. - 272 с.

- 177 Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. - М.: Радиотехника, 2002. - 480 с
- 178 Патент на винахід UA 87910. Спосіб детектування сигналів із високими значеннями шуму / Карпаш М.О., Карпаш О.М. (Україна). - Опубл. 25.08.2009., Бюл.№16, 2009р.
- 179 Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. - М.: Финансы и статистика, 2004. - 344 с.
- 180 Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. - М.: Финансы и статистика, 2004. - 176 с.
- 181 Нейроматематика / [под ред. А.И. Галушкин.]. - М.: Радиотехника, 2002. - 448 с.
- 182 Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника : Теория и практика / Ф. Уоссермен. - М.: Мир, 1992. - 185 с.
- 183 . Rumelhart D. E. Learning internal representations by error propagation in Parallel distributed processing/ Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. Cambridge, MA: MIT Press. - 1986 vol. 1, P. 318-362.
- 184 Малов В.В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов - [2-е изд., перераб. и доп.].-М.:Энергоатомиздат, 1989.-272 с.
- 185 T. Stepinski. Automatic Defect Characterization in Ultrasonic / T. Stepinski, F.Ligvall. // NDT Conference proceedings, 15th WCNDT. Roma 2000.
- 186 Карпаш О. М. Експериментальна перевірка можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для підвищення чутливості безконтактного ультразвукового способу контролю товщини матеріалів / О.М. Карпаш, І.В. Рибіцький, М.О. Карпаш // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, вип. 13. - Львів, 2008. с. 152-160.
- 187 Chinrungrueng C. Directional Savitzky-Golay filters for real-time speckle reduction and coherence enhancement of medical

- ultrasound images / Chinrungrueng C, Toonkum P. // TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference, Vol. A (2004).
- 188 Integrated Savitzky-Golay Filter from Inverse Taylor Series Approach
Wayt, Howard J.; Khan, Taufiqar R. // Digital Signal Processing, 2007 15th International Conference on Volume , Issue , 1-4 July 2007 Page(s):375 – 378.
- 189 P. A. Gorry. General Least-Squares Smoothing and Differentiation by the Convolution (Savitzky-Golay) Method / P. A. Gorry. Analytical Chemistry. - 1990 vol. 62, P. 570-573.
- 190 The analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering-theoretical basis. 1 Ruffin, C.; King, R.L. // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International. Volume 2, Issue , 1999 Page(s):756 - 758 vol.2.
- 191 P. A. Baedeker. Comments on Least-Square Polynomial Filters for Initial Point and Slope Estimation, Analytical Chemistry, vol. 57, pp. 1477-1479, 1985.
- 192 Неразрушающий контроль: Справочник. Том 3. Ультразвуковой контроль. Под ред. ВВ. Клюева – М.: Машиностроение, 2004. – 864с.
- 193 Котурбаш Т.Т. «Використання штучних нейронних мереж для діагностування матеріалів ультразвуковим методом» (I Міжнародна студентська науково-практична конференція “ Методи та засоби діагностування неперервних об’єктів і систем ” 15-18 травня 2006 року).
- 194 Осташ О. П., Учанін В. М., Андрейко І. М., Маковійчук І. Р. Технічна діагностика і ресурс конструкцій після довготривалої експлуатації // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Львів: Фізико-механічний інститут НАН України. – 1999. Вип. 4 – С. 3-8.

- 195 Technical Assessment Report Technology Assessment For Delivery Reliability For Natural Gas - Inspection Technologies: RFEC, Albert Teitsma, Gas Technology Institute, 2004.
- 196 Канайкин В.А., Чабуркин В.Ф., Пахомов В.П. Опыт и перспективы мониторинга и технического состояния МГ на основе внутритрубной диагностики // Газовая промышленность. – 2006. – №10.
- 197 Teitsma, A., “Gas Coupled Ultrasonic Pipeline Inspection”, GRI-03/0158, 2003.
- 198 R.Stoessel “Air-Coupled Ultrasound Inspection as a New Non-Destructive Testing Tool for Quality Assurance”, Doctor Thesis, Institut fur Kunststoffprufung und Kunststoffkunde, University of Stuttgart, 2004
- 199 W.M.D.Wright, D.A.Hutchins “Air-coupled ultrasonic testing of metals using broadband pulses in through-transmission”, Ultrasonics 37, 1999
- 200 C.M.Fortunko, R.E. Schramm, C.M. Teller, G.M. Ligth, J.D. McColskey, W.P. Dube, M.C. Renken “Gas-Coupled, Pulse-Echo Ultrasonic Crack Detection and Thickness Gadibg” in Procc. 1994 Review of Progress in Quantitive NDE, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Plenum Press, New-York, 1995).
- 201 The science and applications of acoustics, Daniel R. Raichel – Sec. ed., Springer Science+Business Media, NY, 2006.
- 202 D.E. Chimenti, C.M. Fortunko “Characterization of Composite Prepreg with Gas-Coupled Ultrasonics”, Ultrasonics 32(4), 1994.
- 203 H.K.Wickramasinghe, C.R.Petts “Acoustic Microscopy in High-Pressure Gasses” in Proc. 1980 Ultrasonic Symp., IEEE, New-York, 1980.
- 204 G.Benny, G.Hayward, R.Chapman “Beam profile measurements and simulations for ultrasonic transducers operating in air” Acoustical Society of America, 2000.

- 205 Основи акустики: навчальний посібник. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. – К. Видавництво “Наукова думка”, 2007. – 640с.
- 206 Ultrasonics Testing of Materials. J.Krautkramer, H.Krautkramer – 4th fully revised edition, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- 207 Основы физики и техники ультразвука. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н.. – М.: Высш.шк., – 1987 – 352с.
- 208 GPSA Engineering databook Ed. 12 Vol.1,2 Sect. 1-26. – Gas Processors Suppliers Association, 2004. – P.821.
- 209 Worksheet to calculate Properties of Hydrocarbon based Gas Mixtures using the GPSA Engineering Data Book (11th Edition). V1.510., Dennis Kirk Engineering. – 1998.
- 210 ANSI (1995) ANSI S1.26-1995, “Method for the calculation of the absorption of sound by the atmosphere” (American National Standards Institute, New York).
- 211 Карпаш О. М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О. Експериментальна перевірка можливості використання взаємкореляційного та нейромережевого підходів для підвищення чутливості безконтактного ультразвукового способу контролю товщини матеріалів / Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Вип. 13. – Львів. 2008. – с. 152-160.
- 212 Котурбаш Т.Т., Карпаш М.О. Аналіз методів підвищення чутливості безконтактного акустичного методу контролю матеріалів та виробів / Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 25. – с. 21-27.
- 213 Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник: У 5 т. / Під заг. ред. В.В.Панасюка. – К.: Наукова думка, 1988. – Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т.Назарчука. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2001. – 1134 с.

- 214 Державна науково-технічна програма «Ресурс», затверджена Постановою КМ України № 1331 від 08.10.2004.
- 215 Карпаш О.М., Зінчак Я.М., Карпаш М.О. Технології та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики нафтогазового обладнання // Нафтова і газова промисловість. – 2007. - № 6. – С.8-11.
- 216 О.М.Карпаш, І.В.Рибіцький, М.О.Карпаш. Експериментальна установка для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом // Методи та прилади контролю якості.–2008.- № 20.–С.7-12.
- 217 Марочник сталей и сплавов. В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
- 218 Карпаш О.М., Молодецький І.А., Кісіль І.С., Карпаш М.О. Новий підхід до визначення фізико-механічних параметрів сталей неруйнівними методами // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів: Зб. наук. праць. – 2004. – Вип. 9. - С. 80-86.
- 219 Карпаш М.О. Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій // Методи та прилади контролю якості. – 2004. - № 12. – С. 30-33.
- 220 Кісіль І.С., Карпаш М.О., Ващишак І.Р. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик сталей ФМХ-1 // Методи та прилади контролю якості. – 2005. - № 14. – С.77-80.
- 221 Курочкин В.В., Малюшин Н.А., Степанов О.А., Мороз А.А. Эксплуатационная долговечность нефтепроводов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 231 с.
- 222 Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Гумеров К.М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. - М .: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. - 310 с.

- 223 Тацакович Н.Л., Карпаш О.М., Карпаш М.О. Экспериментальне дослідження можливості визначення ударної в'язкості неруйнівним методом. ЛЕОТЕСТ - 2009 «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів». - 2009. – С.100.
- 224 Mudge P.J., Lank A.M., Allyn D.N. A long range method of the detection of corrosion under insulation in process pipework. – Thermie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26-28 November, 1996.
- 225 Нагаи Т., Хёдо М., Такемура К. Практика применения направленных волн в ультразвуковой дефектоскопии /Хихакай Кэйсону. – т. 52, № 12, 2003. – с. 667-671.
- 226 Патон Б.Е., Троицкий В.А., Бондаренко А.И. Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных объектов направленными волнами /Технич. диагностика и неразруш. контроль. – 2008. - № 2. – с. 20-30.
- 227 Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Изд-во иностр.лит., 1957. – 727 с.
- 228 Скучик Е. Основы акустики. Пер. с англ. – М.: Мир, 1976, т. 1. – 520 с.
- 229 Report. Long Lange Ultrasonic testing technique – performance details /Document reference: TTP/01.May 2001.
- 230 Динник А.Н. Удар и сжатие упругих тел (1909 г.). Избранные труды. т. 1. – К.: Изд. АН УССР, 1952. – 152 с.
- 231 Беляев Н.М. Труды по теории упругости и пластичности. – М.: Гостехиздат, 1957. – 632 с.
- 232 Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
- 233 Ландау Л.Б., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1968. – 204 с.
- 234 ДСТУ EN 583-1-2001 Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги (EN 583-1:1998, IDT).

Наукове видання

**Максим Олегович Карпаш
Ігор Володимирович Рибіцький
Тарас Тарасович Котурбаш
Олександр Гнатович Бондаренко
Олег Михайлович Карпаш**

**АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦІЙ ТА
УСТАТКОВАННЯ У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ**

МОНОГРАФІЯ