

620.179.1  
1 86

Івано-Франківський національний технічний університет  
нафти і газу

*Луценко Геннадій Геннадійович*

УДК 620.179

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ  
АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ**

05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

11/11

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

Івано-Франківськ – 2005

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*

**Масєвський Станіслав Михайлович**

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
завідувач кафедри приладів та систем неруйнівного контролю*

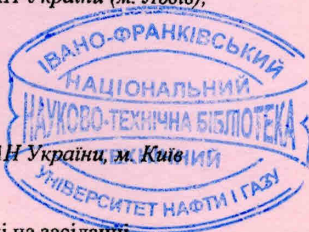
*доктор технічних наук, старший науковий співробітник*

**Погребенник Володимир Дмитрович**

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів),  
старший науковий співробітник*

Провідна установа:

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



Захист відбудеться „ 25 ” березня 2005 р. о 11 годині на засіданні

спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

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

Автореферат розісланий " 19 " лютого 2005р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент

Драпчук М.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Спрацювання значної кількості обладнання та машин у вітчизняній промисловості складає більше ніж 50%. Це споруди, обладнання та конструкції, що відпрацювали свій нормативний термін і надалі залишаються в експлуатації. Основними причинами аварій і відмов обладнання є дефекти металу типу порушення суцільності матеріалу та його корозійні пошкодження. З метою покращення такого положення в Україні розроблена і схвалена Кабміном України "Концепція Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки". Гарантії високої якості виробів сучасних підприємств, безпека складних технологічних процесів, безпека на транспорті тощо значною мірою базуються на розвинутій системі неруйнівного контролю, важливою складовою якої є акустичний неруйнівний контроль. Практика застосування неруйнівного контролю висуває підвищені вимоги до його точності, надійності і зручності. Хоч прогрес електронної та обчислювальної техніки надає великі можливості для розв'язання багатьох задач у галузі приладобудування неруйнівного контролю, найбільший резерв для його вдосконалення полягає в покращенні розуміння складних фізичних процесів, які лежать в його основі. Стосовно приладів, які використовують луна-метод, це пов'язано із закономірностями поширення пружних хвиль у матеріалі виробів і конструкцій, що контролюються. Для створення таких приладів, особливо тих, що здійснюють контроль в автоматичному режимі, потрібні кількісні данні про просторову структуру полів пружних хвиль ще на стадії розробки і проектування.

Незважаючи на значні досягнення акустики пружних середовищ у проєктанта відсутні обчислювальні прийоми і засоби, які б надали можливість, виходячи з аналізу просторової структури ультразвукового поля, забезпечити необхідну достовірність результатів контролю із застосуванням тієї чи іншої кількості акустичних перетворювачів, за умови того чи іншого їх розташування, тієї чи іншої форми їх апертури. Застосування в процесі проектування таких технічних характеристик перетворювачів як діаграми спрямованості не спрацьовує в багатьох випадках тому, що значна частина зони контролю належить до ближньої акустичної зони, якій ці характеристики не відповідають. Отже задача удосконалення засобів та методів акустичного неруйнівного контролю на основі аналізу структури полів є *актуальною*.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до галузевої науково-технічної програми НАК "Нафтогаз України" на 2002--2007 рр. "Створення, освоєння випуску та впровадження у виробництво комплексу технічних засобів і технологій неруйнівного контролю та технічної діагностики трубних колон, бурового та нафтогазопроточного інструменту нафтогазових родовищ.



Задачі удосконалення ультразвукових засобів розв'язувались у процесі виконання науково-дослідних робіт згідно договору: "Розробка та впровадження засобів та технологій діагностування обсадних колон на підземних сховищах газу" (№11/102-5 (12/03) ІФНТУНГ з ДК "Укртрансгаз", номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0103U001613). Ця робота і г/т 35-2/03 "Комплексна оцінка технічного стану насосно-компресорних труб" (номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ 0103U001614 ) виконувались безпосередньо за участю автора.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є удосконалення засобів і методів акустичного неруйнівного контролю металоконструкцій на основі аналізу ультразвукових полів. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **основні задачі**:

1. Провести аналіз існуючих підходів до проектування засобів акустичного контролю матеріалів і виробів.
2. Розробити нові методи та відповідні прийоми їх чисельної реалізації для розрахунку просторової структури імпульсних ультразвукових полів, які випромінюються п'єзоелектричними (прямими і нахиленими) та електромагнітоакустичними перетворювачами, а також полів луна-сигналів, що відбиваються від стандартних плоскодонних відбивачів, які знаходяться в ближній або перехідній акустичній зоні.
3. Дослідити закономірності формування просторової структури луна-сигналів залежно від форми апертури п'єзоелектричних перетворювачів та довжини зондуючих імпульсів.
4. Розробити рекомендації для покращення характеристик ультразвукового контролю: рівномірності ультразвукового покриття зони контролю, точності вимірювання еквівалентних розмірів дефектів.
5. Розробити, виготовити, провести випробування та впровадити в промисловість удосконалені засоби ультразвукового неруйнівного контролю.

**Об'єктом дослідження** є ультразвукові поля пружних хвиль в ізотропному середовищі та пристрої, що застосовують інформацію, отриману під час відбиття ультразвукових пружних хвиль для неруйнівного контролю.

**Предметом дослідження** є просторова структура полів випромінювання та полів луна-сигналів, її вплив разом з іншими чинниками на точність і достовірність результатів ультразвукового неруйнівного контролю.

**Методи дослідження.** Для розробки методів аналізу просторової структури ультразвукових полів застосовані перетворення Фур'є за часовою і просторовою координатах, а також методи розв'язання граничних задач теорії пружності ізотропних середовищ. У процесі дослідження точності вимірювання еквівалентного розміру дефекту використовувались методи апроксимації функцій поліномами. У процесі планування експериментів і обробки експериментальних даних

використовувались методи математичної статистики. Під час проведення експериментів використовувались методи, стандартизовані для дефектоскопічного контролю.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертації отримані такі результати.

1. Вперше розроблено нові методи (просторово-спектральний і згортковий) для розрахунку імпульсних полів випромінювання і полів луна-сигналів прямих п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) з апертурою довільної форми з урахуванням часового регулювання коефіцієнта підсилення приймального тракту. Отримана в роботі репрезентація поля в пружному середовищі у вигляді сукупності вкладів елементарних диполів с новою інтегральною формулою для поля пружних хвиль.
2. Вперше розроблено метод обчислення полів випромінювання призматичних ПЕП з апертурою довільної форми у ближній зоні. Показано, що широко вживана під час розрахунків заміна реального призматичного випромінювача на еквівалентний „уявний випромінювач” не призводить до суттєвих похибок лише на відстанях, що лежать за межами ближньої зони.
3. Набули подальшого розвитку методи дослідження просторової структури полів пружних хвиль, які генеруються електромагнітоакустичним перетворювачем (ЕМАП) у неферомагнітному пружному середовищі. Вивчені характеристики полів зсувних та поздовжних хвиль, які відповідають окремому провіднику зі струмом залежно від його ширини та відстані до поверхні. Досліджені властивості ЕМАП із введенням ультразвуку під кутом до поверхні і з'ясовані обмеження, що накладають у даному випадку особливості механізму генерації пружних хвиль, притаманні ЕМАП.
4. Вперше досліджено зв'язок між розмірами і формою зони ефективного контролю п'єзоелектричного перетворювача з одного боку і формою його апертури і довжини імпульсу – з другого. Показано, що найбільш ефективним засобом для покращення показників рівномірності ультразвукового покриття є застосування запропонованих у роботі багатоелементних дефокусуєчих перетворювачів.
5. Удосконалені методи вимірювання розмірів дефектів, зокрема, доведено що під час вимірювання еквівалентного діаметра дефекту значний вплив на точність вимірювання має інформація про робочу частоту імпульсного дефектоскопа. Запропоновано спектральний метод уточнення робочої частоти.

**Практичне значення отриманих результатів.** Методи і чисельні алгоритми розрахунку просторової структури полів, розроблені в дисертації, є корисним інструментом для проектування як ультразвукових перетворювачів різних типів, так і акустичних систем на їх основі. З їх застосуванням розроблено широкозахоплювальні перетворювачі для контролю вагонних коліс у процесі їх виготовлення. Розроблено та впроваджено автоматичну систему неруйнівного

контролю „Уніскан-Луч“, яка успішно використовується в процесі виробництва вагонних коліс на Нижньодніпровському трубопрокатному заводі (м. Дніпропетровськ).

Проведений в дисертації аналіз ближнього поля призматичного перетворювача був використаний для розробки чисельного алгоритму автоматичного вимірювання еквівалентного діаметра дефекту прямими і призматичними перетворювачами, який було впроваджено в дефектоскопи УД2-70 і УД3-71, що виробляються серійно.

Проведений в дисертації аналіз похибок під час вимірювання еквівалентного діаметра дефекту дав змогу підвищити точність вимірювання в дефектоскопах.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: розроблено структуру алгоритму обчислень акустичного поля ультразвукових перетворювачів, проведено дослідження їх властивостей та аналіз результатів [2,6,9]; отримано загальні формули для розрахунків імпульсних полів луна-сигналів, проведено порівняння двох наближених моделей випромінювача та аналізу структури цих полів [4,5]; запропонована структура ПЕП, що забезпечує рівномірне ультразвукове покриття в заданих межах простору [10] та розроблена технологія виробництва п'єзоелектричних перетворювачів [12,13]; досліджено вплив форми апертури ПЕП і довжини імпульсів на структуру „освітленої“ зони та запропоновано алгоритм розрахунків похибок під час вимірювання еквівалентного діаметра дефекту, проведено аналіз чинників, що впливають на точність вимірювання [14,15]; запропоновано головні технічні розв'язки і впроваджено розрахунки просторової структури полів у технологію проектування [16].

**Апробація результатів дисертації.** Результати проведених досліджень доповідались: на науково-технічному семінарі „Неруйнівний контроль конструкційних і функціональних матеріалів“, 2002 р., Славськ, Фізико-механічний інститут НАНУ; на Акустичному симпозиумі „Консонанс-2003“, 2003 р., Київ, Інститут гідромеханіки НАНУ; на 4-ій національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», 2003 р., Київ, ІЕЗ ім. Патона; на науково-технічній нараді „Електромагнітні і акустичні методи неруйнівного контролю“, 2004 р., Славськ, Фізико-механічний інститут НАНУ; на 16-ій всесвітній конференції з неруйнівного контролю, 2004 р., Монреаль.

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 16 праць, у тому числі 7 статей у фахових наукових журналах і 9 доповідей у збірниках праць наукових конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури і додатків. Робота містить 150 сторінок основного тексту, 50 рисунків, 7 таблиць, додатки займають 75 сторінок (окремий том). Список літератури складає 118 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У Вступі розкривається сутність і стан науково-технічної проблеми, показано її значення для підвищення надійності і точності неруйнівного контролю, а також дана загальна характеристика роботи.

У першому розділі проведено аналіз сучасних досягнень у галузі розробки засобів акустичного контролю матеріалів і виробів. Зокрема розглянуто функціональні можливості існуючої апаратури, а також проблеми, що виникають у ході контролю, у тому числі і автоматизованому. Одна з цих проблем пов'язана з можливістю пропуску дефектів, якщо вони розташовані в таких місцях зони контролю, де луна-сигнал має зменшену амплітуду. З цього випливає, що створення зони суцільного і рівномірного ультразвукового покриття заданої зони контролю є однією з найбільш важливих задач, поставлених у процесі розробки відповідних систем контролю. Для її розв'язання проєктант має спиратись на точні кількісні уявлення щодо просторової структури полів луна-сигналів, відбитих від дефектів, під час використання перетворювачів з апертурою різної форми, що випромінюють імпульсні сигнали довільної довжини і форми. На основі згаданої інформації про просторову структуру поля одного перетворювача можна оптимізувати кількість і розташування акустичних давачів у системі. Точні уявлення про просторову структуру полів важливі також під час вимірювання еквівалентного розміру дефекту на основі так званих АВД(амплітуда, відстань, діаметр)-діаграм.

Дослідженню просторової структури полів випромінювання, полів луна-сигналів та їх впливу на достовірність результатів акустичного контролю присвячена значна кількість робіт вітчизняних і зарубіжних вчених. Це роботи П. Степанішена, В. Данілова, Л. Гутіна, Р. Кажіса, В. Гребенника, Б. Діанова, А. Лорда, К. К. Кавашіми, Д. Черли, Л. Брессе, В. Галаненко, О. Карпана та інших. Найбільшу бібліографію має задача про випромінювання прямих п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП), яка наближено зводиться до задачі Лемба про збудження хвиль у пружному півпросторі під дією поверхневих напружень. Але головна увага в цитованих роботах звертається на дослідження часової структури випромінених сигналів. І хоч ці роботи являють чималий методичний і фізичний інтерес, вони не дають відповідь про просторову структуру полів луна-сигналів. Наближений розв'язок задачі про луна-сигнали міститься в роботах В. Данілова, де розглядається луна-сигнал для ПЕП з круглою апертурою і Р. Stepanishen' для сигналів у рідині. Але в цих роботах не приділяється уваги просторовій структурі полів луна-сигналів, а використання осової симетрії ПЕП є досить серйозним обмеженням. Для якісного уявлення щодо просторової структури традиційно використовують результати досліджень поля випромінювання круглого поршня в жорсткому екрані, який випромінює в рідину. Але попри те, що просторова структура як у випадку рідини, так і для пружного середовища, обумовлена законами інтерференції хвиль, згаданих результатів недостатньо, коли йдеться про кількісні параметри

просторової структури полів луна-сигналів у пружному ізотропному середовищі, тим більше для ПЕП з апертурою довільної форми.

Набагато менше робіт присвячено призматичним ПЕП. У роботі Б. Д. Діанова розглянуто лише поле у віддаленій зоні призматичного ПЕП з круглою п'єзопластиною. Щодо електромагнітоакустичних перетворювачів (ЕМАП), то вивчення просторової структури їх акустичних полів невідомо попри те, що ЕМАП вже чималий час застосовуються для дефектоскопії об'ємних виробів.

АВД-діаграми традиційно використовуються в практиці неруйнівного контролю, особливо в процесі відбракування виробів. При цьому еквівалентний розмір дефектів обчислюється на основі деяких первісних вимірювань (амплітуди, частоти та інш.), які виконуються з певними похибками. Зв'язок цих похибок з похибкою вимірювання самого еквівалентного діаметра не з'ясований і, відповідно до цього, не сформульовані вимоги щодо точності первісних вимірювань, що знижує надійність процесу відбракування. Щодо обчислення самих АВД-діаграм, то на даний час існує чимало експериментальних досліджень, які з найбільшою повнотою втілені в ліцензійну комп'ютерну програму „АРД-Універсал” (розроблену в ЦНДІМАШ, м. Москва). Проте для призматичних ПЕП не розроблені методи і алгоритми прямого обчислення еквівалентного діаметра без явного використання АВД-діаграм оператором, які могли б бути втілені в діючі прилади з обмеженими (порівняно з комп'ютером) обчислювальними можливостями.

Тому на даному етапі розвитку методів і засобів ультразвукового контролю металоконструкцій задача підвищення точності та достовірності результатів контролю шляхом формування структури акустичних полів є важливою та актуальною.

**Другий розділ** присвячений розробці та обґрунтуванню методів розрахунку просторового розподілу амплітуд сигналів п'єзоелектричних перетворювачів, розглядається можливість заміни точно сформульованих задач про випромінення пружних хвиль перетворювачем, про їх відбиття від дефекту та про прийом перетворювачем відбитих сигналів відповідними задачами у спрощеному формулюванні. Точне формулювання задач про випромінення та про прийом відбитих сигналів передбачає розгляд сумісних коливань пружного середовища, де поширюються хвилі, і всіх елементів конструкції ПЕП. Розв'язок таких задач невідомий, оскільки він пов'язаний з великими математичними та обчислювальними труднощами, а також потребує кожного разу для обчислень конкретизації всіх параметрів ПЕП, які не впливають суттєво на просторову структуру полів. Тому доцільно перейти до спрощених задач, які враховують головні чинники, що найбільше впливають на просторовий розподіл амплітуд випромінених та луна-сигналів. Під час випромінення таким чинником є те, що дія ПЕП на середовище розподілена на скінченній ділянці поверхні, а в режимі прийому те, що електричний сигнал формується як сукупний результат внесків окремих елементарних ділянок приймальної апертури ПЕП. Тому задачу випромінення ми



спрощено замінюємо граничною задачею із заданими поверхневими напруженнями (задачею Лемба), а під час розрахунку сигналу в режимі прийому вважаємо його пропорційним до інтеграла за апертурою від нормальних переміщень частинок середовища під дією поля відбитого сигналу. За такого підходу стає можливим відділити фільтрацію сигналу резонансною механічною системою ПЕП від фільтрації під час випромінювання, відбиття і прийому і обчислювати просторовий розподіл амплітуди луна-сигналу за допомогою методу частотного синтезу у такому вигляді:

$$A(\mathbf{x}) = \max \left( \text{abs} \left( 2 \operatorname{Re} \left( \int_0^{\infty} S_0(\omega) K_{ak}(\omega, \mathbf{x}) \exp(-i\omega t) d\omega \right) \right) \right), \quad (1)$$

де:  $S_0(\omega)$  - спектр імпульсного сигналу, який вже був підданий фільтрації механічною системою ПЕП у режимах випромінювання і прийому (задається);  $K_{ak}(\omega, \mathbf{x})$  - акустична частотна характеристика, яка ввібрала в себе процеси випромінювання, відбиття і прийому.

Розглянуто задачу відбиття випроміненого поля від стандартного плоскостонного відбивача. Оскільки точного розв'язку задачі дифракції від такого відбивача не знайдено, в роботі обґрунтовано приблизне обчислення відбитого сигналу як поля пружних хвиль під дією нормальних та тангенціальних напружень, розподілених на поверхні дна плоскостонного відбивача, які дорівнюють напруженням у полі падаючих хвиль (з прогилежним знаком).

За допомогою відомих методів виведені формули для переміщень і напружень у полі пружних хвиль, які відрізняються від відомих розв'язків задачі Лемба тим, що відносяться до апертури довільної форми і тим, що хвилі типу P-SV і SH віднесені до різних складових, оскільки хвилі з горизонтальною поляризацією (SH) не сприймаються ПЕП. На основі цих формул отримано загальні співвідношення для акустичної частотної характеристики, які мають найбільш простий вигляд за умови, що зміною амплітуди поля на поверхні відбивача можна знехтувати:

$$K_{ak}(\omega, \mathbf{x}) = s K_{\sigma i}(\omega, \mathbf{x}) K_{i\omega}(\omega, \mathbf{x}), \quad (2)$$

де:  $\mathbf{x}$  - координатний вектор центра плоскостонного дефекту;  $s$  - його площина; повторення індексу  $i = 1, 2, 3$  передбачає сумачію.

$$K_{\sigma i} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{eunp}}(\alpha, \beta) F_{\sigma i}(\kappa) \exp(-\gamma_l z) \exp(i(\alpha x + \beta y)) d\alpha d\beta, \quad (3)$$

$$K_{i\omega} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{np}}(\alpha, \beta) F_{wi}(\kappa) \exp(-\gamma_l z) \exp(i(\alpha x + \beta y)) d\alpha d\beta, \quad (4)$$

де:  $\alpha, \beta$  - просторові частоти;  $S(\alpha, \beta)$  - просторові спектри апертур під час випромінювання та прийому;  $\kappa^2 = \alpha^2 + \beta^2$ ;  $\gamma_l^2 = \kappa^2 - k_l^2$ ; зміст функцій  $F_{\sigma i}(\kappa)$  і  $F_{wi}(\kappa)$  розшифровано в основному тексті роботи. Запропоновано два методи обчислення інтегралів вигляду (3), (4).

Перший з них („спектральний”) використовує той факт, що на фіксованій глибині  $z$  такі інтеграли є двовимірними перетвореннями Фур’є від просторових спектрів, трансформованих за рахунок дифракції. Для обчислення використовується алгоритм двовимірного швидкого перетворення Фур’є. Зі збільшенням глибини „спектральний” алгоритм втрачає точність. Запропоновано замінити його згортковим (або конволютивним) алгоритмом, в основі якого лежить спостереження, що трансформація Фур’є від  $\exp(-\gamma_1(z - z_0))$  є полем елементарного дробова, розміщеного на глибині  $z_0$ . Згортка цього поля з розподілом поля, обчисленого за спектральним алгоритмом на малій глибині  $z_0 > 0$ , достатній, щоб інтеграл збігався, становить математичну основу згорткового алгоритму. Послідовне використання спектрального або згорткового алгоритмів для різних глибин дає комплект площинних розподілів для відповідних глибин, які в сукупності створюють тривимірну картину просторового розподілу амплітуд сигналів (прямих сигналів під час випромінювання, або луна-сигналів в режимі прийому).

Стосовно інтеграла (3) формулу згортки можна розглядати як аналог інтеграла Релея для випромінювання у пружне середовище з тим лише зауваженням, що на відміну від рідини в неї входить розподіл поля на деякій малій відстані від перетворювача замість розподілу на самій поверхні. Така репрезентація поля пружних хвиль у твердому ізотропному середовищі, наскільки нам відомо, раніше не розглядалась. Із застосуванням наближень, характерних для зони Фраунгофера, ця формула призводить до точних співвідношень для характеристик спрямованості ПЕП з апертурою довільної форми і розмірів. У цьому розділі показано також, що дві альтернативні апроксимації дії ПЕП на пружне середовище: через фіксовані напруження (задача Лемба) і через фіксовані переміщення часток поверхні призводять до дуже близьких просторових розподілів, що підтверджує прийнятність обраної моделі.

**Третій розділ** присвячений аналізу полів випромінювання трьох типів перетворювачів: 1) прямих ПЕП; 2) призматичних (нахилених) ПЕП; 3) ЕМАП. У першому підрозділі наведено результати розрахунків просторової структури прямих ПЕП для тональних та імпульсних сигналів та проаналізовано їх відмінності для різних розмірів і форм апертури. Другий підрозділ присвячено дослідженню просторової структури призматичного ПЕП. На відміну від дослідження поля в дальній зоні для ПЕП з круглою пластиною (Д. Б. Діанов) у цій роботі головна увага була зосереджена на ближній та перехідній зонах за умови довільної (наприклад, прямокутної) форми пластини. Один із двох розроблених методів розрахунку може розглядатись як вдосконалений алгоритм Д. Б. Діанова, другий є точніший, принципово відрізняється від нього і дає можливість врахувати вплив поглинання звуку в призмі. На практиці ультразвукового неруйнівного контролю вже традиційно використовується прийом розрахунку призматичних ПЕП на основі заміни реального перетворювача „уявною” пластиною зі скоригованими розмірами, розташованою під

кутом введення на скоригованій відстані. Результати порівняння згаданого прийому з розглянутими в роботі точними методами розрахунку свідчать про те, що поля реального призматичного ПЕП і уявної пластини не співпадають. Але в переважній більшості випадків співпадають обчисленні за двома підходами межі ближньої зони і дуже близькі закони спадання амплітуди сигналу за межами ближньої зони. Проте в межах ближньої зони спостерігаються суттєві відмінності (до 3-5 дБ), що вказує на те, що користуватися спрощеною моделлю уявної пластини треба з обережністю, коли важливими є кількісні оцінки структури поля в ближній зоні призматичного ПЕП.

Третій підрозділ містить розрахунки і аналіз поля, випроміненого ЕМАП в неферромагнітне середовище. Припускалось, що форма індуктора є настільки видовженою вдовж координати  $u$ , що на більшій частині робочої зони залежністю від цієї координати можна знехтувати і розглядати задачу як двовимірну на площині  $XZ$ . Виходячи з відомих амплітуд і фаз струмів у плоских провідниках індуктора, що мають скінчену ширину  $\Delta$ , проведено аналіз структури об'ємного джерела, яке створюється вихровими струмами (перший етап) і розрахунок просторового розподілу амплітуд пружних хвиль. Вже на першому етапі аналізу з'ясовано, що навіть для нескінченно тонкого провідника індуктора об'ємний розподіл сил є досить розмитим у горизонтальній площині, що призводить до помітної спрямованості кожного провідника як джерела пружних хвиль, яка зростає зі зростанням відстані до поверхні. Ці особливості позначаються на просторовому розподілі амплітуди коливань для багатовиткового індуктора. Показано, що спроба повернути акустичну вісь за рахунок введення відповідного фазового зсуву між струмами у провідниках призводить до зменшення амплітуди в головному максимумі діаграми спрямованості і аномального зростання бокових пелюстків. Практично, кут повороту обмежено величиною  $40^\circ$  на відстані до поверхні 0,5 мм. Виявлено також, що для повороту діаграми спрямованості зсувних хвиль на великі кути ( $50^\circ$ - $60^\circ$ ) доцільно змінити поляризацію магнітного поля з вертикальної на горизонтальну. Досліджено також особливості структури ближнього поля ЕМАП зсувних хвиль відповідно до конструкції індуктора. Приклади розрахунку полів розглянутих перетворювачів зображено на рис. 1 (просторові координати на осях відкладені в мм).

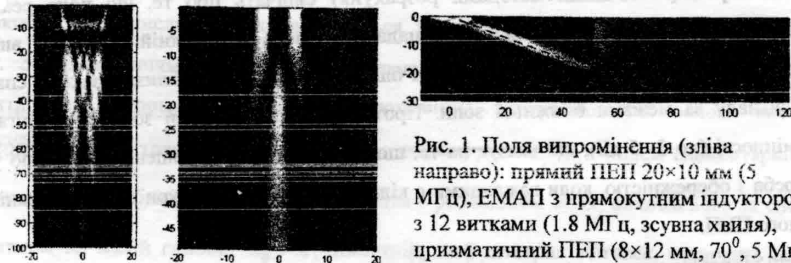


Рис. 1. Поля випромінення (зліва направо): прямий ПЕП  $20 \times 10$  мм (5 МГц), ЕМАП з прямокутним індуктором з 12 витками (1.8 МГц, зсувна хвиля), призматичний ПЕП ( $8 \times 12$  мм,  $70^\circ$ , 5 МГц, зсувна хвиля).

У четвертому розділі розглядаються чинники, що впливають на нерівномірність зони ультразвукового покриття, яка суттєво впливає на надійність акустичного неруйнівного контролю і вірогідність процесу відбракування виробів. Оскільки для зменшення нерівномірності традиційно використовується часове регулювання коефіцієнта підсилення, то досліджується просторовий розподіл амплітуди, який враховує часове регулювання в тракті підсилення:  $A'(x) = A(x)/Q(2|x|/c_1)$ . Для просторового розподілу нормованої амплітуди введено поняття зони рівномірного ультразвукового покриття за умовою  $|20 \lg(A'(x))| \leq N \text{ dB}$ , де  $N$  має бути обране з міркувань припустимої похибки вимірювання еквівалентного діаметра дефекту в процесі відбракування (див. 5 розділ). Порогу  $N = 6$  дБ відповідає освітлена зона (суцільна лінія на рисунках), а  $N = 3$  дБ (похибка  $\approx \pm 10\%$ ) – зона рівномірного покриття (переривчаста лінія). Форма і розміри цих зон розглядаються як важливі характеристики ПЕП. Відомо, що поля випромінення круглих поршнів характеризуються звуженням зони великих амплітуд наприкінці ближньої зони, та інтерференційними провалами всередині цієї зони. Прикладом вивчення цих явищ з кількісної сторони стосовно полів луна-сигналів є данні, що наведені в таблиці 1 щодо ПЕП, діаметр якого дорівнює 10 довжинам хвиль (прикладом є ПЕП типу 5К12 і 10К6) і в таблиці 2 для ПЕП з різними хвильовими діаметрами під час використання імпульсів довжиною 5 періодів.

Таблиця 1. – Параметри поля випромінювання для ПЕП типу 5К12

Довжина імпульсу в періодах	Тональний сигнал	15	10	7	5	3	2
Ширина зон пропуску всередині ближньої зони	0.42	0.354	0.35	0.34	0.25	-	-
Ширина освітленої зони в місці звуження	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29	0.36	0.39
Ширина зони рівномірного покриття в місці звуження	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17

Таблиця 2. – Параметр поля випромінювання для ПЕП з різними хвильовими інтервалами

Відношення діаметра до довжини хвилі	5	7	10	12	15	20
Ширина освітленої зони в місці звуження	0.32	0.29	0.27	0.28	0.28	0.28
Ширина зони рівномірного покриття в місці звуження	0.2	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16

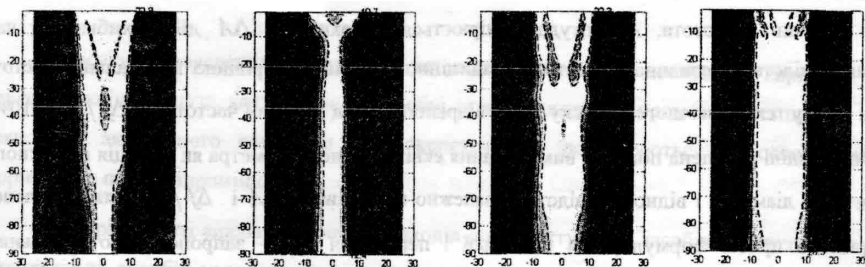


Рис. 2. Просторовий розподіл амплітуд для прямокутника, вписаного ромба, 3-елементного і 5-елементного дефокусуєчих ПЕП з габаритними розмірами  $26 \times 10$  мм, частота 2.5 МГц, довжина імпульсу 5 періодів (координати на осях у мм).

Той факт, що розміри зон значно менші за розміри ПЕП ускладнює створення суцільного ультразвукового покриття в заданих межах по ширині та глибині. Досліджено вплив форми апертури на структуру зазначених зон, у зв'язку з чим розглянуті апертури у формі прямокутника з різним співвідношенням сторін, у формі ромба та інші. Як найбільш ефективний засіб підвищення рівномірності поля запропоновано дефокусуєчих ПЕП з кількох елементів. Розглядався найбільш прийнятний з точки зору апаратурної реалізації варіант, коли розподіл чутливості вводиться лише в режимі прийому відбитих сигналів.

Розглянуто особливості імпульсних луна-сигналів, відбитих від плоскої межі пружного середовища (донних сигналів) на основі виведених точних формул для розрахунку багаторазово відбитих сигналів. Показано що стандартна „донна крива” із набору АВД-діаграм може використовуватись для калібрування під час вимірювання еквівалентного діаметра дефекту із застосування ПЕП з прямокутною апертурою лише тоді, коли диспропорція сторін не перевищує 1:0.8. В іншому разі можливі суттєві похибки. Досліджено суттєвість втрати енергії поздовжньої хвилі під час відбиття від плоскої межі за рахунок її часткової трансформації у зсувні хвилі.

У цьому розділі наведено також результати досліджень часової структури луна-сигналів. Показано, що ефект розпадання короткого імпульсу на окремі частини, передбачений Шохом для

процесу випромінення круглих пластин в рідину, який також спостерігався іншими авторами для круглих ПЕП під час випромінювання сигналів у пружне середовище, має місце також і для луна-сигналів із використанням як круглих, так і прямокутних ПЕП. Його суттєвість зменшується зі збільшенням асиметрії апертури.

П'ятий розділ складається з трьох підрозділів. Перший з них присвячений дослідженню похибок вимірювання еквівалентного діаметра дефекту, що базується на використанні АВД-діаграм. АВД-діаграми задають амплітуду  $A$  луна-сигналу в дБ як функцію двох змінних: відносного (до діаметра ПЕП) еквівалентного діаметра дефекту і відносної (до довжини ближньої зони) відстані між ПЕП і дефектом. Безпосередньо вимірюваними величинами є амплітуда луна-сигналу, відстань і частота. Амплітуда вимірюється з похибкою  $\Delta A$  дБ, похибка під час вимірювання відстані незначна, а частота традиційно приймається рівною номінальній частоті ПЕП, яка в силу технологічного допуску може відрізнятись від реальної частоти на  $\Delta f/f_0 = \pm 10\%$ .

У цьому підрозділі знайдена похибка вимірювання еквівалентного діаметра як функція відносного еквівалентного діаметра і відносної відстані залежно від похибок  $\Delta A$  і  $\Delta f/f_0$ . Для віддаленої зони отримано прості формули, для ближньої і перехідної зон – запропоновано чисельний алгоритм, який базується на зворотних АВД-діаграмах, які апроксимовано поліномами. Приклад

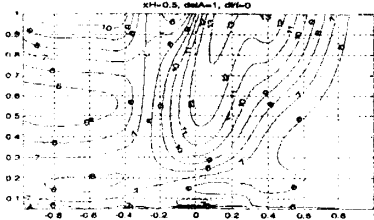


Рис. 3. Розподіл похибок внаслідок неточного вимірювання амплітуди ( $\pm 1$  дБ) на осях: нормована відстань (логарифмічний масштаб) і нормований діаметр дефекту.

розрахунків зображено на рис. 3.

Досліджено, які обмеження слід накладати на похибку у вимірюванні амплітуди і частоти, щоб похибка вимірювання еквівалентного діаметра не виходила за прийнятні межі. Рекомендовано уточнювати робочу частоту для суттєвого зменшення похибок.

У другому підрозділі розглядаються розроблені засоби автоматичного вимірювання еквівалентного діаметра з прямим висвітленням цієї характеристики дефекту на моніторі в процесі неруйнівного контролю як для прямих ПЕП, так і для призматичних ПЕП. Запропоновано спосіб визначення робочої частоти на основі спектрального аналізу луна-сигналу. Ці алгоритми втілено в дефектоскопи УД2-70 і УД3-71.

У третьому підрозділі викладено результати експериментальних досліджень точності вимірювання еквівалентного діаметра і показано, що за виконання певних умов похибка не виходить за межі  $\pm 10\%$ .

У четвертому підрозділі розглянуті результати розробки системи акустичного неруйнівного контролю вагонних коліс у процесі їх виробництва, виконаної під керівництвом і за участі автора дисертаційної роботи. У ході розробки використовувались результати, викладені в попередніх розділах. Наведено результати розробки широкозахислювального ПЕП і акустичної системи, побудованої із застосуванням таких ПЕП. Наведено результати іспитів установки на зразковому колесі зі штучними дефектами, а також висвітлено досвід експлуатації системи на заводі „Нижньодніпровський трубопрокатний завод”.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Внаслідок проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача, яка полягає в розробці та впровадженні у промисловість нових засобів і технологій акустичного контролю металоконструкцій, що базуються на основі аналізу та формування полів випромінювання.

1. У результаті аналізу існуючих підходів до проектування засобів акустичного контролю матеріалів та виробів виявлено, що існуюча методологія та розрахункова база проектування не забезпечують створення ефективних систем акустичного контролю, які б гарантували надійне виявлення дефектів та вимірювання їх еквівалентного розміру (особливо в ближній та перехідній акустичних зонах).

2. Розроблені спектральний і згортковий методи розрахунку просторової структури імпульсних акустичних полів, що випромінюються лізоелектричними (прямими і нахиленими) та електромагнітоакустичними перетворювачами, а також структури полів луна-сигналів від стандартних плоскодонних відбивачів, що є корисним і потужним інструмент, який дає можливість на стадії проектування оптимізувати акустичні системи неруйнівного контролю та підвищити їх точність і надійність.

3. Дослідження за допомогою розроблених алгоритмів просторової структури полів трьох типів випромінювачів ультразвукових хвиль: прямих ПЕП, призматичних ПЕП і ЕМАП -- виявило важливі для проектування цих випромінювачів закономірності, а саме:

- для прямих ПЕП показано, що відхилення форми апертури від центральної симетрії і зменшення довжини імпульсу, що випромінюється, зменшують нерівномірність поля;

- для призматичних ПЕП доведено, що довжина ближньої зони близька до тієї величини, яку можна розрахувати на основі моделі „уявного” джерела, але структура поля всередині ближньої зони не збігається з прогнозом, який дає згадана модель, внаслідок чого ця модель не є придатною для розробки алгоритмів вимірювання еквівалентного діаметра дефекту із застосуванням призматичних ПЕП і має бути замінена на більш точну розрахункову модель,

запропоновану в цій роботі,

- для ЕМАП показано, що наявність пасивного проміжку в прямокутному індукторі призводить до появи зони зі зменшеною амплітудою коливань у центральній частині ближньої зони. Досліджено вплив ширини провідника зі струмом і його відстані від поверхні на параметри акустичного поля зсувної хвилі і показано, що поворот максимуму спрямованості ЕМАП за рахунок зміни фаз струму в елементах індуктора призводить до суттєвої втрати амплітуди акустичної хвилі і практично обмежений кутом  $40^\circ$ .

4. Досліджено просторову структуру полів луна-сигналів з урахуванням дії часового регулювання коефіцієнта підсилення в прийомному тракті дефектоскопа. Встановлені кількісні співвідношення між хвильовими розмірами апертури ПЕП і довжиною імпульсу з одного боку і звуженням „освітленої” зони, а також розмірами ділянок можливого пропуску дефектів в ближній зоні ПЕП -- з другого боку. Показано, що проблема створення рівномірного покриття зони контролю може бути вирішена за рахунок використання вперше запропонованих дефокуруючих ПЕП (як приклад, 3- або 5-елементних) з певним розподілом амплітудно-фазової чутливості в режимі прийому. Розроблені багатоелементні ПЕП впроваджено в діючу акустичну систему неруйнівного контролю.

5. За рахунок дослідженої в роботі залежності похибки вимірювання еквівалентного діаметра дефекту від похибок під час вимірювання амплітуди луна-сигналів та робочої частоти вироблено рекомендації для підвищення точності вимірювання. Зокрема встановлено, що похибка у вимірюванні робочої частоти відіграє суттєву роль і запропоновано спектральний алгоритм її уточнення. Доведено, що за умови точного визначення робочої частоти, похибка вимірювання еквівалентного діаметра не виходить за межі  $\pm 10\%$  за умови, що похибка вимірювання амплітуди не перевищує 1.5 дБ. Теоретичні і модельні дослідження підтверджено експериментом. На основі проведених досліджень розроблено апаратурні алгоритми вимірювання еквівалентного розміру дефектів як для прямих, так і для призматичних ПЕП, які втілено в дефектоскопи УД2-70 і УД3-71.

6. Базуючись на результатах досліджень просторової структури, розроблено систему автоматичного неруйнівного контролю вагонних коліс у процесі їх виробництва. Ефективність розробок, втілених в діючу апаратуру неруйнівного контролю, підтверджена експериментально, а також досвідом їх експлуатації в умовах виробництва.



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

1. Луценко Г. Г. К вопросу о наклонном излучении объёмных сдвиговых волн электромагнитно-акустическим преобразователем. //Дефектоскопия. -2001. -№ 10, - С. 36-47.
2. Галаненко В. Б., Луценко Г. Г. Структура полей упругих волн, создаваемых электромагнитоакустическими излучателями в проводящем неферромагнитном полупространстве. //Акустичний Вісник. -2001. -№4, - С.18-26.
3. Луценко Г. Г. К вопросу о точности измерения эквивалентного диаметра дефекта при использовании АРД-диаграмм. //Техническая диагностика и неразрушающий контроль. -2003, - № 2, -С. 27-31.
4. Карпаш О. М., Луценко Г. Г., Галаненко Д. В. Дослідження просторової структури поля випромінення п'єзоелектричної пластини довільної форми. //Методи та прилади контролю якості. -2003. -№ 11. С. 3-9.
5. Луценко Г. Г., Беркута В. Г. К расчёту донных эхо-сигналов для прямых преобразователей с произвольной формой активной поверхности. //Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 2003. - № 3. -С. 11 - 14.
6. Луценко Г. Г., Галаненко В. Б., Галаненко Д. В. Исследование пространственного распределения амплитуды эхосигналов при использовании прямых пьезопреобразователей. //Дефектоскопия. -2003. -№ 12. -С. 3-12.
7. Луценко Г. Г. О погрешностях измерения эквивалентного диаметра дефекта прямыми преобразователями с использованием АРД-диаграмм. //Консонанс2003. Акуст. симпозиум. – Киев: НАНУ Ин-т гидромеханики, -2003. –С. 115 -- 119.
8. Луценко Г. Г. Зависимость амплитуды донных эхо-сигналов от расстояния для прямых преобразователей с произвольной формой активной поверхности. //Консонанс2003. Акуст. симпозиум. – Киев: НАНУ Ин-т гидромеханики, -2003. –С. 120 -124.
9. Галаненко В. Б., Луценко Г. Г. К расчёту пространственной структуры поля наклонного пьезоэлектрического преобразователя. //Консонанс2003. Акуст. симпозиум. – Киев: НАНУ Ин-т гидромеханики, -2003. - С. 56 -61.
10. Галаненко Д. В., Луценко Г. Г., Мищенко В. П. К вопросу о применении многоэлементных пьезоэлектрических преобразователей в задачах автоматизированного неразрушающего контроля. //Консонанс2003. Акуст. симпозиум. – Киев: НАНУ Ин-т гидромеханики, -2003. –С. 62-65.

11. Галаненко Д. В., Луценко Г. Г. Вопросы автоматизации и документирования результатов неразрушающего контроля. //Четверта національна науково-технічна конференція «Неруйнівний контроль та технічна діагностика». – Київ, 2003 р. -С.323-325.
12. Козак А. А., Черненко А. Н., Луценко Г. Г. Пьезоэлектрические преобразователи ультразвукового дефектоскопа УД2-70. //Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. -Львів: Фіз.-мех. ін-т НАНУ, 2002, -в. 7 “Неруйнівний контроль конструкційних та функціональних матеріалів”. -С.36-42
13. Луценко Г. Г., Галаненко В. Б. Пространственное распределение амплитуд эхо-сигналов в упругом образце для прямых ПЭП произвольной формы. //Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. -Львів: Фіз.-мех. ін-т НАНУ, 2004.- в.9. „Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів” –С. 12 – 18.
14. Loutenco G. G., Galanenko V. B., Galanenko D. V. Transient echo field resulted by ultrasonic transducer with arbitrary shape aperture in a solid. //16<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. -Montreal, 2004. - CD of Proceedings, 755\_Loutenco.pdf -8 p.
15. Loutenco G. G., Galanenko D. V., Loutenko T. M. The errors of equivalent diameter measuring by using of DGS-diagrams. //16<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing, - Montreal, 2004. - CD of Proceedings, 754\_Loutenco.pdf - 6 p.
16. Луценко Г. Г., Галаненко Д. В., Ищенко В. П., Мамчур М. А., Рябец Т. А. НК железнодорожных колёс и осей при выпуске из производства. //В мире неразрушающего контроля. -2004. -№3.-С. 24 – 27.

## АНОТАЦІЯ

Луценко Г. Г. Удосконалення засобів та методів акустичного контролю металоконструкцій. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2005 р.

Мета роботи: удосконалення засобів акустичного неруйнівного контролю на основі аналізу ультразвукових полів.

На основі розроблених методів розрахунку досліджено просторовий розподіл амплітуд у ближніх зонах полів випромінювання прямих і нахилених п'єзоелектричних (ПЕП) і електромагнітоакустичних (ЕМАП) перетворювачів, а також просторову структуру полів імпульсних луна-сигналів з урахуванням впливу часового регулювання підсилення для різної форми апертур. Запропоновано засоби зменшення нерівномірності ультразвукового покриття на

основі багатослементних дефокуруючих перетворювачів. Методи розрахунку полів впроваджені в практику проектування систем акустичного неруйнівного контролю в ході розробки діючої установки для контролю вагонних коліс у процесі їх виробництва.

Досліджено точність вимірювання еквівалентного діаметра дефекту на основі АВД-діаграм і запропоновано заходи для зменшення похибки за рахунок уточнення центральної частоти ПЕП на основі спектрального аналізу луна-сигналів. Розроблені і впроваджені в діючі пристрої засоби вимірювання еквівалентного розміру дефекту з його безпосередньою індикацією для прямих і призматичних ПЕП.

Ключові слова: акустичний неруйнівний контроль, пружні хвилі, просторовий спектр, просторова структура, пьезоелектричний перетворювач, електромагнітоакустичний перетворювач, луна-сигнал, еквівалентний діаметр дефекту.

## АННОТАЦИЯ

Лупенко Г. Г. Усовершенствование средств и методов акустического контроля металлоконструкций. – 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, Ивано-Франковск, 2005 г.

Цель работы: совершенствование средств акустического неразрушающего контроля на основе анализа ультразвуковых полей.

Работа сфокусирована на проблеме, связанной с неравномерностью пространственного распределения амплитуд сигналов в ближней зоне преобразователей, следствием чего является неравномерность ультразвукового покрытия зоны контроля в автоматических системах неразрушающего контроля. Для того чтобы обеспечить малую вероятность пропуска дефекта и гарантировать приемлемую точность измерения его параметров, следует ещё на стадии разработки опираться на количественные характеристики пространственной структуры полей преобразователей. В настоящее время таких данных, равно как и средств расчёта пространственной структуры импульсных полей в упругой изотропной среде, удобных для применения на стадии проектирования, недостаточно. Применение диаграмм направленности возможно лишь в ситуациях, когда зона контроля соответствует дальней зоне дифракции, что в большинстве случаев не имеет места. Другая проблема связана с точностью измерения эквивалентных диаметров дефектов, от чего зависит правильность принятия решений при браковке изделий. Хотя использование АРД-диаграмм является традиционным приёмом, вопрос о точности измерений не изучен.

В диссертации разработаны два метода расчёта пространственной структуры полей излучения и полей эхо-сигналов: «спектральный» - с применением быстрого преобразования Фурье по пространственным координатам – и «свёрточный», в основе которого лежит интеграл свёртки горизонтального разреза поля диполя с некоторым пространственным распределением на конечном (хотя и малом) расстоянии от поверхности ввода колебаний. Применительно к полю излучения такое представление аналогично интегралу Релея для жидкостей. С применением этих методов исследованы ближние зоны полей излучения прямых и призматических пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), электромагнитоакустических преобразователей (ЭМАП) в неферромагнитной среде, а также поля эхо-сигналов прямых ПЭП с учётом действия временной регулировки усиления при различной форме апертуры и длительности импульса. Для полей эхо-сигналов в качестве характеристик ультразвукового покрытия введены понятия зоны «освещённости», ограниченной условием уменьшения уровня на 6 дБ, и зоны «равномерного покрытия» (3 дБ), в пределах которой ошибка определения эквивалентного диаметра дефекта лежит в допустимых пределах. Изучены размеры и структура этих зон при вариации размеров и формы апертуры и длительности импульсов. Предложены способы уменьшения неравномерности ультразвукового покрытия на основе многоэлементных дефокусирующих преобразователей.

Сопоставлены поля в ближней зоне наклонного призматического ПЭП с полем, рассчитанным на основе широко распространённой приближённой модели «многого» источника, позволяет сделать вывод, что эта модель удовлетворительно предсказывает размер ближней зоны по наклонному лучу и характер спада в дальней зоне, но приводит к ошибкам порядка 1- 5 дБ при расчётах в ближней зоне.

Показано, что пространственная структура полей ЭМАП при вихретоковом механизме возбуждения в значительной мере определяется свойствами объёмного распределения сил, играющего роль источника, которое формируется одиночным проводником, а также взаимодействием этих распределений в многовитковых индукторах. Следствием такого взаимодействия является ограничение возможностей наклонного ввода ультразвука с помощью ЭМАП (не более  $40^\circ$ ). Существенную роль в этом случае играет величина воздушного зазора между индуктором и средой. Форма индуктора в виде плоской прямоугольной кольцевой катушки предопределяет особенности ближнего поля ЭМАП, отличающегося от полей ПЭП расположением и формой зон интерференционного подъёма и спада амплитуды сигнала.

Методы расчёта полей внедрены в практику проектирования систем акустического неразрушающего контроля при разработке действующей автоматической установки для контроля вагонных колёс в процессе производства.

Исследована точность измерения эквивалентного диаметра дефекта на основе АРД-диаграмм и предложены меры для снижения погрешности за счёт уточнения центральной частоты

ПЭП на основе спектрального анализа. Разработаны и внедрены в действующие устройства прямопоказывающие алгоритмы измерения эквивалентного размера дефекта для прямых и призматических ПЭП.

Ключевые слова: акустический неразрушающий контроль, упругая среда, ближняя зона, пространственный спектр, эхо-сигнал, эквивалентный диаметр дефекта, пьезоэлектрический преобразователь, электромагнитоакустический преобразователь.

### ABSTRACT

Loutsenko G. G. Improvement of metalware acoustical testing instruments and techniques. – Manuscript.

The dissertation on competition for philosophy doctor scientific degree on specialty 05.11.13 – “Devices and methods for material constitution testing” – National Technical University of Oil and Gas of Ivano-Frankovsk, Ivano-Frankovsk, 2005.

Spatial amplitude distribution within near field zones of ultrasound radiated by straight and oblique prismatic piezoelectric transducers (PET) and electromagnetoacoustic transducers (EMAT) are considered. Spatial structure of echo-signals' field is investigated for various aperture forms and sizes and different pulse signal length. Multielement defocusing PET are proposed for getting more uniform ultrasound covering of test zone. Methods developed for ultrasonic field computing have been implemented into designing practice. They were used for designing of working device for nondestructive testing of wagon wheels.

Accuracy of defect equivalent diameter measurement is investigated and some ways for accuracy improvement are proposed. Improved algorithms for equivalent diameters measurement by means of straight and prismatic PET are implemented into working devices.

Keywords: acoustical nondestructive testing, spatial spectrum, elastic medium, near field, piezoelectric transducer, electromagnetoacoustic transducer, defect equivalent diameter.