

620.179.1  
B53

Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу

*Вісков Олександр В'ячеславович*

УДК 620.179

**ПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ ТА ІНФОРМАТИВНОСТІ  
АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТРУБНИХ ВИРОБІВ**

05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

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



Івано-Франківськ – 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

**Карпаш Олег Михайлович**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
проректор з наукової роботи



Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, професор

**Заміховський Леонід Михайлович**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
завідувач кафедрою КТіСУ.

Доктор фізико-математичних наук, професор

**Снарський Андрій Олександрович**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», кафедра загальної та теоретичної фізики.

Провідна установа:

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ

Захист відбудеться 12 березня 2004 р. о \_\_\_\_ год. на засіданні

спеціалізаційної комісії

при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу

за адресою: м. Івано-Франківськ, вул. С.П. Королька, 1

76019, м. Івано-Франківськ

З дисертації вивчено головні положення

національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

(76019, м. Київ)

Автореферат дисертації

Вчений секретар дисертаційної комісії

кандидат технічних наук М.М.

М.М.

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день в нафтогазовій галузі одним з найбільш поширених видів неруйнівного контролю (НК) трубних виробів є акустичний НК. Поряд з притаманними цьому виду контролю перевагами його використання пов'язане з рядом труднощів, які негативним чином впливають на його вірогідність. Використання в процесі акустичного контролю п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) для генерування та приймання акустичних коливань в матеріалі об'єкту контролю (ОК) вимагає введення додаткового проміжного акустичного середовища між поверхнями ПЕП та ОК. Порушення стабільності цього середовища безпосередньо впливає на вірогідність результатів НК. Наявність на поверхні ОК слідів корозії ускладнює забезпечення стабільного акустичного контакту і в практиці контролю призводить до пропуску дефектної ділянки або до невірної оцінки основних параметрів дефектів (координат залягання та еквівалентних розмірів). Поряд з цим при тривалій експлуатації ПЕП змінюють свої геометричні розміри внаслідок тертя по поверхні об'єкта контролю, а отже змінюються й параметри акустичного тракту в цілому. Це призводить до значного відхилення від технології контролю. Вказана зміна відбувається неперервно, а тому її особливо важко попередити.

Важливою складовою загальної вірогідності акустичного НК є також вірогідність інтерпретації його результатів. Дефект необхідно не лише виявити, але й вірно визначити його основні параметри. На даний час відомі методи визначення параметрів дефектів, але їх використання в польових умовах (наприклад, при підйомі труб із свердловини) пов'язане з труднощами (забезпечення належної швидкості контролю, негладкий стан поверхні ОК, нестабільні кліматичні умови і т.д.), що негативно впливають на вірогідність результатів, отриманих цими методами.

Вищенаведені чинники зумовлюють актуальність задачі розробки та впровадження нових засобів та технологій, які дозволили б з високою вірогідністю проводити акустичний НК труб нафтового сортаменту та впровадити нові методи ідентифікації параметрів дефектів, придатні для реалізації в польових умовах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами** підтверджує її актуальність. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності:

- з Державною науково-технічною програмою з пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки 1997 року (завдання 04.03/01435-2/471-97 "Розробка технічних засобів і технологій оцінки фактичного технічного стану нафто-

1997 – 2001 рр. - “Створення, освоєння випуску та впровадження у виробництво комплексу технічних засобів і технологій неруйнівного контролю та технічної діагностики трубних колон, бурового та нафтогазопромислового обладнання та інструменту. Організаційне, технічне, методичне та кадрове забезпечення”.

Роботи із створення новітніх технологій неруйнівного контролю та нормативного забезпечення контролю якості належать до пріоритетних напрямків науково-технічної політики нафтогазової галузі України. Така увага на рівні держави й галузі свідчить про незаперечну важливість і актуальність цієї проблеми для України і підтверджує необхідність подальших робіт в цьому напрямку з урахуванням сучасних тенденцій у вирішенні проблем забезпечення якості матеріалів та виробів.

**Мета роботи** полягає в розробці методу, технічних засобів і технології для підвищення вірогідності та інформативності результатів акустичного неруйнівного контролю трубних виробів.

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

- проаналізувати існуючі методи та умови роботи засобів акустичного НК трубних виробів та встановити фактори, які є критичними для забезпечення вірогідності результатів контролю;

- дослідити безконтактні методи збудження акустичних коливань, встановити їх переваги і недоліки для контролю трубних виробів;

- розробити та випробувати нові конструкції безконтактних акустичних перетворювачів для НК труб нафтового сортаменту, забезпечивши при цьому необхідний рівень чутливості електронно-акустичного тракту системи „об’єкт контролю - безконтактний акустичний перетворювач – акустичний дефектоскоп”;

- аналітично дослідити характер перетворення тестових акустичних сигналів в залежності від фізичних параметрів дефектів;

- розробити метод однозначної ідентифікації параметрів дефектів, придатний для використання на підприємствах нафтогазової галузі в польових умовах;

- розробити методіку вибору параметрів зондуючих сигналів з метою мінімізації похибки ідентифікації параметрів дефектів.

**Об’єктом дослідження** є акустичні перетворювачі та електронно-акустичний тракт акустичних дефектоскопів.

**Предметом дослідження** є методи, технічні засоби і технології підвищення вірогідності та інформативності неруйнівного контролю трубних виробів.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених в роботі задач використовувались чисельні методи математичного аналізу, методи технічної діагностики, методи кореляційного аналізу, положення акустичної теорії

коливань та випромінювання. Під час проведення експериментальних досліджень та обробки їх результатів застосовувались методи теорії ймовірності та прикладної статистики. Розробка технічних засобів здійснювалась з використанням методів схемотехніки та системотехніки.

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

- розроблено математичну модель перетворення тестових сигналів в акустичних інформаційно-вимірвальних системах;

- дістало подальший розвиток застосування складномодульованих сигналів, а саме псевдовипадкових кодових послідовностей Баркера для покращення чутливості електронно-акустичного тракту систем акустичного неруйнівного контролю з використанням електромагніто-акустичних перетворювачів (ЕМАП);

- встановлено, що при використанні в якості зонduючого сигналу фазомодульованих послідовностей за кодом Баркера співвідношення сигнал/шум акустичних систем з ЕМАП для умов, коли сигнал є маскований шумом, покращується на 8-17,5 дБ в залежності від довжини кодового сигналу;

- дістало подальший розвиток використання шумоподібних сигналів (М-послідовностей) в процедурі параметричної ідентифікації дефектів. Вперше запропоновано використання процедури параметричної ідентифікації для визначення параметрів дефектів, що виникають в тілі труб нафтового сортаменту.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає в тому, що запропоновані технічні засоби та технології з високою вірогідністю дають можливість проводити акустичний неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту безпосередньо в польових умовах, шляхом використання безконтактних зносостійких акустичних перетворювачів, акустичних каналів з підвищеною чутливістю та методу параметричної ідентифікації дефектів.

Окрім технічних засобів та технологій (зносостійкі ЕМАП, спосіб підвищення чутливості з використанням складномодульованих зонduючих сигналів) пройшли апробацію в умовах науково-виробничої фірми „ЗОНД” – головної організації нафтогазової галузі України з питань неруйнівного контролю та технічної діагностики.

**Особистий внесок здобувача.** Основі положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Зокрема, особисто автором:

- обґрунтовано переваги застосування електромагніто-акустичного методу збудження акустичних коливань для підвищення вірогідності акустичного неруйнівного контролю трубних виробів [2, 11];

- запропоновано для використання як зондуючих спеціальних сигналів з властивостями, які забезпечують ідентифікацію сигналу (фазомодульований код Баркера), при підвищенні абсолютної чутливості ультразвукових акустичних систем з ЕМАП [4];

- створена математична модель акустичного каналу, на основі якої розроблена процедура параметричної ідентифікації дефектів [8];

- визначено необхідні та достатні вимоги до параметрів акустичних сигналів, що застосовуються для процедури параметричної ідентифікації [7];

- розроблено конструкції зносостійких ЕМАП для генерування та прийому лінійно-поляризованої зсувової хвилі по нормалі до поверхні контролю та горизонтально-поляризованої зсувової хвилі під заданим кутом до поверхні контролю [5].

Із робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових семінарах кафедри “Методи та прилади контролю якості та сертифікації продукції” Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) у 1998, 1999, 2000 рр., на третій Українській науково-технічній конференції “Неруйнівний контроль та технічна діагностика-1997” (м. Дніпропетровськ), на міжнародних конференціях “Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів “Леотест-2000” та “Леотест-2001” (м. Славське, Львівської області), на II міжнародній конференції «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике» (м. Мінськ) у 1998 р., на науково-технічних конференціях „Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання” (м. Івано-Франківськ) у 1999 та 2002 рр.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 друкованих праць, з них 6 - у фахових виданнях; подано 2 заявки на одержання міжнародних патентів.

**Структура та об’єм роботи.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел із 121 найменувань та 4 додатків. Обсяг роботи складає 156 сторінки, в т.ч. 43 рисунки та 6 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтовано актуальність теми, визначені мета та основні задачі дослідження. Висвітлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих методів та засобів акустичного неруйнівного контролю трубних виробів, що використовуються в нафтогазовій галузі, встановлено фактори, що безпосередньо впливають на вірогідність контролю, визначені напрямки і задачі досліджень.

Показано, що найбільше число відмов бурильної колони, які призводять до аварій, пов'язане зі зломом бурильних труб в процесі їх експлуатації внаслідок утворення корозійно-втомних тріщин як в тілі, так і в різьбовій частині.

Для діагностики труб нафтового сортаменту в галузі використовуються поряд з вітчизняними і закордонні прилади, що реалізують акустичний вид неруйнівного контролю. При цьому при генеруванні та прийманні акустичних коливань використовують ПЕП, для нормальної роботи яких потрібна контактна рідина - вода, мастило, емульсія і т.п. Ультразвукові коливання від поверхні п'єзопластини ПЕП під великими кутами до поверхні вводяться в тіло труби й приймаються назад через тонкий шар контактної рідини. Незначні відхилення від оптимальної товщини шару контактної рідини, порушення акустичного контакту через високу швидкість контролю, наявність повітряних і жирових плівок призводять до появи завад, які суттєво спотворюють результати контролю. Надриви металу, хвилястість, забоїни, вдавнення, що є на поверхнях труб, призводять до появи завад, які часто не дозволяють проводити контроль наявними засобами. Суттєві проблеми для виявлення дефектів зумовлює наявність "мертвої" зони ПЕП. Для проведення надійного контролю необхідно застосовувати засоби очистки поверхні труб від жиру, бруду, іржі, окалини, захисних покриттів, тощо. Значно ускладнюють роботу дефектоскопів з контактними перетворювачами градієнт температур 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). Значна частина вітчизняних контактних перетворювачів не забезпечують належну повторюваність метрологічних характеристик. Всі ці фактори негативним чином впливають на момент появи та величину амплітуди луно-сигналу від дефекту, які є основними інформативними параметрами при діагностиці труб нафтового сортаменту за існуючими методиками контролю.

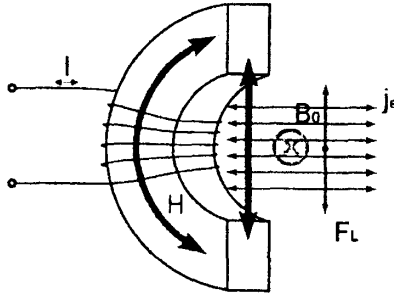
Тому на даному етапі розвитку неруйнівного контролю труб нафтового сортаменту необхідними є нові підходи до розробки технічних засобів і технологій, які повинні покращити вірогідність акустичного неруйнівного контролю трубних виробів та його інформативність, і, відповідно, позитивно вплинути на безпеку та економічну ефективність спорудження й експлуатації об'єктів нафтогазової промисловості.

Другий розділ присвячено питанням аналізу альтернативних методів збудження акустичних коливань в матеріалі ОК та їх прийому без використання проміжного акустичного середовища. Показано, що найбільш прийнятним та перспективним в цьому плані є електромагніто-акустичний метод. Проаналізовано загальні принципи побудови традиційних ЕМАП, та їх найбільш розповсюджені конструкції. Показано, що використання загальновідомих конструкцій ЕМАП для задач НК труб нафтового сортаменту є обмеженим через високу ймовірність виходу перетворювача з ладу внаслідок механічного пошкодження чутливого елемента (радіочастотної котушки). Крім того, у порівнянні з ПЕП ЕМАП мають значно меншу чутливість. Обґрунтовано доцільність розробки нових конструкцій ЕМАП, які б не містили потенційно слабких до механічних впливів ланок безпосередньо в зоні контакту перетворювача з ОК та методів підвищення їх чутливості.

Запропоновано дві нові конструкції ЕМАП. Один з перетворювачів використовується для генерування та прийому лінійно-поляризованої зсувової хвилі, що розповсюджується по нормалі до поверхні об'єкту контролю й може використовуватись для визначення залишкової товщини стінок труб. Для забезпечення умови стійкості перетворювача до механічних пошкоджень було запропоновано розташовувати чутливі елементи перетворювача - генераторну та приймальну котушки на додаткових магнітопроводах-півкільцях, виготовлених з аморфного заліза і розташованих в нижній частині перетворювача, з двох протилежних боків концентратора магнітного потоку.

Перетворювач з такою конфігурацією працює наступним чином: серія збуджувальних імпульсів від задаючого генератора подається на послідовний коливальний контур, утворений ємністю та індуктивністю, розташованою на одному з напівкільцевих магнітопроводів; в матеріалі магнітопроводу створюється змінний магнітний потік  $H$ , (рис. 1) значення якого пропорційне кількості витків котушки індуктивності та струму в ній.





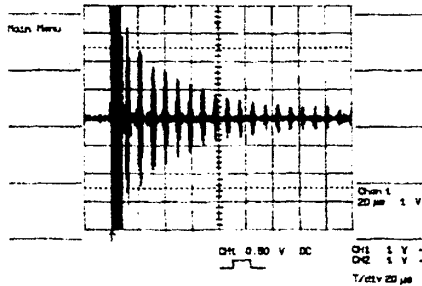
**Рис. 1.** Розподіл полів та сил в напівкільцевому магнітопроводі та в підповерхневому шарі об'єкту контролю в момент генерування акустичних коливань

$I$  - змінний струм в котушці індуктивності;  $H$  - магнітний потік в осерді;  
 $B_0$  - прикладене зовнішнє магнітне поле;  $j_e$  - вихреві струми;  
 $F_L$  - сила Лоренца

Цей магнітний потік виникає в осерді з відкритими кінцями (незамкнутий магнітопровід), розташованими в безпосередній близькості до поверхні об'єкту контролю, тому він замикається через матеріал об'єкту, що контролюється. Оскільки в матеріалі ОК в певний момент присутній змінний магнітний потік, з частотою, відповідною до частоти збуджуючих коливань, навколо нього в підповерхневому шарі матеріалу виникають вихреві струми  $j_e$ . В результаті взаємодії з постійним магнітним полем  $B_0$  концентратора ці струми призводять до виникнення механічних зсувових коливань в підповерхневому шарі об'єкту контролю. Ультразвукова хвиля, що розповсюджується вглиб матеріалу по нормалі до поверхні ОК зазнає відбиття від його протилежної поверхні, або від іншого відбивача, розташованого всередині об'єкта, і повертається до перетворювача. Приймальна котушка перетворювача включена в паралельний резонансний контур. Оскільки осердя приймальної котушки знаходиться в безпосередній близькості до магнітного концентратора, в ньому існує постійне магнітне поле, яке в момент приходу ультразвукової хвилі піддається модуляції. В результаті модуляції магнітного поля ультразвуковою хвилею в магнітному осерді створюється змінний магнітний потік, що призводить до виникнення змінного струму в приймальній котушці, який в подальшому підсилюється та відображується дефектоскопом.

Розроблений та випробуваний ЕМАП має основну робочу частоту 2,0 МГц.

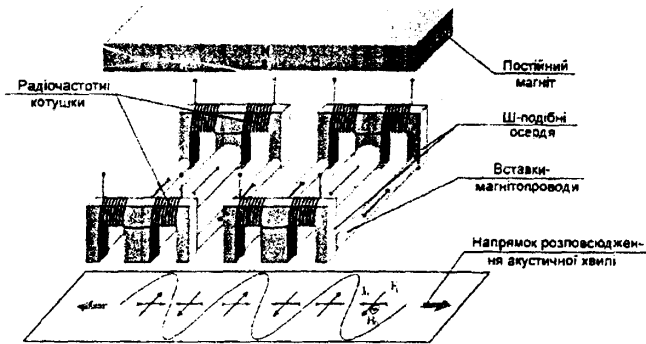
Перевірка працездатності та оцінка основних параметрів ЕМАП здійснювались на натурних зразках, виготовлених з труб нафтового сортаменту з нанесеними штучними дефектами та на сталевих пластинах різної товщини. На рис. 2 подано осцилограму сигналу, знятого з приймальної котушки перетворювача, встановленого на пластину, товщиною 15 мм. Як видно з цієї осцилограми, співвідношення сигнал/шум становить не менше 20 дБ, що є достатнім для задач товщинометрії труб нафтового сортаменту.



**Рис. 2.** Осцилограма сигналу перетворювача в режимі товщинометрії

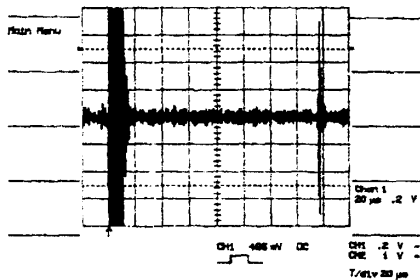
На рис. 3 схематично показано конструкцію ЕМАП для генерування та прийому горизонтально-поляризованої зсувової хвилі під заданим кутом до поверхні ОК та наведено розподіл полів і сил, що виникають в матеріалі ОК та в самому перетворювачі під час його роботи. Досліджено, що така конструкція ЕМАП, у порівнянні з традиційними конструкціями, має ще й ту перевагу, що не містить матриці періодичних магнітів, а отже, при швидкому переміщенні такого перетворювача відносно поверхні ОК не будуть виникати додаткові акустичні шуми, зумовлені ефектом Баркгаузена. Крім того, використання горизонтально-поляризованої зсувової хвилі покращує чутливість акустичної системи в цілому, оскільки дефекти, що виникають в трубах нафтового сортаменту, мають вертикальне розташування в об'ємі ОК, а отже ефективна площа відбиття для горизонтально поляризованої зсувової хвилі буде більшою, ніж для вертикально-поляризованої (єдиного типу зсувових хвиль, що можуть генеруватись за допомогою ПЕП).

Розроблений та випробуваний ЕМАП має основну робочу частоту 2,0 МГц та кут вводу акустичних коливань  $67^\circ$ .



**Рис. 3.** Конструкція зносостійкого ЕМАП горизонтально-поляризованої зсувової хвилі  
 $B_0$  - прикладене зовнішнє магнітне поле;  $j_0$  - вихреві струми;  
 $F_L$  - сила Лоренца

Перевірка працездатності та оцінка основних параметрів ЕМАП здійснювались на зразках, виготовлених із сталених бурильних труб з штучними дефектами в різьбовій частині та в тілі труби, згідно з вимогами ГСТУ 320.02829777.002-95. На рис. 4 показано осцилограму сигналу, отриманого з приймальної котушки перетворювача. Співвідношення сигнал/шум становить не менше 18 дБ, що є достатнім для задач дефектоскопії різьбових ділянок труб нафтового сортаменту.



**Рис. 4.** Осцилограма сигналу перетворювача з імпульсом від дефекту в різьбовій частині

На обидві запропоновані конструкції ЕМАП у вересні 2002 року були подані заявки в Європейське патентне бюро на отримання міжнародних патентів.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячений питанням підвищення чутливості електронно-акустичного тракту акустичної системи з розробленими автором ЕМАП. Загальновідомо, що ЕМАП у порівнянні з ПЕП мають значно меншу чутливість. При акустичному контролі з допомогою ЕМАП відбиті від дефектів сигнали можуть знаходитись нижче порогового рівня приймального тракту дефектоскопа і не виявляться. Це призводить до появи нової для акустичного контролю проблеми - проблеми виявлення луно-сигналів, що знаходяться нижче рівня шуму, або, іншими словами, таких, що знаходяться в суміші з випадковим, білим шумом.

Ідея способу підвищення чутливості ЕМА-методу збудження акустичних коливань полягає у використанні складномодульованих сигналів (кодових послідовностей) при формуванні акустичного сигналу та методів оптимальної фільтрації при обробці отриманих сигналів. В якості кодових послідовностей вибір було зупинено на кодах з хорошими автокореляційними властивостями, а саме – кодах Баркера.

Із значною ступінню узагальнення процедуру виявлення дефектів в матеріалі об'єкту контролю можна співставити з процедурою передачі цифрової інформації - луно-імпульс відбитої від дефекту акустичної хвилі потрапляє на акустичний перетворювач (в нашому випадку - ЕМАП), в подальшому обробляється і має бути однозначно ідентифікований системою саме як сигнал від несучільності в матеріалі.

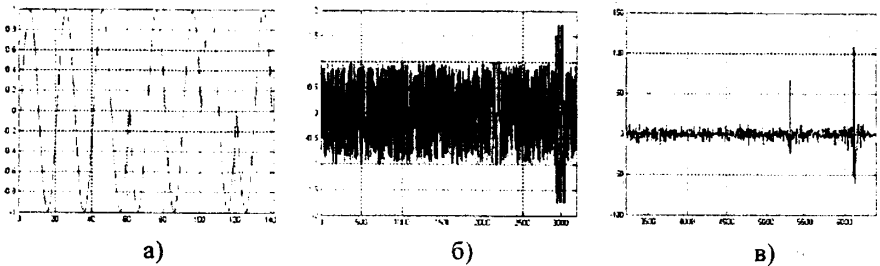
Вибір коду та конструктивне виконання узгодженого фільтра повинні передусім забезпечити максимально можливе заглушення стохастичних осциляцій. Серед багатьох систем кодування для систем зв'язку найчастіше всього застосовують код Баркера та код випадкової послідовності. Якщо код Баркера складається з  $N$  елементів, то при осциляціях автокореляційної функції на одиничному рівні основному максимуму відповідає висота  $N$ .

Для апробації цього методу підвищення чутливості електронно-акустичного тракту з використанням в якості зондуючих, сигналів, модульованих кодами Баркера, були проведені експериментальні дослідження на натурних зразках сталених бурильних труб із нанесеними на них штучними дефектами.

З цією метою було виготовлено лабораторну акустичну установку, основним функціональним блоком якої є IBM-PC/AT сумісний комп'ютер із встановленими в ньому платами цифро-аналогового (ЛА-ЦАПн10М1) та аналогово-цифрового (ЛА-н10М6РС1) перетворення, виробництва "Руднев-Шиляев". Необхідні для реалізації методу фазомодульовані сигнали, кодовані кодом Баркера, що використовувались як зондуючі сигнали, генерувались за

допомогою цифро-аналогової частини установки і служили для генерування ЕМА-перетворювачем акустичної хвилі в ОК. Приймання акустичних коливань здійснювалось тим же ЕМАП. Підсилений інструментальним підсилювачем сигнал з ЕМАП подавався на вхід блоку АЦП, де відбувалась його дискретизація та подальший запис в пам'ять комп'ютера. Далі отримані набори даних оброблялись за допомогою програмного пакету MathLab.

На рис. 5 наведено осцилограми сигналів, що генерувались (а), осцилограми дискретизованих прийнятих сигналів (б) та їх автокореляційні функції (в) для семиелементної послідовності коду Баркера.



**Рис. 5.** Виявлення корисного сигналу  
(з використанням семиелементної послідовності Баркера):

- а) - форма зондуючого сигналу
- б) – прийнятий сигнал
- в) – сигнал з виділеними імпульсами від дефекту та торця труби-зразка

Слід зауважити, що, як це добре видно з осцилограми прийнятих сигналів (див. рис. 5.б), акустичний луно-імпульс від торця труби можна виділити без додаткової фільтрації, в той час як луно-імпульс від дефекту є маскованим шумом і виявити його традиційними засобами неможливо. Після застосування процедури автокореляції сигналу луно-імпульси (точніше - огинаючі автокореляційної функції кодової послідовності) стають помітними на фоні завад і піддаються реєстрації (див. рис.5.в). Співвідношення сигнал/шум для кожної з можливих кодових послідовностей при цьому коливається в межах від 8 до 17,5 дБ в залежності від довжини послідовності.

Проведений натурний експеримент дає можливість стверджувати, що в польових умовах НК із застосування ЕМАП, що збуджується фазомодульованими послідовностями за кодом Баркера має на 11% більшу вірогідність результатів контролю, ніж НК із застосуванням ПЕП.

**Четвертий розділ** дисертаційної роботи присвячений питанням підвищення інформативності акустичного контролю. Існуючі і такі, що широко використовуються на сучасному етапі, методи акустичного НК при контролі трубного господарства та обладнання підприємств нафтової та газової галузей є малоінформативними.

Вирішення цієї проблеми полягає в застосуванні сучасних інформаційних технологій, зокрема, теорії ідентифікації динамічних систем.

На підставі аналізу методик інструментальних досліджень можна однозначно стверджувати, що за своєю суттю процедура ультразвукової дефектоскопії наближається до процедури ідентифікації і повністю співпадає з нею у випадку застосування коротких зондуючих імпульсів, що описуються  $\delta$ -функцією. При цьому об'єкт неруйнівного контролю ідентифікується як лінійна динамічна система у вигляді імпульсної перехідної функції. По суті має місце експериментальне визначення структури і (або) параметрів вихідного диференціального рівняння, яке описує розповсюдження в об'єкті акустичних хвиль, спотворених наявністю дефектів.

Як вихідні посилання приймається, що параметри акустичних хвиль є нелінійними й випадковими функціями часу. В якості гомоморфної моделі об'єкта неруйнівного контролю в рамках лінійної акустики розглядається еквівалентна система двох лінійних диференціальних рівнянь другого порядку, одне з яких залежить від просторової координати, а друге – від часу (принцип розділення змінних). Сутність методів акустичного контролю полягає в параметричній ідентифікації об'єкта вимірювань, апріорною математичною моделлю якого є вищезгадане диференціальне рівняння за часовою координатою.

З метою одержання кількісної оцінки параметрів дефекту пропонується розглядати вихідний сигнал об'єкта, що досліджується, у вигляді функціонального ряду Вольтера й адитивної випадкової завади, що дає можливість враховувати як лінійні так і нелінійні властивості фізичного поля й вплив електричних та акустичних завод.

Для опису реальних сигналів при практичних застосуваннях обмежимось першими трьома ядрами Вольтера. Це дозволяє ідентифікувати об'єкт вимірювань як систему, що є послідовним поєднанням стійкої лінійної частини з ваговою функцією  $\omega_1(\tau)$  та безінерційної нелінійної частини. Можна сказати, що в цьому випадку:

$$z(t) = \int_0^{\infty} \omega_1(\tau) \cdot x(t - \tau) d\tau + \iint_0^{\infty} \omega_2(\tau_1, \tau_2) \cdot x(t - \tau_1) \cdot x(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + n(t), \quad (1)$$

де:  $z(t)$  – вихідний сигнал вимірювальної системи

$\omega_1(\tau)$ ,  $\omega_2(\tau_1\tau_2)$  – ядра Вольтера першого та другого порядків

$x(t)$  – вхідний зонduючий сигнал

$n(t)$  – випадкова завада

Якщо  $x(t)$  та  $n(t)$  є стаціонарними випадковими процесами, некорельованими між собою, то має місце рівняння Вінера-Хопфа.

Для визначення ядер розкладу (1) треба використовувати в якості зонduючого сигнал Гаусового „білого шуму”.

Для випадку апроксимації об’єкта, що досліджується, лінійною моделлю, тобто лінійним ядром першого порядку або реакцією лінійної системи на імпульсний вплив, пропонуються тестові сигнали, в якості математичної моделі яких застосовуються індексні послідовності. Побудова останніх базується на використанні двозначного характеру мультиплікативної групи простого поля GF (p) (конечного поля Галуа по модулю p) з використанням поняття індексу, прийнятого в теорії чисел.

Цей результат отримано на підставі аналізу частотного спектра гнучких коливань, що збуджуються в структурах, що зонduються, шляхом періодичних ударних впливів, а також з урахуванням тривалості перехідних процесів, які при цьому мають місце.

У випадку, коли об’єкт вимірювань доцільно розглядати як нелінійну систему, запропоновано використовувати тернарні псевдовипадкові сигнали багаторівневих послідовностей максимальної довжини. При цьому отримані теоретичні вирази для визначення ординат ядра першого порядку

$$w_1(\tau) = \frac{3}{2(M+1) \cdot \Delta^2} \int_0^{M\Delta} x(t-\tau)y(t)dt \quad (2)$$

і другого порядку

$$w_2(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{8 \cdot 3^{k-2} \cdot \Delta^3} \int_0^{M\Delta} x(t-\tau_1) \cdot x(t-\tau_2) \cdot y(t)dt \quad (3)$$

$$\tau_1 \neq \tau_2$$

де  $k$  – порядок примітивного полінома, що породжується  $M$ -послідовністю

$M$  – період відповідної  $M$ -послідовності

$\Delta$  – тривалість тактового інтервалу.

Для компенсації тренда при нестационарній поведінці дефекту використовуються псевдовипадкові двійкові сигнали із спеціально підбраною фазою.

З метою підвищення точності оцінки застосовується рекурентна обчислювальна процедура фільтра Калмана, яка дозволяє ефективно заглушувати нестационарні шуми об'єкта та вимірювальної апаратури.

З метою мінімізації похибки ідентифікації розроблена спеціальна методика вибору параметрів зондуючих сигналів.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача - розроблено комплекс технічних засобів і технологій, які дозволяють підвищити вірогідність та інформативність результатів ультразвукового контролю трубних виробів.

2. В результаті аналізу умов роботи існуючих методів та засобів акустичного неруйнівного контролю трубних виробів встановлено та класифіковано за рівнем значимості фактори, що зменшують вірогідність результатів контролю. Запропоновано для зменшення впливу вказаних чинників на вірогідність контролю використання в якості первинних перетворювачів сигналу спеціально спроектованих електромагніто-акустичних перетворювачів (ЕМАП).

3. З метою забезпечення стійкості ЕМАП до механічного впливу було розроблено принципово нові конструкції зносостійких перетворювачів для генерування та прийому зсувової хвилі по нормалі і під заданим кутом до поверхні контролю. На конструкції перетворювачів подано заявки на міжнародні патенти в Європейське патентне бюро.

4. Для проведення теоретичних досліджень характеру зміни акустичних полів в залежності від фізичних параметрів дефектів була розроблена математична модель перетворення тестових сигналів в акустичних інформаційно-вимірювальних системах, що дало можливість розробити метод інтерпретації результатів акустичних вимірювань.

5. Теоретично досліджено та експериментально підтверджено доцільність використання складних зондуючих сигналів (фазомодульований код Баркера) для підвищення чутливості електронно-акустичного тракту акустичних дефектоскопічних систем з первинними електромагніто-акустичними перетворювачами, що дає можливість однозначно виявляти дефекти з малими геометричними розмірами. При цьому співвідношення сигнал/шум для умов,



коли сигнал є маскований шумом, покращується на 8-17,5 дБ в залежності від довжини кодової послідовності.

6. З метою підвищення інформативності акустичного неруйнівного контролю було запропоновано процедуру параметричної ідентифікації дефектів. Встановлено, що нелінійну структуру досліджуваного об'єкту (дефекту) можна описати у вигляді функціонального ряду Вольтера та адитивної випадкової завади. Отримано теоретичні вирази для визначення ординат ядра першого та другого порядків. Ці ядра можуть бути визначені експериментальне шляхом вимірювання відповідних кореляційних функцій.

Показано, що в якості зондуючих сигналів при параметричній ідентифікації дефектів доцільно використовувати багаторівневі псевдовипадкові сигнали, трійкові. Це дає змогу при однаковій потужності з двійковим сигналом збільшити амплітуду трійкового приблизно в 1,2 рази, що створює більш сприятливі умови для ідентифікації типів дефектів.

7. Експериментальне встановлено, що неруйнівний контроль в умовах бурової за допомогою запропонованих засобів дозволяє досягнути вірогідності контролю 87% на непідготовлених поверхнях труб у порівнянні з 76%, що досягаються контролем з використанням п'єзоелектричних перетворювачів.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Карпаш О.М., Івасів В.М., Вісков О.В. До визначення оптимальних періодів неруйнівного контролю бурильних труб // *Методи та прилади контролю якості*. - 1997. - №1. - С. 13-14.

2. Карпаш О.М., Криничний П.Я., Вісков О.В. Застосування електромагніто-акустичного методу неруйнівного контролю // *Методи та прилади контролю якості*. - 2000. - №6. - С. 19-20.

3. Карпаш О.М., Степура О.І., Вісков О.В. До питання підвищення точності вимірювань в процесі ультразвукової дефектоскопії // *Збірник наукових праць «Фізичні методи та засоби контролю середовища, матеріалів та виробів» (Леотест 2000)*. - Київ-Львів. - 2000. - С. 25-27.

4. Карпаш О.М., Криничний П.Я., Вісков О.В. ЕМА-товщиномір з підвищеною чутливістю // *Збірник наукових праць «Фізичні методи та засоби контролю середовища, матеріалів та виробів» (Леотест 2001)*. - Київ-Львів: - 2001.-С. 38-41.

5. Вісков О.В. Зносостійкий електромагніто-акустичний перетворювач для неперервної товщинометрії труб нафтового сортаменту // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. - № 4(5). – С. 30-32.

6. 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.

7. Степура А.І., Карпаш О.М., Вісков А.В. Идентификация параметров дефектов с применением специальных зондирующих сигналов // Материалы II Междунар. конф. «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике», - Минск: - 1998. – С. 315-317.

8. Карпаш О.М., Степура О.І., Вісков О.В. Ультразвукова ідентифікація параметрів дефекта // Матеріали 2-ї загальноукр. конф. „Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. - Дніпропетровськ: - 1997. – С. 188.

9. Карпаш О.М., Зінчак Я.М., Вісков О.В. Проблеми підвищення якості нафтогазового обладнання та інструменту // Матеріали 4-ї спеціал. конф. „Сучасні прилади, матеріали та технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики промислового обладнання”. - Івано-Франківськ: - 1999. – С. 63-64.

10. Карпаш О.М., Криничний П.Я., Вісков О.В, Молчанов М.О. Мобільні засоби комплексного неруйнівного контролю якості труб нафтового сортаменту // Матеріали 4-ї міжнар. наук.-практ. конф. „Нафта і газ України”. - Івано-Франківськ: - 2000. – С. 257-258.

11. Карпаш О.М. Криничний П.Я., Вісков О.В. Можливість застосування електромагніто-акустичних перетворювачів для неруйнівного контролю труб нафтового сортаменту в польових умовах // Матеріали III наук.-техн. конф. та вист. „Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання”. - Івано-Франківськ: - 2002. – С. 67-69.

12. ГСТУ 320.02829777.002-95. Інструкція по проведенню неруйнівного контролю нарізних труб нафтового сортаменту в процесі їх експлуатації; Введ. – 1996.

## АНОТАЦІЯ

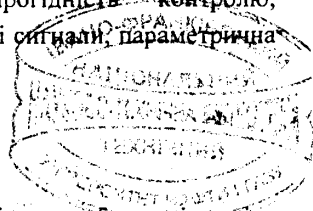
Вісков О.В. Підвищення вірогідності та інформативності акустичного контролю трубних виробів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ – 2003.

Показано і теоретично обґрунтовано доцільність використання безконтактних електромагніто-акустичних перетворювачів для підвищення вірогідності акустичного контролю трубних виробів. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано доцільність використання складномодульованих сигналів для покращення чутливості електронно-акустичного тракту акустичного дефектоскопа. Розроблена та запропонована для використання процедура параметричної ідентифікації дефектів. Розроблено та випробувано конструкції нових зносостійких електромагніто-акустичних перетворювачів.

Ключові слова: неруйнівний контроль, вірогідність контролю, електромагніто-акустичний перетворювач, шумоподібні сигнали, параметрична ідентифікація.

## ANNOTATION



Viskov O.V. Raising of the reliability and self-descriptiveness of acoustic testing of pipes. – Manuscript.

A thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering sciences on a speciality 05.11.13 - Devices and methods of testing and determination of matter composition. The Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil & Gas. Ivano-Frankivsk – 2003

Is shown and theoretically grounded a advisability of using of non-contact electromagnetic-acoustical transducers for increasing of pipe's acoustical testing reliability. On the basis of a theoretical and experimental investigations grounded a advisability of using of spread spectrum signals for improvement of electro-acoustic channel sensitivity. Was developed and proposed to use a procedure of defect parametric identification. Was developed a constructions of a new wear-resistant electromagnetic-acoustical transducers.

Key words: non-destructive testing, testing reliability, electromagnetic-acoustical transducers, spread-spectrum signals, parametric identification.

## АННОТАЦИЯ

Висков А.В. Повышение достоверности и информативности акустического контроля трубных изделий. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа – 2003.

На сегодняшний день в нефтегазовой отрасли преимущественным видом неразрушающего контроля (НК) трубных изделий является акустический НК. Помимо присущих данному виду НК преимуществ его использование связано с рядом трудностей, негативным образом влияющих на его достоверность. Использование пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) требует введение дополнительного промежуточного слоя акустической среды между поверхностями ПЭП и объекта контроля (ОК). Незначительное нарушение стабильности этого слоя непосредственно влияет на достоверность результатов НК. Поверхность ОК, имеющая следы коррозии, из-за потери акустического контакта влияет на «прозрачность» поверхности ввода акустических колебаний, что, в свою очередь, приводит к пропуску дефекта или к неверной оценке его параметров. За время длительной эксплуатации ПЭП меняют свои геометрические размеры в следствии трения по поверхности ОК и, соответственно, изменяют параметры акустического тракта в целом, что приводит к полному отклонению от технологии контроля.

Еще одной важной составляющей общей достоверности акустического НК является достоверность интерпретации его результатов. Дефект необходимо не только выявить, но и верно определить его основные параметры. Известно много методов определения параметров дефектов, но их использование в полевых условиях (например, при подъеме труб из скважины) связано с трудностями (скорость контроля, состояние поверхности ОК, климатические условия и т.п.), негативным образом влияющими на достоверность этих методов.

В связи с вышеизложенным становится понятной актуальность вопроса разработки и внедрения новых средств и технологий, позволяющих с высокой степенью достоверности проводить акустический НК труб нефтяного

сортамента и внедрение новых методов идентификации параметров дефектов, пригодных для использования в полевых условиях.

Цель работы состоит в разработке методов, технических средств и технологий для повышения достоверности и информативности результатов акустического неразрушающего контроля трубных изделий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие методы и условия работы средств акустического неразрушающего контроля трубных изделий и определить факторы, критически влияющие на достоверность результатов контроля;
- исследовать бесконтактные методы возбуждения акустических колебаний, определить их преимущества и недостатки при контроле труб;
- разработать и испытать новые конструкции бесконтактных акустических преобразователей для неразрушающего контроля труб нефтяного сортамента, обеспечив при этом необходимый уровень чувствительности электронно-акустического тракта системы «объект контроля - бесконтактный акустический преобразователь – акустический дефектоскоп»
- аналитически исследовать характер преобразования тестовых акустических сигналов в зависимости от физических параметров дефектов;
- разработать метод однозначной идентификации параметров дефектов, применимых на предприятиях нефтегазовой отрасли в полевых условиях;
- разработать методику выбора параметров зондирующих сигналов с целью минимизации погрешности идентификации параметров дефектов.

Объект исследования – акустические преобразователи и электронно-акустический тракт акустических дефектоскопов.

Предметом исследования являются методы, технические средства и технологии неразрушающего контроля трубных изделий.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:

- разработано математическую модель преобразования тестовых сигналов в акустических информационно-измерительных системах;
- получило дальнейшее развитие использование сложномодулированных (псевдослучайных кодовых последовательностей Баркера) сигналов для улучшения чувствительности электронно-акустического тракта систем акустического неразрушающего контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей;

- экспериментально определено, что при использовании в качестве зондирующего сигнала фазомодулированных последовательностей по коду Баркера соотношение сигнал/шум акустических систем для условий, когда сигнал

маскирован шумом, улучшается на  $\delta$ -17,5 dB в зависимости от длины кодированного сигнала;

- получило дальнейшее развитие использование шумоподобных сигналов (М-последовательностей) в процедуре параметрической идентификации дефектов. Впервые предложено использование процедуры параметрической идентификации для определения параметров дефектов, возникающих в теле труб нефтяного сортамента.

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что отдельные технические средства и технологии (износоустойчивые электромагнито-акустические преобразователи, способ повышения чувствительности с применением сложномодулированных зондирующих импульсов) прошли апробацию в условиях научно-производственной фирмы «ЗОНД» - ведущей организации нефтегазовой отрасли Украины по вопросам неразрушающего контроля и технической диагностики.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, электромагнито-акустический преобразователь, шумоподобные сигналы, параметрическая идентификация.