

Учредители: Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им.Е.О.Патона
Международная ассоциация «Сварка»

Издатель: Международная ассоциация
«Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
З. А. Майдан (отв. секр.),
Н. П. Алешин, А. И. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, А. А. Грузд,
А. Т. Зельниченко, М. Л. Казакевич,
О. М. Карпаш, В. В. Клюев,
А. А. Лебедев, Л. М. Лобанов,
Г. Г. Луценко, З. Т. Назарчук,
Н. В. Новиков, Г. И. Прокопенко,
В. А. Стороженко, В. А. Стрижало,
В. Г. Тихий, В. Н. Учанин,
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,
В. Е. Щербинин

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул.Боженко, 11
Институт электросварки
им.Е.О.Патона НАН Украины
Тел.: (044) 271-23-90
Факс: (044) 528-34-84, 529-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Редактор

Т. В. Юштина

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серета

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней.
При перепечатке материалов
ссылка на журнал обязательна.

СОДЕРЖАНИЕ

Борис Патон — лауреат Международной энергетической
премии «Глобальная энергия» 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*СКАЛЬСЬКИЙ В. Р., СТАНКЕВИЧ О. М., КЛИМ Б. П.,
ПОЧАПСЬКИЙ Е. П.* Особливості програмного забезпечення
акустико-емісійних засобів діагностування
(Огляд. Повідомлення 1) 5

БОНДАРЕНКО А. И. Сухой акустический контакт в системе
«преобразователь—изделие» в низкочастотной дефектоскопии
как контактная задача теории упругости (Часть. 1. Сущность
задачи о контакте упругих тел) 14

*КОШЕВОЙ В. В., РОМАНИШИН И. М., РОМАНИШИН Р. И.,
ШАРАМАГА Р. В.* Ультразвуковая компьютерная томография
на основе регистрации рассеянного структурой материала
сигнала (Часть 2) 19

ЛЮТАК И. З. Определение напряженно-деформированного
состояния трубопроводов ультразвуковыми направленными
кольцевыми волнами 25

ДАВИДЕНКО В. Ф. Об элементарной неволновой теории
поля ультразвуковых преобразователей для импульсно-
амплитудной дефектометрии 29

НОВОСТИ 37

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ШОУЧЯН КАН, МИКУЛОВИЧ В. И. Анализ вибрационных
сигналов машин с применением эмпирического
метода декомпозиции 41

СИДОРОВ В. А. Современные задачи диагностирования
технического состояния механического оборудования 47

АСТАХОВ Д. С., ГОРОДНИЧИЙ В. В. Система сжатия динами-
ческого диапазона принимаемых сигналов в измерительных
системах 53

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

КАРПАШ О. М., ЗИНЧАК Я. М., КАРПАШ М. О. Про деякі
проблемні питання методичного забезпечення у сфері
технічної діагностики 55

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

10-я Юбилейная европейская конференция-выставка по
неразрушающему контролю 59

П'ятнадцята міжнародна науково-технічна конференція
«ЛЕОТЕСТ-2010» в Славську 61

С.И. Кучуку-Яценко — 80 62

Л.М. Лобанову — 70 63

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» ТКУ-78



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

Founders: *The National Academy of Sciences of Ukraine
The E. O. Paton Electric Welding Institute
International Association «Welding»*

Publisher: *International Association «Welding»*

EDITORIAL BOARD

**Editor-in-Chief
B. E. PATON**

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
N. P. Aleshin, A. I. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, A. A. Gruzd,
A. T. Zelnichenko, M. L. Kazakevich,
O. M. Karpash, V. V. Klyuev,
A. A. Lebedev, L. M. Lobanov,
G. G. Lutsenko, Z. T. Nazarchuk,
N. V. Novikov, G. I. Prokopenko,
V. A. Storozhenko, V. A. Strizhalo,
V. G. Tikhy, V. N. Uchanin,
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,
V. E. Shcherbinin

Address

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str.,
03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (044) 271-23-90,
Fax: (044) 528-34-84, 529-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Editors

T. V. Ushtina

Electron galley

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001.
All rights reserved.

This publication and each of
the articles contained here in are
protected by copyright. Permission to
reproduce material contained in this
journal must be obtained in writing
from the Publisher.

CONTENT

Boris Paton is the winner of International Global Energy Prize..... 3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

*SKALSKII V.R., STANKEVICH O.M., KLIM B.P.,
POCHAPSKII E.P.* Features of software of acoustic-emis-
sion diagnostic means (Review. Information 1) 5

BONDARENKO A.I. Dry acoustic contact in "transducer-
item" system in low-frequency flaw detection as a contact
problem of the theory of elasticity (Part. 1. Essence of the
problem of elastic body contact) 14

*KOSHEVOJ V.V., ROMANISHIN I.M., ROMANISHIN R.I.,
SHARAMAGA R.V.* Ultrasonic computer tomography
based on recording of the signal scattered by material
structure (Part 2) 19

LYUTAK I.Z. Determination of stress-strain state of a pipe-
line by guided ultrasonic circular waves..... 25

DAVIDENKO V.F. On elementary non-wave theory of
ultrasonic transducer field for pulsed-amplitude flaw meas-
urement 29

NEWS 37

INDUSTRIAL

SHOUCHYAN KAN, MIKULOVICH V.I. Analysis of vibration
signals of machines with application of empirical method of
decomposition 41

SIDOROV V.A. Modern problems of diagnostics of tech-
nical condition of mechanical equipment 47

ASTAKHOV D.S., GORODNICHII V.V. System of compres-
sion of dynamic range of the received signals in measuring
systems 53

CERTIFICATION AND STANDARDIZATION

KARPASH O.M., ZINCHAK YA.M., KARPASH M.O. On
some problems of methodological support in technical diag-
nostics sphere 55

NEWS AND INFORMATION

10th Jubilee European Conference-Exhibition on NDT 59

15th International Scientific-Technical Conference
LEOTEST-2010 in Slavsk 61

S.I. Kuchuk-Yatsenko is 80 62

L.M. Lobanov is 70 63

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TCU-78



Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics



ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ

(Огляд. Повідомлення 1)

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. М. СТАНКЕВИЧ, Б. П. КЛИМ, Є. П. ПОЧАПСЬКИЙ

Розглянуто етапи становлення та розвитку прикладного програмного забезпечення (ППЗ) систем АЕ діагностики. Проведено порівняльний аналіз сучасного стану ППЗ АЕ-засобів провідних світових виробників. Особлива увага зосереджена на характеристичні функціональні можливості програмних продуктів компаній PAC (США), «Diapac» (Росія), «Valten Systeme» (Німеччина), «Bruel&Kjaer» (Данія), ТОВ «ИНТЕРЮНИС» (Росія), а також ППЗ АЕ-апаратури сімейства ЕМА (Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України), АЕ-комплексу АКЕМ (Національний авіаційний інститут, Україна), сімейства портативних АЕ-засобів SKOP (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України). Визначено пріоритетні напрямки та тенденції подальшого розвитку ППЗ систем АЕ-діагностування.

The stages of formation and development of application software (AS) for systems of AE diagnostics are considered. Comparative analysis of the current state of AF for AE devices of world leading manufacturers is performed. Particular attention is focused on characterizing features of software developed by PAC (USA), Diapac (Russia), Valten Systeme (Germany), Bruel&Kjaer (Denmark), YNTERYUNYS Ltd (Russia) and AS applied in AE equipment of family EMA (The E.O.Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine), AE complex AKEM (National Aviation Institute, Ukraine), the family of AE portable devices SKOP (Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine). Priorities and trends of further development of AS for systems of AE diagnostics are specified.

Актуальність проблеми. Однією з актуальних проблем сучасного технічного поступу є питання оцінки поточного стану різноманітних промислових об'єктів. Серед них обладнання нафтогазової і хімічної промисловості, теплової та атомної енергетики, трубопровідного та залізничного транспорту, авіаційно-космічної техніки, мостові конструкції, бетонні та залізобетонні споруди тощо. Адже з плином часу суттєво зростає ризик відмови обладнання після його тривалої експлуатації під дією механічних і температурних навантажень, впливу навколишнього та агресивних середовищ тощо.

Одним із важливих напрямків технічної діагностики стану виробів і прогнозування їхніх фізико-механічних характеристик є розвиток методів, що дозволяють вивчати фізичну сутність процесів, визначати їх закономірності і вплив на кінетику зміни властивостей матеріалів. Серед них важливе місце посідає метод, заснований на використанні акустичної емісії (АЕ), яка супроводжує всі процеси, що відбуваються під час руйнування матеріалу. За останні два-три десятиліття бурхливо розвинулись фундаментальні та прикладні дослідження таких процесів із широким залученням для їх пізнання явища АЕ.

Метод АЕ ґрунтується на ефективному реєструванні сигналу АЕ як носія інформації про стан досліджуваних об'єктів із подальшою його обробкою. Маючи сучасні засоби відбору, обробки і зберігання АЕ-інформації, можна здійснюва-

ти ефективно технічне діагностування їх стану у всіх сферах економіки країни.

На жаль, промислове виробництво таких електронних засобів в Україні відсутнє. Із середини 1970-х років розробкою методів, апаратних та програмних засобів АЕ-діагностики займаються переважно наукові інститути та підрозділи, а саме Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Фізико-механічний інститут (ФМІ) ім. Г. В. Карпенка НАН України, Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України, Національний авіаційний університет тощо). Зважаючи на значний світовий прогрес у розвитку програмного забезпечення (ПЗ) для АЕ-засобів стосовно прикладного промислового застосування та проведення наукових лабораторних досліджень, виникла необхідність систематизації його за функціональними можливостями.

Стан проблеми. Перші спроби здійснення оцінки існуючого зарубіжного та вітчизняного ПЗ АЕ-систем викладені у публікації [1]. Характерними ознаками для ПЗ перших приладів АЕ-діагностування, які з'явилися наприкінці 1960–1970-х років, є його складність та досить обмежені графічні можливості. Це обумовлено тогочасним рівнем розвитку операційних систем обчислювальної техніки. Найвідомішими на цей час були розробки ПЗ АЕ-систем SIMS корпорації «Dunegan/Endevco» в США, [2]. У колишньому СРСР це АЕ-системи АМУР [3] (НВО «Дальстандарт», м. Хабаровськ), АЕ-системи серії АФ [4] (НВО



«Волна», м. Кишинів), багатоканальні прилади Московського інституту ядерної енергетики [5] тощо. Із 1980-х років на ринку АЕ-систем з'являються розробки німецької компанії «Vallen Systeme» серії AMSY [6], угорської фірми «Відеотон» сімейства «ЕМА» [7] та компаній інших країн Європи та Азії.

Другий етап у розвитку ПЗ АЕ-систем пов'язаний із появою на ринку ПЗ комп'ютерної техніки сімейства операційних систем (ОС) Windows, що дало можливість створювати справді потужні програмні засоби із широкими функціональними можливостями та простим і зручним інтерфейсом. Однією з перших найпоширеніших АЕ-систем, ПЗ якої було орієнтоване на роботу в ОС Windows, стала система MISTRAS 2001 корпорації «Physical Acoustics Corporation» (PAC) (США) [8].

У 1990-х роках у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України на основі розвитку АЕ-методик технічного діагностування було створено декілька портативних засобів для визначення місць руйнування об'єктів контролю. Серед них чотириканальні прилади SVR-6, прикладне ПЗ якого розраховане на роботу в операційному середовищі DOS [9], та пізніше СК-7 [10], ПЗ якого виконане у діалоговому режимі і працює в середовищі ОС Windows. Починаючи з 2005 р. фахівцями ФМІ розпочато роботи зі створення портативної восьмиканальної акустико-емісійної системи відбору, реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії SKOP-8, яка адаптована для роботи з ОС Windows [11]. На даний час виготовлено і проведено випробування АЕ-системи на низці діючих об'єктів, відлагоджено її ПЗ, здійснено метрологічну атестацію [12].

Традиційно програмне забезпечення портативних АЕ-систем складається з мікропрограми, яка забезпечує роботу блока мікропрограмного управління вимірювальним засобом, і прикладного ПЗ, яке встановлюється в персональний комп'ютер (ПК), та виконує обробку і візуалізацію АЕ-даних, забезпечує їх збереження.

Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу сучасного стану ПЗ АЕ-засобів провідних світових виробників та визначення пріоритетних напрямків та тенденцій його подальшого розвитку.

Аналіз найпоширенішого ПЗ компанії PAC. На передових позиціях у розробці та розповсюдженні високоякісного обладнання для НК був і залишається міжнародний холдинг «Mistras Group, Inc.» (Mistras) [13], який об'єднує компанії-виробники приладів для НК і підприємства, що здійснюють роботи з технічної діагностики, багатьох країн світу (Китай, Великобританія, Франція, Японія, Бразилія, Росія, Греція, Німеччина, Нідерланди та ін.). Основою холдингу слугує компанія «Physical Acoustics Corporation» (PAC) [14] (США) — загальноновизнаний світовий

лідер у галузі акустико-емісійних технологій. ПЗ для АЕ-систем фірми PAC функціонально ідентичне для всіх типів акустико-емісійних систем — PC-2, DiSP, Samos і відрізняється лише внутрішніми командами управління електронікою, які недоступні для користувача. Прикладні програмні продукти охоплюють широкий спектр методів АЕ-діагностування, включаючи найсучасніші із них, наприклад, швидке перетворення Фур'є (FFT), аналіз даних за допомогою нейронних мереж, розпізнавання образів, вейвлет-аналіз (wavelet), тензорний момент та ін. Спільною рисою всіх пакетів програм є наявність зручного для користувача графічного інтерфейсу із можливостями здійснення різноманітних додаткових операцій (маніпулювання даними, друк, робота в мережі, експорт даних тощо). Всі програмні засоби PAC адаптовані для роботи у середовищі Windows. Існуюче ПЗ PAC класифікується за наступними категоріями [15]:

1. PACwin Suite (AEwinTM, AEwinPostTM, NoesisTM) — для загального АЕ-тестування та аналізу;
2. PACturkney (MONPAC-PLUSTM, Loose Parts Monitoring, AIMS) — для інтелектуальних експертних АЕ-систем;
3. PACremote (PAC AE Viewer, PAC Intelligent Data Provider Program, PAC-C3) — для віддалених від джерела АЕ систем;
4. PACspecial (Moment Tensor, PolyModal) — для спеціальних методів обробки сигналів АЕ;
5. PACshare (Multi-layer Dispersion Curve, Wavelets, Spectrogram & Short Time FFT) — для деяких спеціальних методів обробки сигналів АЕ, що суттєво відрізняються від загальних.

Прикладне ПЗ NoesisTM. Розроблений на основі 25-річного досвіду застосування АЕ програмний пакет PACwin Suite складається з двох основних програмних продуктів, створених на платформі Windows: це пакет збору та обробки сигналів АЕ в реальному часі AEwinTM із опційною підпрограмою постобробки AEwinPostTM, а також найрозвиненіший та затребуваний на сучасному ринку систем НК пакет постобробки NoesisTM. Він розроблений грецьким (Enviroacoustics A.B.E.E.) підрозділом PAC. Детальну характеристику пакетів програм AEwinTM) та AEwinPostTM зроблено у праці [1]. Розглянемо особливості програмного пакету NoesisTM.

ПЗ NoesisTM широко застосовується у всьому світі для розв'язання великої кількості різноманітних задач, від інспекції промислових об'єктів до космічних технологій. Алгоритми розпізнавання образів і нейронні мережі у поєднанні з функціями обчислення параметрів АЕ за записаними формами імпульсів і підтримкою зовнішніх даних, забезпечують детальне дослідження будь-яких наборів інформації, що робить Noesis потужним дослідницьким інструментом. До скла-



ду ППЗ входять також спеціальні програми «майстри», які допомагають економити час при інтерпретації даних АЕ для будь-яких задач. Можливості обробки даних і функціональність програм суттєво покращені у версії Noesis 5.0 [16]. Більше того, в останніх версіях усі можливості Noesis у поєднанні з АЕwin™ доступні для аналізу даних у реальному часі.

Пакет програм Noesis адаптований для роботи в операційних системах Windows 9x/NT4/2000/XP. Багатодокументний інтерфейс MDI дозволяє працювати одночасно з декількома документами. Стосовно можливостей файлової системи зазначимо, що Noesis підтримує формати файлів даних PAC (PCI2, DiSP, SPARTAN, MISTRAS, LOCAN) із розширенням *.DTA, *.TDA, *.WFS, а також ASCII-файли. Формат документа Noesis із розширенням *.poe забезпечує компактний та ефективний спосіб збереження інформації. Окрім того, доступним є злиття/розділення файлів багаторазового використання (*.DTA) та одночасного їх завантаження для прямого порівняння чи статистики, легкий обмін будь-якими даними з іншими Windows-додатками. У пакеті передбачені такі зручні для користувача функції як динамічний поділ вікон (1, 2 або 4 різних віконних види) та впорядкування екранних сторінок зручним для користувача способом — одночасно на екрані можна відобразити в загальному 16 активних вікон (рис. 1).

Для відображення даних Noesis пропонує різноманітні типи графіків — точковий, лінійний, гістограма, кумулятивний та ін., а також табличний спосіб представлення інформації. Користувач за бажанням може редагувати графіки, використовуючи різноманітні графічні фільтри, опції графічного збільшення тощо.

Широкий спектр мають функції обробки даних. Зокрема, є два способи вибору групи АЕ-сигналів на графіку: захоплення «мишкою» або за допомогою опцій фільтрації. Здійснений вибір автоматично відображається на всіх графіках. Програма має опції: сортування будь-яких ознак

АЕ-сигналу, у тому числі виділених програмно із форми сигналу (час, амплітуда, тривалість і т. д.); «виділення ознак» за вимогою користувача (із оцифрованих сигналів підтримує виділення ознак як у часовій, так і в частотній областях); «зонна локація джерел», що дозволяє аналізувати всю послідовність АЕ-сигналів, які відносяться до даної події. Для всіх наборів даних можливий розрахунок наступних характеристик: min і max значення, середнє значення та асиметрія вибірок; отримання/відображення кореляційної/коваріаційної матриці ознак, дендограми кореляції ознак, статистичних критеріїв, які використовуються в задачі розпізнавання, статистичних характеристик класів/кластерів (центрів кластерів, відстаней всередині та між кластерами тощо) (див. рис. 2); різноманітні алгоритми автоматичної кластеризації, у тому числі максимінна відстань, K-середнє, нейронні мережі та ін.; запис результатів кластеризації в PAC-сумісні файли даних із можливістю наступного використання як еталонних при розв'язуванні задачі класифікації.

ПЗ Noesis повністю підтримує функції відображення форм хвилі: огляд до восьми форм хвилі у будь-якому вікні за вибором користувача та з різноманітними комбінаціями синхронізації, що забезпечує найдинамічніший спосіб їх розгляду та аналізу; можливість представлення форм хвилі у різних форматах. Для представлення форм хвилі може бути використаний графічний або інший тип фільтрації даних. Зміни в параметрах налаштувань апаратних засобів негайно відображаються на формах хвилі (див. рис. 3).

Пакет Noesis призначений для детальної обробки АЕ-даних із можливістю розпізнавання образів, включаючи аналіз даних за допомогою нейронних мереж (рис 4). Пакет програм пропонує контрольоване (Supervised Pattern Recognition) SPR та неконтрольоване (Unsupervised Pattern Recognition) UPR розпізнавання образів. UPR пропонує такі функції: попередню обробку АЕ-даних, їх нормалізацію, що сприяють ефективнішому та

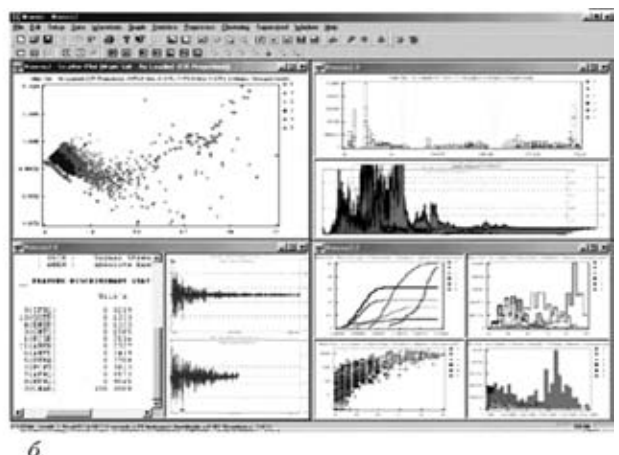
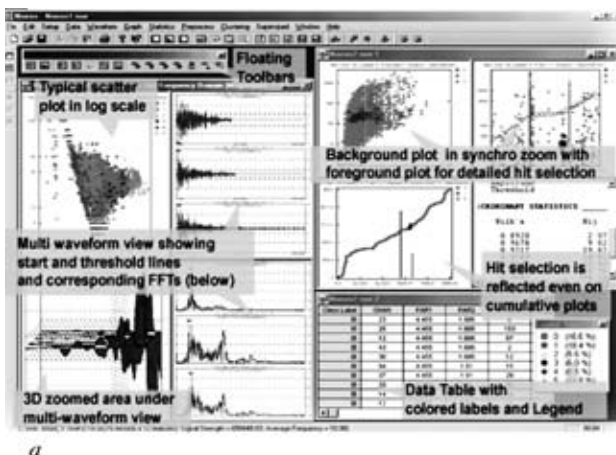


Рис. 1. Засоби графічного відображення даних АЕ-сигналів за допомогою ПЗ Noesis

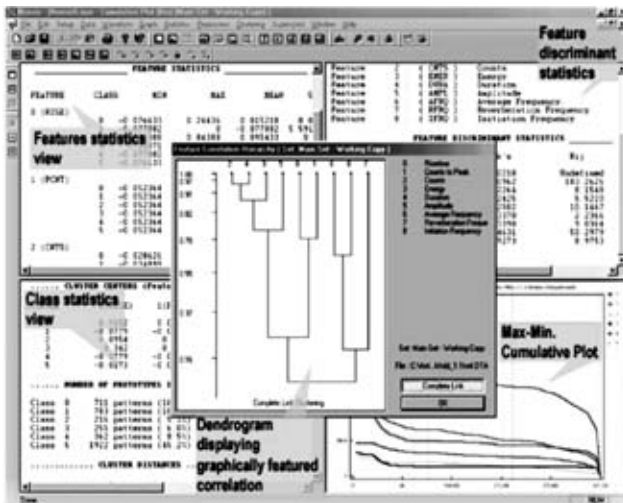


Рис. 2. Форми представлення обробки АЕ-сигналів ПЗ Noesis

арифметично об'рунтованому об'єднанню у кластери; багаторазові алгоритми UPR, включаючи нейронні мережі, для групування даних (max-min відстань, LVG мережа тощо). Всі дії застосовують до робочої копії даних, залишаючи при цьому без змін головні набори даних, для здійснення кращого аналізу; можливе ручне групування у кластери для оцінки і класифікації з використанням загальних АЕ-методів. SPR алгоритми одночасно з пакетом АЕwinTM дають можливість обробки АЕ-даних у реальному часі та класифікації за допомогою нейронних мереж.

Програмні засоби PACturkney. Програмний пакет PACturkney (MONPAC-PLUSTM, Loose Parts Monitoring, AIMS) призначений для інтелектуальних експертних АЕ-систем. Зокрема, MONPAC-PLUSTM — пакет програм з інтелектуальними процедурами та критеріями у відповідності до промислових стандартів для контролю трубопроводів та резервуарів; Loose Parts Monitoring — програмне забезпечення, яке базується на стандарті ASME OM-S/G-1997. Воно має ручні та автоматичні методи управління, здійснює аудіомоніторинг, спеціальний аналіз форм хвилі, контроль методу захисту та авторизації, багаторазо-

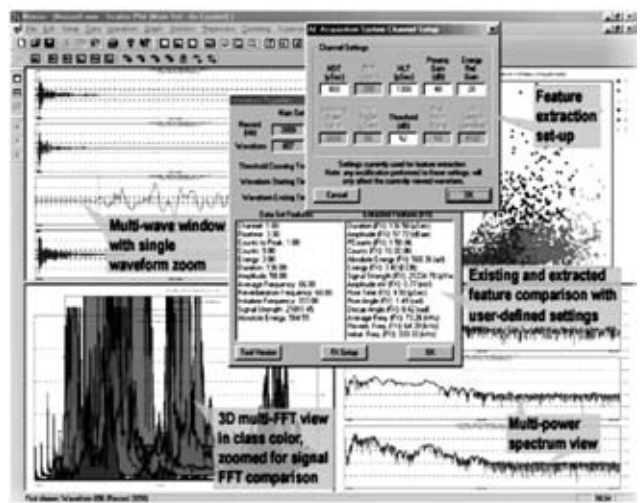


Рис. 3. Представлення форми хвилі ПЗ Noesis

вий аналіз та автоматичне діагностування; інтелектуальний пакет програм із спеціальними знаннями AIMS, призначений для тестування згідно промислових стандартів навантажувальних машин.

Програмні засоби PACremote. Група програмних засобів PACremote (PAC AE Viewer, PAC Intelligent Data Provider Program, PAC-C3) призначена для систем, віддалених від джерела АЕ. Програмний пакет PAC AE Viewer дозволяє користувачу, віддаленому від об'єкта контролю, керувати іншим мережевим комп'ютером через віртуальний робочий стіл. PAC Intelligent Data Provider Program — програмне забезпечення, яке автоматично передає сигнал тривоги, контролює сигнали та інформаційні файли базової мережевої станції для моніторингу віддаленого об'єкта через мережі Інтернет та Інтранет. PAC-C3 (Command Control Console) — програма, яка здійснює моніторинг АЕ через зв'язок із інтелектуальним ПЗ (IDP), розміщеним на системному вузлі Інтранет.

Програмні засоби PACspecial. До спеціальних методів обробки сигналів АЕ належать програмні засоби PACspecial (Moment Tensor, PolyModal). Для аналізу форм хвилі використовують ППЗ Moment Tensor, яке забезпечує визначення джерела локації, власних векторів моменту тензора, компонент моменту тензора та джерело декомпозиції компонент. PolyModal — пакет програм, який здійснює аналіз класичних хвильових методів і перетворення цифрових сигналів на основі багаточислової дисперсії та характеристик матеріалів, користувачу надається право вибору стратегії фільтрування та перетворення сигналів.

Програмні засоби PACshare. Для деяких спеціальних методів обробки сигналів АЕ, що суттєво відрізняються від загальних, використовують пакети програм PACshare (Multi-layer Dispersion Curve, Wavelets, Spectrogram & Short Time FFT). Multi-layer Dispersion Curve — програмне забезпечення, яке пропонує різноманітні хвильові методи для АЕ та ультразвукових сигналів на ос-

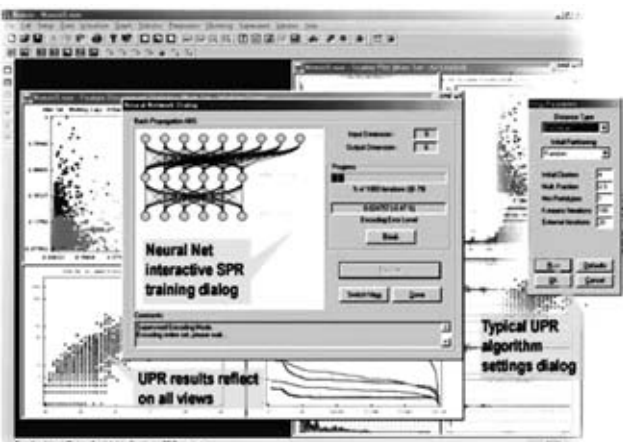


Рис. 4. Розпізнавання образів ПЗ Noesis



нові моделювання структури та управління всіма параметрами (матеріал, товщина та ін.), включаючи обробку багатшарових структур. Wavelets — програма, що здійснює обробку та аналіз АЕ-сигналів на основі вейвлет-аналізу, визначає коефіцієнти та псевдочастоту миттєвої форми хвилі АЕ, має гнучкі графічні функції. Spectrogram & Short Time FFT — за допомогою швидкого перетворення Фур'є програма визначає на малих ділянках частково покритих форм хвиль реальний час та частотну інформацію.

Застосування ПЗ компанії PAC для спеціальних технологій НК. На основі розробленого програмного забезпечення MISTRAS та її дочірні підприємства розробили низку конкретних технологій для НК у різноманітних галузях промисловості. MONPAC — застосовується під час діагностики трубопроводів, ємностей у вигляді сфер, різного типу реакторів, резервуарів тощо. TAN-KPAC — технологія перевірки стану днищ резервуарів. Дозволяє класифікувати днища резервуарів за ступенем їх пошкодження, враховуючи розміри резервуару, тип вмісту продукту, а також висоту донних нашарувань. CORPAC — прилад і технологія оцінки ступеня корозійних пошкоджень для об'єктів із нержавіючої та вуглецевої сталі, сплавів алюмінію, цирконію тощо. Застосовується для діагностики резервуарів, трубопроводів, реакторів, залізничних цистерн тощо. VPAC — технологія, що використовує АЕ-діагностику для знаходження витоків через клапани та засувки протягом служби об'єкта контролю. Пакет дозволяє користувачу оцінити внутрішню норму витoku і пов'язати цю інформацію з поточною вартістю втраченого продукту. PowerPAC-технологія дозволяє забезпечити он-лайн контроль енергетичних перетворювачів на основі виявлення та оцінки електричних і теплових дефектів. Пакет використовують для діагностики резервуарів, трубопроводів тощо.

ПЗ компанії «Diarac». Компанія «Diarac» (підрозділ PAC у Росії) пропонує програмний продукт Line-Focus [17], сучасний 32-бітний додаток Windows, призначений для постекспериментальної обробки АЕ-даних, отриманих під час контролю протяжних об'єктів (наприклад, магістральні трубопроводи). Програма розроблена з врахуванням факторів, що ускладнюють пошук справжніх джерел емісії в протяжних об'єктах, і дозволяє з високою швидкістю і вірогідністю проводити обробку та інтерпретацію даних АЕ контролю. Додаток включає типові стандартні засоби обробки АЕ даних, а також спеціальні функції, що дозволяють проводити автоматичну фільтрацію імпульсних і періодичних електромагнітних завад, здійснювати локацію джерел сигналів і оцінювати рівень їх небезпеки. Окрім стандартного лінійного алгоритму локації програма вико-

ристовує кореляційний метод локації імпульсних сигналів, що дозволяє уникнути пропуску «корисних» джерел в умовах високої активності АЕ. Із метою підвищення вірогідності виявлення справжніх джерел проводяться аналіз параметрів АЕ сигналів, що створюють події. При визначенні вірогідності події проводяться перевірки відповідності амплітуд сигналів з урахуванням заникання і оцінюється фактор спотворення форми сигналів під час поширення (зміна таких параметрів АЕ, як час наростання, тривалість, сумарний рахунок).

ПЗ компанії «Vallen Systeme». Європейський ринок НК представляє компанія «Vallen Systeme» [18] (Німеччина), заснована у 1980 р. Спектр її продукції охоплює всю вимірювальну послідовність від сенсорів, підсилювачів, вимірювальних систем до програмного забезпечення обробки АЕ-даних. АЕ-системи цієї компанії серії AMS (AMS1, AMS2, AMS3, з 1996 р. — AMSY4 та 2001 р. — AMSY-5) відомі широкому колу міжнародних користувачів (90% експорту) та відповідають всім вимогам щодо функціональності, якості та надійності таких систем. Зокрема, АЕ-система AMSY-5 допускає від 1 до 254 незалежних каналів реєстрації сигналів АЕ та до восьми 16-розрядних параметричних каналів. Їх використовують для діагностування ємностей високого тиску та трубопроводів, корпусів літаків, об'єктів із металу та композитних матеріалів, куполоподібних споруд, наземних сховищ, мостів тощо, об'єктів з армованих пластиків та кераміки, дослідження втомних характеристик матеріалів, для геотехнічних обстежень, визначення місцезнаходження часткових розрядів у трансформаторах та в багатьох інших галузях.

ПЗ, яке представляє сьогодні на ринку «Vallen Systeme», було розроблене у 1997 р. Із плином часу воно постійно модифікувалось. До головних програмних пакетів належать Vallen VisualAE™, Vallen VisualClass™, Vallen VisualTR™, а також спеціальні програмні продукти AGU-Vallen Wavelet та DTA-Converter available. Усі програмні пакети сумісні із Windows 9x/NT4/2000/XP.

ПЗ Vallen VisualAE™. Програма Vallen VisualAE™ — це стандартне програмне забезпечення для опрацювання АЕ-даних із зрозумілим для користувача інтерфейсом. За допомогою конвертора у програму можна імпортувати існуючі DTA-файли та здійснювати їх обробку і аналіз. Водночас, допустимий експорт текстових даних ASCII або форматуваних із розширенням RTF у файли MS-Word або MS-Excel та графічних файлів із розширенням BMP або JPG. VisualAETM передбачає багатозадачний режим збору та обробки даних (із розділенням цих завдань), який дозволяє додавати графіки, змінювати параметри обробки, повторно аналізувати дані і т. д. у процесі



тестування, без спотворення даних, що отримуються. Для визначення координат АЕ-джерел пропонуються різні алгоритми: лінійної, планарної, циліндричної, сферичної, мультитриплетної, тривимірної локації, окрім того, програма здійснює оцінку стану днищ резервуарів. Користувач має можливість маркування, виділення даних. У програму вбудований потужний кластерний процесор, що включає можливості редактора і фільтра кластерів. Користувач може проаналізувати форму хвилі у часовому та частотному режимах, використовуючи FFT, виділення даних, цифрові фільтри, за допомогою кореляцій Гаусса тощо. За допомогою програми можна інтегрувати статистичні дані та інформацію про форми хвилі у програмний модуль Vallen VisualClass™ для розпізнавання образів. На рис. 5 представлено приклад відображення даних АЕ-сигналів програмою Vallen VisualAE™.

III Vallen VisualClass™. Модуль Vallen VisualClass™ (створений у 1997 р.) відіграє роль класифікатора хвильових форм. Він дозволяє

аналізувати форму хвилі, класифікувати АЕ-імпульси, визначати номер класу та ступінь відмінності між класами для кожного сигналу. Водночас усі ці результати можна статистично опрацювати, відобразити графічно або у цифровому вигляді, або з використанням фільтрування АЕ-сигналів. Також результати класифікації можуть бути експортовані у програму VisualAE™. Програма включає навчальні стратегії оптимізації АЕ-сигналів та має контексну допомогу до всіх пунктів меню.

III Vallen VisualTR™. Разом із програмним модулем VisualClass™ був створений пакет Vallen VisualTR™ як інструмент прискореного аналізу хвильових форм. TR підтримує «швидкоплинні дані», під якими розуміються повні форми хвилі. VisualTR™ пропонує TR-діаграми, TR-сторінки та TR-вікна. TR-діаграма показує одну форму хвилі у часовій і/або частотній залежності. Декілька діаграм можуть бути згруповані у TR-сторінку. Декілька сторінок можна згрупувати у TR-вікно. Одночасно можуть бути активними декілька TR-

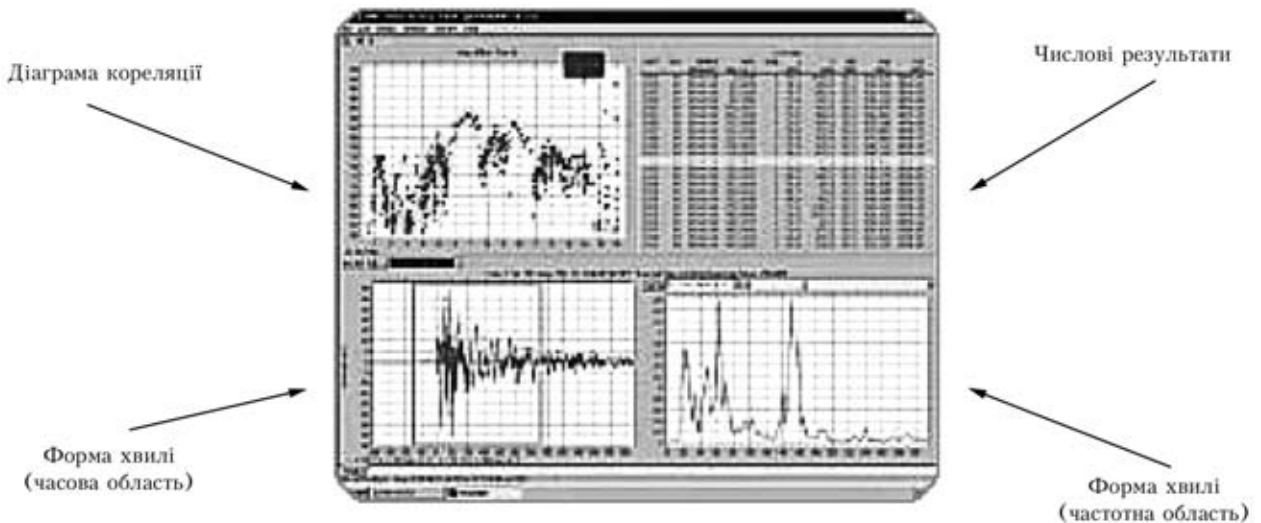


Рис. 5. Форми відображення АЕ-даних у програмі VisualAE™

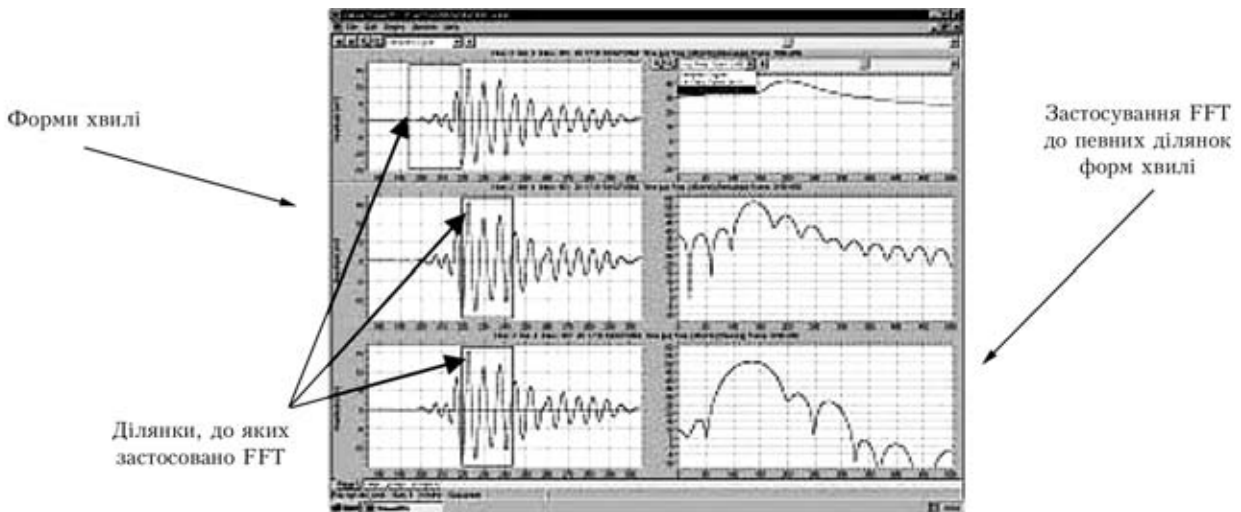


Рис. 6. Відображення форми хвилі у програмі Vallen VisualTR™

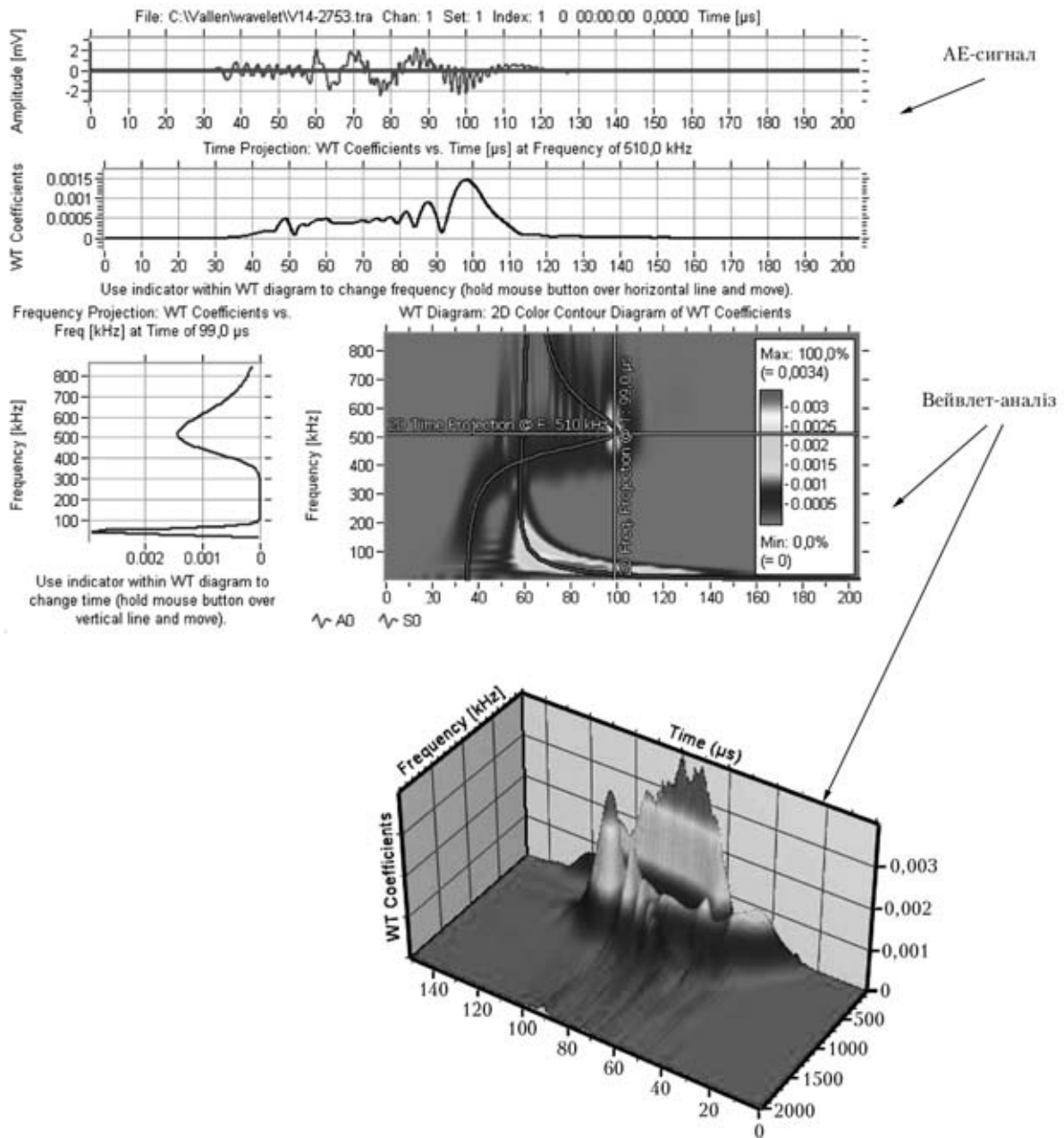


Рис. 7. Форми відображень хвильових перетворень програмою AGU–Vallen Wavelet

вікон. Ця ієрархія дозволяє користувачу у зручному режимі порівнювати форми хвилі, наприклад, різні сигнали однієї події; перші сигнали різних подій; сигнали різних випробувань (збережені у різних файлах); різні види відображення одних і тих самих сигналів.

Приклад відображення форм хвиль Vallen VisualTR™ представлений на рис. 6. Рамки на формах хвилі показують ділянку, на якій застосовано FFT.

Визначення FFT з різних частин сигналу показує відмінності між частотними спектрами. На двох нижніх графіках використані різні функції зображення сигналу.

До Vallen VisualTR™ входять додаткові інструменти: TR-Combi (полегшує вибір досліджуваних даних із багаторазових вхідних файлів до одного вихідного файлу класу для тренуваль-

ного класифікатора у VisualClass™), TR-Copy (копіює вихідні форми з одного вхідного файлу до одного вихідного файлу класу згідно переліку, який може бути згенерований автоматично програмою або вручну користувачем), TR-Indexer (перенумерує TR-індекси у TR-файлах перед об'єднанням даних у різні вхідні файли, допомагає зберігати відповідність між формами хвилі та AE-подіями), TR-Feature Extractor (виокремлює особливості форм хвилі (наприклад, спектр центра ваги) для читання, графічного зображення або фільтрування у VisualAE™), TR-Unifer (працює з VisualClass™, вимагає запис всіх TR-файлів у межах одного проекту в одному форматі і сам змінює в разі потреби формати цих файлів для забезпечення їх сумісності), TR-Filter (можливість використання визначеного користувачем частот-



ного фільтру даних форм хвилі додатково до апаратних фільтрів).

Програмний модуль DTA-converter. Конвертор файлів DTA-converter створений для переведення DTA-файлів, отриманих у різних акустико-емісійних системах Locan, Spartan, Mistras, DiSP, у Vallen формат PRI, що дозволить використовувати їх дані для опрацювання у програмах VisualAE™, VisualTR™, VisualClass™.

Програмний модуль AGU-Vallen Wavelet. Програма AGU-Vallen Wavelet [19] була створена у результаті співпраці Vallen Systeme, Університету Аояма Gakuin (AGU, Токіо, Японія) та Денверського університету (США). Група AGU здійснила дослідження часово-частотних залежностей в АЕ, а «Vallen Systeme» розробила ПЗ, яке дозволяє здійснювати вейвлет-аналіз (wavelet) та перетворення Чой-Вільямса (Choi-Williams) для індивідуальних форм хвилі. На рис. 7 зображені способи представлень часово-частотної залежності та вейвлет-аналізу (2D та 3D проєкції).

Програма пропонує також обчислення дисперсії кривих хвильових перетворень. Фахівці Vallen Systeme вбачають великий майбутній потенціал вейвлет-аналізу як одного із перспективних методів обробки АЕ-даних.

Одним из важнейших направлений технической диагностики (ТД) состояния изделий и прогнозирования их физико-механических характеристик является развитие методов, которые позволяют изучать физическую сущность процессов, определять их закономерности и влияние на кинетику изменения свойств материалов. Среди них особое место занимает метод акустической эмиссии (АЭ), которая сопровождает все процессы, происходящие во время разрушения материала.

Рассмотрены этапы становления и развития прикладного программного обеспечения (ППО) систем АЭ диагностики.

Проведен сравнительный анализ современного состояния ППО АЭ средств ведущих мировых производителей. Особое внимание уделено характеристике функциональных возможностей программных продуктов компаний PAC (США), «Diparc» (Россия), «Vallen Systeme» (Германия), «Briel&Kjaer» (Дания), ООО «ИНТЕРЮНИС» (Россия), ЗАТ "НВФ "ДИАТОН" (Россия), а также ППО АЭ аппаратуры семейства ЕМА (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины), АЭ комплекса АКЕМ (Национальный авиационный институт, Украина), семейства портативных АЭ средств SKOP (Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины).

Для программной реализации АЭ методов ТД в среде Windows в настоящее время лидируют средства визуального проектирования и объектно-

но-ориентированного программирования событий, такие как Microsoft Visual Basic (язык программирования Visual Basic) и Borland Delphi (язык программирования Object Pascal). Оба программных продукта имеют удобный визуальный интерфейс и освободили программистов от многих лишних усилий. Однако Borland Delphi вышла на первое место среди средств программной реализации АЭ методов, имея ряд существенных преимуществ: возможность использования и создания DDL-библиотек (Dynamic Link Library) и специальных элементов управления (таких как ActiveX) для наращивания функциональных возможностей; возможность реагирования на любые события, которые возникают в Windows; полная компиляция программ в машинный код, понятный компьютеру, что способствует высокому быстродействию программных продуктов.

Таким образом, параллельно с разработкой новых поколений АЭ систем совершенствуется и их программное обеспечение, выполненное на базе современных достижений в области информационных технологий и методов программирования с учетом богатого опыта реального применения АЭ, приобретенного как специалистами-разработчиками, так и многочисленными пользователями АЭ систем. К характерным особенностям программного обеспечения современных АЭ систем принадлежат:

– стандартный интерфейс и чрезвычайно разнообразные графические и функциональные возможности;

– оперативная справочная система;

– полная совместимость с программным обеспечением Windows, что способствует мощной функции буфера обмена и созданию разнообразных печатных отчетных форм;

– поддержка форматов файлов разных АЭ систем, что позволяет осуществлять анализ и обработку полученных АЭ данных разными пакетами программ и проводить сравнительный анализ результатов обработки.

Программное обеспечение самых распространенных АЭ систем имеет развитые функции работы с данными. В частности, различные способы фильтрации данных, автоматическое перенесение изменений в параметрах на все виды графиков и таблиц, сортировка любых признаков АЭ сигнала и др. Если первые программные продукты АЭ систем включали лишь базовый набор функций сбора и обработки сигналов АЭ, то с помощью существующего ППО значительно расширяется спектр методов АЭ диагностирования. К ним принадлежат: разнообразные методы локации источников сигналов (линейная, плоскостная, цилиндрическая, сферическая, мультитриплетная, трехмерная, корреляционная локация), алгоритмы ручной и автоматической кластеризации,



спектрального, кластерного и корреляционного анализов, анализа форм волн и их классификации и др., а также самые современные методы цифровой обработки сигналов АЭ: быстрое преобразование Фурье, вейвлет-анализ, алгоритмы распознавания образов. Обработка АЭ данных может быть осуществлена в режиме реального времени и в режиме постобработки. Программные системы позволяют вести глубокий статистический анализ и накопление данных технического состояния объектов в мониторинговых системах диагностики.

Последующее развитие ППО ориентировано на применение развитых технологий организации обмена данными, обеспечения управления АЭ системами через сети Интранет и Интернет, создание прикладных программных пакетов для технической диагностики конкретного класса объектов и отдельных АЭ технологий.

Развитие теоретических основ и совершенствование методов АЭ диагностирования, которые реализуются в ППО АЭ систем, способствуют более эффективной обработке сигналов АЭ, что, в свою очередь, обеспечивает возможность качественной и точной диагностики и контроля технического состояния тех или иных объектов.

1. Деякі аспекти програмного забезпечення приладів акустичної емісії / В. Скальський, Б. Оліярник, Р. Сулим, Р. Плахтій // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. — 2005. — № 531. — С. 153–158.
2. Пристрої і установки для визначення тріщиностійкості і конструкційних матеріалів методом акустичної емісії / В. Р. Скальський, О. Є. Андрейків, М. В. Лисак та ін. — Львів, 1998. — 56 с. — (Препр./ НАН України. Фіз.-мех. ін-т; № 1/98).
3. Маслов Б. Я., Холькин О. И., Калинов Г. А. Прибор АМУР-6 для обнаружения дефектов с указанием их местоположения // Дефектоскопия. — 1979. — № 12. — С. 5–8.

4. Анисимов В. К. Акустико-эмиссионный прибор АФ-34 и рекомендации по его эксплуатации // Там само. — 1985. — № 5. — С. 40–44.
5. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. — Львів: Сполом, 2005. — 396 с.
6. Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://www.vallen.de/software/index.html>.
7. Диагностическая аппаратура семейства «ЕМА» // Техн. диагностика и неразр. контроль. — 1994. — № 3. — С. 46–49.
8. MISTRAS 2001. AEDSP-32/16. User's Manual. — Rev. 1. PAC Part Number 6300-1000. — 1995. — 300 p.
9. Скальський В. Р., Пуустовий В. М., Бархан А. Портативний накопичувач вибірок сигналів акустичної емісії SVR-6 // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 3. — С. 35–46.
10. Скальський В. Р., Карпунін І. І. Модернізований портативний накопичувач вибірок сигналів акустичної емісії СК-7 // 36. наук. праць ФМІ НАН України «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів», Київ–Львів, 2002. — Вип. 7. — С. 77–82.
11. Восьмиканальний портативний прилад акустичної емісії / В. Р. Скальський, Б. О. Оліярник, Р. М. Плахтій, Р. І. Сулим // Вісник «Радіоелектроніка та телекомунікацій». — 2005. — № 1. — С. 23–30.
12. Скальський В. Діагностуємо не руйнуючи // Метали. Технології&Обладнання. — 2009. — № 24. — С. 9.
13. Mistras Group, Inc. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://www.mistrasgroup.com>.
14. Physical Acoustics Corporation. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://www.pacndt.com>.
15. Acoustic Emission Testing and Analysis Software. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://www.pacndt.com/index.aspx?products&focus=Software.htm>.
16. Noesis 5/ Envirocoustics S. A. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://www.envirocoustics.gr/noesis/noesis.htm>.
17. Дианак. Техническая диагностика. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.diapac.ru/Soft-AE.php>.
18. Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://www.vallen.de>.
19. AGU-Vallen Wavelet/ Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://www.vallen.de/wavelet/index.html>.

Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України,
Львів

Надійшла до редакції
19.03.2010

НОВАЯ КНИГА

Учебное пособие по ультразвуковому контролю сварных соединений.
Троицкий В. А., Попов В. Ю. — Киев, «Видавництво «Феникс», 2010. — 220 с.

Даны элементарные представления о теории и практике ультра звукового контроля (УЗК) преимущественно сварных соединений для специалистов первого и второго уровней квалификации по международным правилам правилам EN-473.

Описаны физические основы, приборы, эталоны, технологические приемы, используемые в практике УЗК. Для самоконтроля приведены вопросы и ответы, почти совпадающие с теми, которые используются для аттестации операторов.

Книга может быть полезна инженерно-техническим работникам, разработчикам проектной документации для ответственных металлоконструкций, а также использована как учебное пособие для начинающих дефектоскопистов.

Контактный тел.: (044) 2872666



СУХОЙ АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТАКТ В СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ–ИЗДЕЛИЕ» В НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ КАК КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ УПРУГОСТИ (Часть 1. Сущность задачи о контакте упругих тел)

А. И. БОНДАРЕНКО

Обоснована целесообразность анализа свойств сухого акустического контакта в системе «преобразователь–изделие» в низкочастотной дефектоскопии с позиций контактной задачи теории упругости. В общем виде рассмотрена сущность задачи о контакте двух упругих тел с идеально гладкими сферическими поверхностями.

Rationality of analysis of the properties of dry acoustic contact in "transducer-item" system in low-frequency flaw detection is substantiated in terms of contact problem of the theory of elasticity. The essence of the problem of contact of two elastic bodies with ideally smooth spherical surfaces is considered in the general form.

Сухой акустический контакт в системе «преобразователь–изделие» в низкочастотной дефектоскопии представляет собой соединение рабочей поверхности электроакустического преобразователя с объектом контроля, обеспечивающее передачу акустической энергии между ними без дополнительных смачивающих материалов [1]. Основным условием, обеспечивающим качество соединения преобразователя с объектом контроля, является наличие усилия прижима рабочей поверхности преобразователя к поверхности объекта контроля путем приложения постоянной статической силы. Постоянная сила может быть как сосредоточенной, передающей давление на элемент конструкции через контактную площадку, размеры которой очень малы по сравнению с размерами всего элемента, так и распределенной, приложенной непрерывно на протяжении некоторой длины или площади конструкции [2]. Известно [3], что если постоянная сила прикладывается к какому-либо упругому или твердому телу через некоторое другое упругое или твердое тело, то подобная задача в большинстве случаев является контактной задачей теории упругости.

Теория контактных задач находит широкое применение в машиностроении. Известно, что передача усилий в машинах сопровождается контактированием деталей, которые в большинстве случаев рассматриваются как упругие тела. Методы, развиваемые в теории контактных задач, позволяют найти ответ на важный вопрос о местах концентрации напряжений при контактировании деталей. На основе теории контактных задач в машиностроении разрабатываются вопросы контактной податливости под действием статической силы, когда необходимо принимать во внимание деформацию неровностей, находящихся на поверх-

ности твердого тела [4]. Однако вопросы теории контактных задач решены в основном только для тел правильной формы, характеризующихся идеальными свойствами. Сложность задачи связана с многообразием формы неровностей, различной высотой выступов, неодинаковыми условиями их взаимодействия при контакте, физико-механическими свойствами материалов, упругопластическим характером деформаций и т. д.

Впервые положения контактной задачи теории упругости были использованы в неразрушающем контроле в связи с развитием методов низкочастотной дефектоскопии на основе сухого точечного контакта наконечника преобразователя со сферической контактной поверхностью при его прижатии к поверхности многослойной конструкции постоянной сосредоточенной силой F_0 и связаны с исследованием явления контактной гибкости зоны контакта [5, 6]. Под контактной гибкостью понимается гибкость зоны соприкосновения преобразователя с объектом контроля при сухом точечном акустическом контакте [1]. При этом в низкочастотной дефектоскопии при сухом точечном контакте особое значение приобретает динамическая контактная гибкость [5, 6], обусловленная действием переменной составляющей силы при передаче акустической энергии как при возбуждении колебаний в объекте контроля, так и при приеме отраженных колебаний от различного рода несплошностей объекта контроля. Сухой контакт в настоящее время получил также распространение в связи с развитием метода дальнего действия ультразвукового контроля протяженных объектов низкочастотными направленными волнами. Анализ методов и видов сухого контакта в низкочастотной дефектоскопии в системе «преобразователь–изделие» при контроле многослой-



ных конструкций и протяженных трубопроводных систем приведен в работе [7].

Следует отметить, что нам неизвестно применение результатов контактной задачи для анализа свойств сухого контакта в системе «преобразователь–изделие» при контроле технического состояния протяженных трубопроводных систем. Поэтому ниже рассмотрена постановка контактной задачи теории упругости в зоне контакта двух упругих тел со сферическими поверхностями и изложено ее решение в общем виде, которое потребуется нам для последующего анализа свойств сухого акустического контакта в системе «преобразователь–изделие» в низкочастотной дефектоскопии.

Общая постановка контактной задачи теории упругости в зоне контакта двух тел. Базой для изучения явлений в зоне контакта тел является теория деформации двух упругих тел, которая впервые была решена Г. Герцем. Разработанная им теория контактных деформаций рассматривает два случая контакта двух тел с идеальными поверхностями: первый, когда первоначальный контакт определяется в точке, и второй, когда вначале контакт осуществляется по линии. Задача решается в предположении, что контактирующие тела являются однородными и изотропными, в зоне контакта имеют место только упругие деформации, силы давления нормальны к поверхности касания и размеры площадки контакта малы по сравнению с размерами контактирующих тел. Суть контактной задачи, сформулированной Г. Герцем, состоит в том, что если оба тела прижаты друг к другу нормальной сосредоточенной силой F_0 , то вследствие возникающих в них упругих деформаций они будут соприкасаться по некоторой части своих поверхностей около некоторой точки контакта. Общую часть поверхности обоих тел принято называть поверхностью давления, а ее контур — контуром давления.

Согласно теоретическим исследованиям Герца общая постановка и решение контактной задачи теории упругости заключается в следующем: задаются уравнения поверхностей двух соприкасающихся тел в зависимости от их формы, физические постоянные тел (коэффициенты упругости) и сила, сжимающая тела.

Требуется определить: форму и величину поверхности давления; сближение тел под действием сжимающей силы; перемещения и напряжения материала в различных точках зоны контакта обоих тел.

Герц установил, что форма поверхности давления (площадки контакта) в общем случае является эллипсом, переходящим в предельных случаях в круг или полосу, ограниченную параллельными прямыми. Первый предельный случай имеет место для двух тел, ограниченных сферическими

поверхностями, для сферы и плоскости или двух одинаковых цилиндров со взаимно перпендикулярными осями. Второй случай осуществляется при контактировании двух цилиндров, оси которых параллельны. Поэтому при анализе различных вариантов контакта двух упругих тел решение контактной задачи теории упругости сводится к определению размеров площадки контакта (радиуса круга, полуосей эллипса, ширины и длины прямоугольной полосы), величины сближения двух тел, распределения давления по поверхности площадки давления.

Герц показал, что напряжения на площадке соприкосновения параллельны вертикальной оси (оси z) и распределяются по следующему закону, представляющему собой уравнение эллипса:

$$q(x, y) = q_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (1)$$

где a — большая полуось эллипса, направленная по оси x ; b — малая полуось эллипса, направленная по оси y ; q_0 — напряжение в центре площадки соприкосновения двух тел.

Для точек на контуре поверхности соприкосновения, где $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, $q(x, y) = 0$, а в центре контура, где $x = y = 0$, $q(x, y) = q_0$.

Теоретические работы Герца, являясь лишь первым шагом в изучении контакта упругих тел, получили дальнейшее развитие в последующих работах и особенно были подвергнуты всестороннему экспериментальному исследованию А.Н. Динником, результаты которого изложены в работе [8]. В этой работе А. Н. Динником глубоко и оригинально изложена контактная задача, исследован вопрос о напряженном состоянии при контактном сжатии в точках, находящихся в районе местного сжатия. Он вычислил компоненты напряжения, проанализировал главные напряжения и впервые установил, что наибольшие касательные напряжения достигают максимума на некоторой глубине под поверхностью. В своих исследованиях контактной задачи А. Н. Динник перешел к решению принципиально отличной задачи от соприкосновения двух тел в точке. Он решил задачу касания упругих тел, ограниченных поверхностями сферической, цилиндрической и плоскостью, когда эти поверхности имеют конечные размеры и при условии, что поверхность их соприкосновения мала по сравнению с размерами тел.

На основании теоретических выводов решения контактной задачи, полученных Герцем, в дальнейшем была решена задача о местных деформациях для случая касания двух упругих тел вращения [9], выведено интегральное уравнение для решения контактной задачи Герца в общем виде [10], которое было использовано для определения



местных деформаций при сжатии упругих круговых цилиндров, радиусы которых почти равны [11]. В дальнейшем результаты решения контактной задачи как основной задачи теории упругости были обобщены в ряде монографий [2, 12–17], что позволило их применить в различных инженерных приложениях для исследования контакта различных деталей машин в машиностроении. Так, контактная задача широко используется в машиностроении при анализе процессов контактирования твердых тел при статических и динамических нагрузках [18].

Изложение решения контактной задачи в общем виде. Выше было показано, что решение контактной задачи при известных параметрах контактирующих тел сводится к определению размеров площадки контакта, величины сближения двух тел и распределения давления по поверхности тел.

Изложим кратко подход к решению контактной задачи для случая соприкосновения двух упругих тел с идеально гладкими сферическими поверхностями. Для этого воспользуемся изображением задачи о контакте двух упругих тел в виде их разреза через обе поверхности вблизи точки соприкосновения 0 (рис. 1), не являющейся особой точкой их поверхности [15]. В этой точке обе поверхности имеют общую касательную плоскость x, y . Проанализируем механизм сближения двух упругих тел со сферическими поверхностями.

Будем полагать, что радиусы кривизны R_1 и R_2 обоих тел (I и II), входящих в соприкосновение, велики по сравнению с размерами площадки контакта, что позволяет рассматривать каждое из этих тел как упругое полупространство. Поместим начало координат в точке 0 первоначального касания двух тел. Положительное направление оси z принято считать различным для обоих тел (для каждого из них отсчет координаты проводится по направлению вглубь тела), обозначая ее соответственно как z_1 и z_2 . Уравнения поверхностей, ограничивающих каждое из тел, имеют вид [2]:

$$z_1 = f_1(x, y); \quad z_2 = f_2(x, y). \quad (2)$$

Выделим вблизи точки 0 на поверхности тела I точку A_1 , а на теле II точку A_2 с общими координатами x, y . Пока между точками A_1 и A_2 не действует давление, мы имеем касание тел в одной точке 0. При этом расстояние между ними до деформации равно $z_1 + z_2$. При сжатии под действием сосредоточенной силы F_0 точки A_1 и A_2 сначала сближаются до совпадения, а далее на этом месте начинается вдавливание одного тела в другое. Так как тела сжимаются вдоль нормали в точке 0 сосредоточенной силой F_0 , то в точке контакта возникают местные деформации, приводящие к контакту по некоторой малой поверхности. Приведенное пространственное представление задачи о контакте двух тел со сферическими поверхностями (рис. 2) показывает, что их площадка контакта представляет собой круг диаметром $2a$.

Обозначим через ω_1 перемещение, вызванное местной деформацией точки A_1 в направлении z_1 поверхности верхней сферы, а через ω_2 — такое же перемещение в направлении z_2 для точки A_2 нижней сферы. Считается [15], что в процессе местного сжатия плоскость касания в точке 0 остается неподвижной, а любые две точки тел, расположенные на осях z_1 и z_2 на достаточно большом расстоянии от точки 0, сближаются друг с другом на некоторую величину α под действием силы F_0 . Тогда, согласно работам [8, 16], для каждой пары соответствующих соприкасающихся точек во всех точках области соприкосновения тел (внутри поверхности давления) имеет место равенство:

$$z_1 + z_2 + \omega_1 + \omega_2 = \alpha. \quad (3)$$

В точках же вне этой области, где обе поверхности не соприкасаются, имеет место неравенство:

$$z_1 + z_2 + \omega_1 + \omega_2 > \alpha. \quad (4)$$

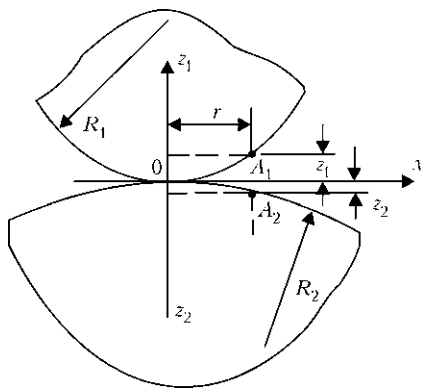


Рис. 1. Пространственное представление задачи о контакте двух упругих тел со сферическими поверхностями в виде разреза

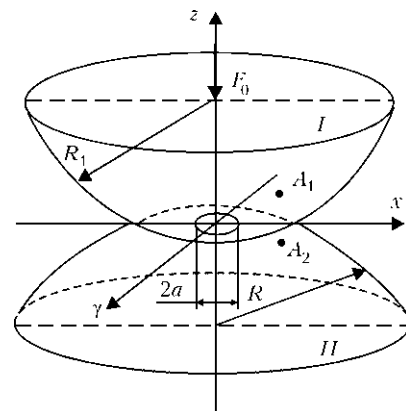


Рис. 2. Пространственное представление задачи о контакте двух упругих тел со сферическими поверхностями



Расстояние между точками A_1 и A_2 при сжатии тел будет постепенно уменьшаться на величину $\alpha - (\omega_1 + \omega_2)$. Если вследствие местного сжатия точки A_1 и A_2 , войдут в область контакта, то выражение (3) будет иметь вид:

$$\alpha - (\omega_1 + \omega_2) = z_1 + z_2. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (2) расстояния z_1 и z_2 от плоскости, касательной в точке O_1 до точек A_1 и A_2 , являются уравнениями поверхностей, ограничивающих каждое из тел. Тогда, согласно работе [15], эти расстояния до точек A_1 и A_2 , расположенных на меридиальном сечении каждой сферы и находящихся на малом расстоянии r (по сравнению с R_1 и R_2) от осей z_1 и z_2 , можно с достаточной точностью представить формулами:

$$f_1(x,y) = z_1 = \frac{r^2}{2R_1}; \quad f_2(x,y) = z_2 = \frac{r^2}{2R_2}. \quad (6)$$

Взаимное расстояние между точками A_1 и A_2 будет:

$$z_1 + z_2 = r^2 \left(\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2} \right) = \frac{r^2(R_1 + R_2)}{2R_1R_2}. \quad (7)$$

Преобразуя выражение (5) относительно суммы перемещений точек A_1 и A_2 при сжатии двух тел и подставляя в него значения z_1 и z_2 из выражения (6), для любой точки поверхности контакта двух тел со сферическими поверхностями зависимость суммы перемещений ω_1 и ω_2 будет иметь вид:

$$\omega_1 + \omega_2 = \alpha - \beta r^2, \quad (8)$$

где β — постоянная, зависящая от радиусов R_1 и R_2 соприкасаемых тел.

В нашем случае из выражения (7):

$$\beta = \frac{R_1 + R_2}{2R_1R_2}.$$

На основании рассмотренного механизма сближения двух упругих тел с идеально гладкими сферическими поверхностями путем определения перемещений ω_1 и ω_2 для точек A_1 и A_2 с учетом симметрии распределения давления между соприкасающимися телами и принимая, что соответствующие деформации тел также симметричны относительно центра O поверхности контакта, в работах [8, 12, 15, 16] приведены выражения для определения радиуса a круговой поверхности контакта и величины α сближения тел.

Для дальнейшего анализа контактной задачи теории упругости в приложении к свойствам сухого контакта в системе «преобразователь–изделие» в низкочастотной дефектоскопии воспользу-

емся результатами теории, полученными в предположении чисто упругих деформаций контактирующих тел с идеально гладкими сферическими поверхностями и приведенными в работе [15].

Радиус окружности, ограничивающей площадку контакта сжимаемых силой F_0 упругих тел с идеально гладкими поверхностями, определяется по выражению:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\pi F_0(k_1 + k_2)R_1R_2}{4(R_1 + R_2)}}. \quad (9)$$

Приняв в выражении (9)

$$D = \frac{3\pi}{4}(k_1 + k_2), \quad (10)$$

где $k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}$; $k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}$, получим выражение

(10) в виде:

$$D = \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right). \quad (11)$$

Здесь μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона; E_1, E_2 — модули Юнга первого и второго тел соответственно.

Тогда выражение (9) для определения радиуса a круговой поверхности контакта запишем в виде:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{F_0 D R_1 R_2}{R_1 + R_2}}. \quad (12)$$

Величина сближения α двух упругих тел, лежащих на линии действия сосредоточенной силы, равна [15]:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2 F_0^2 (k_1 + k_2)^2 (R_2 + R_2)}{16 R_2 R_2}}, \quad (13)$$

а с учетом выражения (11) получим:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{F_0^2 D^2 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2}}. \quad (14)$$

Из выражений (12) и (14) видно, что радиус α круговой поверхности контакта двух тел со сферической поверхностью пропорционален сжимающей сосредоточенной силе F_0 в степени 1/3, а величина сближения α силе F_0 в степени 2/3.

Исходя из формулы (1) и учитывая, что для круга $a = b$, нормальное напряжение внутри круга можно определить по выражению [8]:

$$q(x,y) = \frac{3F_0}{2\pi a^2} \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{a^2}}, \quad (15)$$

где $3F_0/2\pi a^2 = q_0$.



Если бы сжимающая сила F_0 распределялась равномерно по площади соприкосновения тел в виде круга, то доля силу F_0 на площадь круга соприкосновения πa^2 , мы всюду имели бы среднее значение напряжения $F_0/\pi a^2$. Полученный в работе [8] результат для q_0 показывает, что давление в центре круга в 1,5 раза превышает среднюю величину.

Изложенные выше результаты решения контактной задачи теории упругости с идеально гладкими сферическими поверхностями позволяют использовать их для анализа свойств сухого акустического контакта в системе «преобразователь–изделие» при соприкосновении поверхности преобразователя с поверхностью изделия при контроле многослойных конструкций и протяженных трубопроводных систем низкочастотными ультразвуковыми направленными волнами.

1. ГОСТ 23829–85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 15 с.
2. Беляев Н. М. Соппротивление материалов. — М.-Л.: Гостехиздат, 1945. — 752 с.
3. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. — М.: Наука, 1980. — 304 с.
4. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин. — М.: Машиностроение, 1966. — 196 с.
5. Ланге Ю. В., Теумин И. И. О динамической гибкости сухого точечного контакта // Дефектоскопия. — 1976. — № 2. — С. 49–60.

6. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. — М.: Машиностроение, 1991. — 272 с.
7. Бондаренко А. И. Методы низкочастотной акустической дефектоскопии с сухим контактом в системе «преобразователь–изделие» // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2010. — № 1. — С. 38–44.
8. Динник А. Н. Удар и сжатие упругих тел (1909 г.). Избранные труды. Т. 1. — Киев: Изд-во АН УССР, 1952. — 152 с.
9. Штаерман И. Я. К теории Герца местных деформаций при сжатии упругих тел // Доклады АН СССР. — 1939. — 25, № 5. — С. 360–362.
10. Штаерман И. Я. Обобщение теории Герца местных деформаций при сжатии упругих тел // Там же. — 1940. — 29, № 3. — С. 179–181.
11. Штаерман И. Я. Местные деформации при сжатии упругих круговых цилиндров, радиусы которых почти равны // Там же. — 1940. — 29, № 3. — С. 182–184.
12. Лейбензон Л. С. Краткий курс теории упругости. — М.-Л.: ОГИЗ, 1943. — 304 с.
13. Штаерман И. Я. Контактная задача теории упругости. — М.-Л.: Гостехиздат, 1949. — 272 с.
14. Беляев Н. М. Труды по теории упругости и пластичности. — М.: Гостехиздат, 1957. — 632 с.
15. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
16. Ландау Л. Б., Лифшиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 1968. — 204 с.
17. Развитие контактных задач в СССР. — М.: Наука, 1976. — 492 с.
18. Рыжов Э. В., Колесников Ю. В., Сулов А. Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. — Киев: Наук. думка, 1982. — 172 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
18.02.2010

'11

10-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ
КОНТРОЛЬ
И ТЕХНИЧЕСКАЯ
ДИАГНОСТИКА
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

22-24 МАРТА
МОСКВА
СК ОЛИМПИЙСКИЙ

NDT®

ВСЕ ПОД КОНТРОЛЕМ! 10 ЛЕТ

www.ndt-russia.ru

Техногенная диагностика • Экологическая диагностика
Лабораторный контроль • Антитеррористическая диагностика

Организаторы:

При содействии:

Тел: +7 (812) 380 6002/00, Факс: +7 (812) 380 6001, ndt@primexpo.ru, www.ndt-russia.ru



УДК 621.129.32

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЙННОГО СТРУКТУРОЙ МАТЕРИАЛА СИГНАЛА (Часть 2)

В. В. КОШЕВОЙ, И. М. РОМАНИШИН, Р. И. РОМАНИШИН, Р. В. ШАРАМАГА

Приведены результаты экспериментальных исследований по ультразвуковой компьютерной томографии на основе регистрации обратно рассеянного сигнала.

The results of experimental researches of ultrasound computerized tomography on the basis of registration backscattered signal are presented.

В части 1 настоящей статьи изложены теоретические основы метода ультразвуковой компьютерной томографии (УЗКТ) на основе регистрации рассеянного структурой материала ультразвукового (УЗ) сигнала [1]. Метод предложен авторами для реконструкции пространственного распределения (ПР) структурных характеристик материала в объеме изделия и предполагает проведение следующих операций: сканирование внешней поверхности изделия прямым совмещенным или раздельно совмещенным УЗ преобразователем (УЗП), регистрация обратно рассеянного структурой материала УЗ сигнала в виде реализации вида А-scan

[2], предварительная обработка реализаций вида А-scan с учетом затухания и формы зондирующего УЗ импульса, формирование сферических проекций, томографическая реконструкция ПР рассеивающих свойств структуры материала.

Для проведения экспериментальных исследований метода УЗКТ на рассеянном сигнале и для практической реализации новой диагностической технологии на основе этого метода [3] разработан экспериментальный образец портативного УЗ компьютерного томографа UST-05M (рис. 1) [4]. Томограф переносной, предназначен для работы непосредственно в эксплуатационных условиях

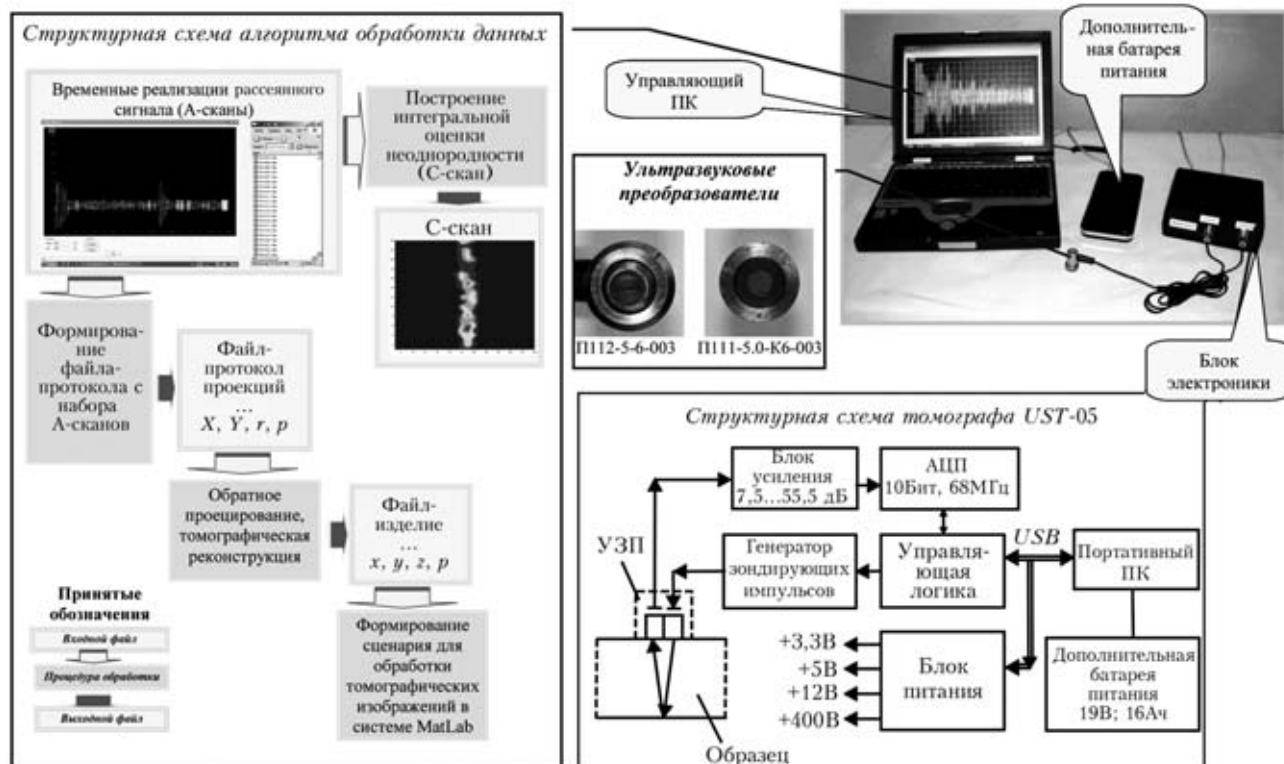


Рис. 1. Ультразвуковой компьютерный томограф UST-05M, реализующий технологию УЗ компьютерной томографии на рассеянном сигнале

© В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин, Р. В. Шарамга, 2010.



(например, на трубопроводах АЭС), содержит четыре основных блока, включая блок электроники, портативный ПК, дополнительную батарею питания, обеспечивающую 8 ч. работы, и УЗ преобразователи из стандартного комплекта дефектоскопа УД-70. Представлена также структурная схема разработанного специализированного программного обеспечения, реализующего алгоритмы сбора данных, формирования сферических проекций, предварительной обработки данных с помощью «шаблона» и томографической реконструкции.

В данной статье изложены результаты экспериментальных исследований разработанного метода УЗКТ на рассеянном сигнале с использованием томографа применительно к толстолистовому изделию ($160 \times 160 \times 32 \text{ мм}^3$) из алюминиевого сплава АМГ6 со сварным швом, полученным электронно-лучевой сваркой. Геометрическая форма образца особого значения не имеет. Плосколистное изделие выбрано из-за большей простоты реализации схемы сбора данных и алгоритмов реконструкции. Поверхность образца сканировали прямым совмещенным УЗ преобразователем (УЗП) с шагом 10 мм на частоте 4,1667 МГц, а регистрацию рассеянного структурой материала УЗ сигнала проводили в поле контроля 16×16 точек с частотой дискретизации 50 МГц. Типичная запись (А-scan) рассеянного сигнала («структурного шума»), зарегистрированного на поверхности изделия в точке (x_0, y_0) , представлена на рис. 2, а.

Анализ реализации А-scan. Из-за переходных процессов, обусловленных влиянием зондирующего УЗ импульса на приемный УЗП в течение 4,5 мкс, наблюдается «мертвая зона».

Это соответствует 225 отсчетам зарегистрированного сигнала или 13,5 мм по толщине изделия. На первом этапе проводили усреднение модулей отсчетов УЗ сигнала на определенном интервале. На рис. 2, б приведены результаты усреднения модулей отсчетов зарегистрированного УЗ сигнала длительностью 360 нс, что отвечает трем перио-

дам зондирующего сигнала. Каждый отсчет усредненных модулей реализации А-scan (рис. 2, б) характеризует «рассеивающую способность» структуры металла, находящейся в пределах части сферы, которая определяется углом раскрытия диаграммы направленности УЗП с центром в точке (x_0, y_0) и радиусом $r = t/2c$.

Проведены две серии экспериментов: построение 2D-изображений типа С-scan [1] и 3D-томографических изображений. Изображение типа С-scan (рис. 3), соответствующее поверхности изделия в пределах поля контроля, отображает усредненную по толщине изделия «рассеивающую способность» металла в области сканирования и является поисковым изображением. На основе поискового изображения определяют аномальные области в объеме изделия, которые в дальнейшем, при необходимости, детально исследуют методами 3D-реконструкции.

Интегральная оценка рассеянной составляющей. На рис. 3, а приведено реконструированное по результатам эксперимента изображение вида С-scan, соответствующее полю контроля 16×16 точек, а на рис. 3, б — то же изображение, реконструированное по результатам повторного эксперимента. Каждая точка этого изображения получена путем усреднения (по длине реализации) модулей отсчетов зарегистрированной реализации А-scan:

$$S(i, j) = \sum_{k=1}^N \frac{|S_k|}{N},$$

где N — количество отсчетов в реализации А-scan; $i, j = 1, \dots, 16$.

Как видно из рис. 3, на изображениях вида С-scan просматривается шов (на 8-й линейке по вертикале).

Проведены также экспериментальные исследования 3D-томографических технологий реконструкции рассеянной составляющей.

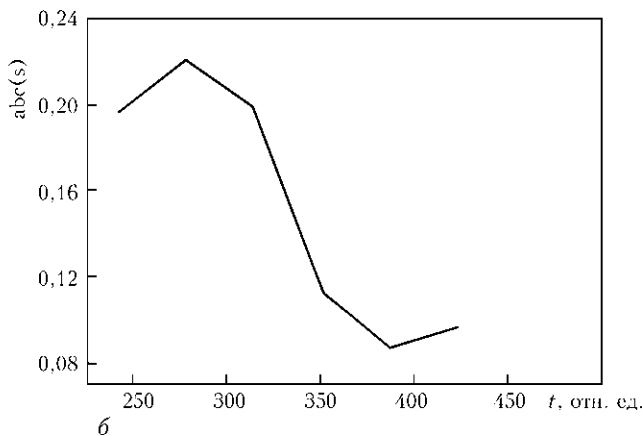
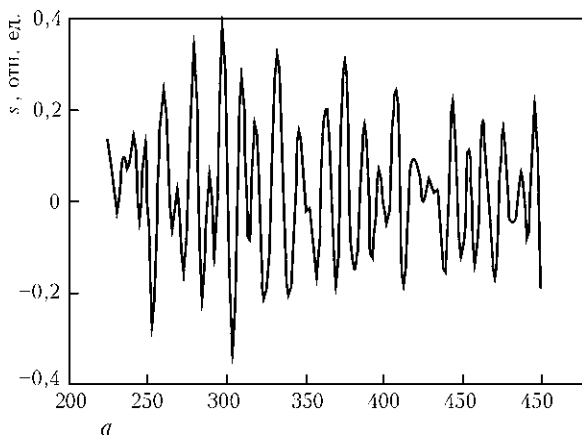


Рис. 2. Пример реализации А-scan в точке (4, 8) (а) и усредненные модули этой реализации (б)

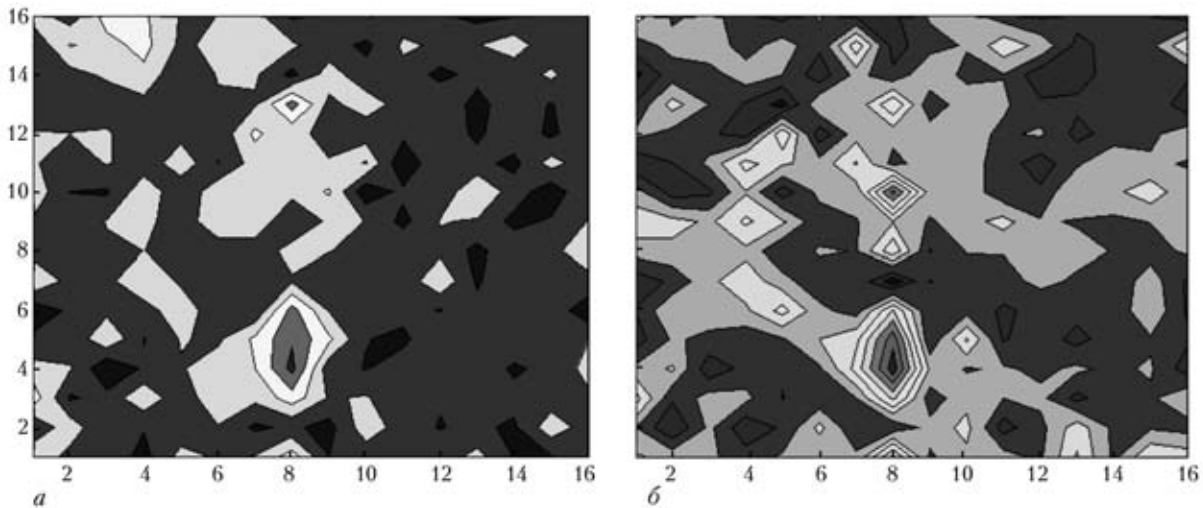


Рис. 3. Экспериментально реконструированное изображение вида С-scan: *a* — первичный; *б* — повторный измерительный эксперимент

Анализ влияния параметров схемы сбора данных. В части 1 данной статьи по результатам численного моделирования были определены тенденции влияния параметров схемы сбора данных (шага сканирования, угла раскрыва диаграммы направленности УЗП) на качество результатов томографической реконструкции [1]. Было установлено, что конечный шаг сканирования при реконструкции на основе сферических проекций в диапазоне углов, меньших 90° , приводит к отсутствию проекционных данных в пирамидообразных (конусообразных) областях между точками сканирования. Угол при вершине пирамиды определяется углом раскрыва диаграммы направленности УЗП, длина стороны основы пирамиды — шагом сканирования. Высота пирамиды определяет «мертвую зону», обусловленную конфигурацией схемы сканирования.

При угле раскрыва антенны 30° и шаге сканирования 10 мм «мертвая зона», обусловленная схемой сканирования, составляет 8,6 мм, а при шаге сканирования 5 мм — 4,3 мм. В то же время «мертвая зона», обусловленная влиянием зондирующего УЗ импульса, составляет 13,5 мм и является определяющей.

Влияние предварительной обработки реализаций А-scan. Проведены экспериментальные ис-

следования влияния на качество томографической реконструкции предварительной обработки реализаций А-scan, в частности, выбора информативного параметра (усреднение модулей или квадратов отсчетов реализаций А-scan) и количества отсчетов реализаций А-scan, по которым осуществляется усреднение.

На рис. 4 приведены экспериментально реконструированные томографические изображения одного из сечений (по толщине листового изделия перпендикулярно сварному шву), которое отвечает 4-й линейке по горизонтали на С-скане, при усреднении модулей и квадратов модулей по 18 и 36 отсчетам.

Видно, что томографическое изображение, реконструированное на основе усредненных квадратов модулей отсчетов, является более контрастным, чем томографическое изображение, реконструированное на основе усредненных модулей отсчетов, т. е. при реконструкции на основе усредненных квадратов модулей отсчетов усиливается информация о «сильно рассеивающих» неоднородностях, в то же время теряется информация о «слабо рассеивающих» неоднородностях. С этой точки зрения для оценки ПР рассеянной составляющей в как можно более широком диапазоне

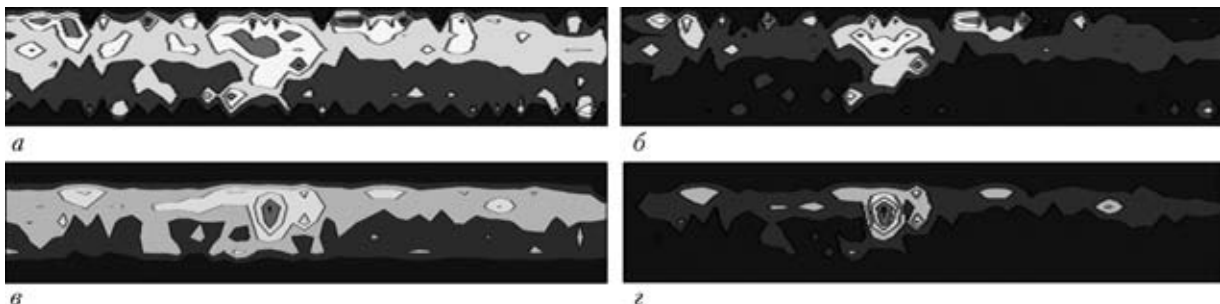


Рис. 4. Томографические изображения перпендикулярного к оси сварного шва сечения: *a, в* — соответственно усреднение модулей по 18 и 36 отсчетам; *б, г* — соответственно усреднение квадратов модулей по 18 и 36 отсчетам



интенсивностей более эффективным является усреднение модулей А-скана.

При увеличении количества отсчетов, по которым осуществляется усреднение отсчетов реализации А-scan для формирования проекционных данных в виде сферических проекций, увеличивается шаг реконструкции по радиусу, что приводит к уменьшению количества проекций в единице объема и к «гашению» высших пространственных частот. В то же время уменьшение количества отсчетов, по которым осуществляется усреднение, приводит к увеличению «зашумленности» изображения.

Проведены также экспериментальные исследования зависимости качества реконструкции от угла раскрыва диаграммы направленности УЗП и шага дискретизации по углам.

На рис. 5 приведены экспериментально реконструированные томографические изображения одного из вертикальных сечений изделия, перпендикулярного сварному шву. Сечение соответствует 4-й линейке по горизонтали на изображении С-scan (см. рис. 3) при усреднении модулей по

11 отсчетах для угла раскрыва диаграммы направленности УЗП 20 и 30° при шаге по углам 10 и 5°.

Угол раскрыва диаграммы направленности УЗП следует выбирать на основе априорных данных по результатам предварительных экспериментальных исследований зондирующего УЗП. Уменьшение угла раскрыва увеличивает «мертвую зону» по глубине (по закону котангенса), обусловленную схемой реконструкции, что можно компенсировать уменьшением шага сканирования. Уменьшение шага реконструкции по углам детализирует изображение, хотя увеличивает время реконструкции и необходимый объем памяти.

Оценка повторяемости экспериментов. Проведены повторные экспериментальные измерения обратно рассеянного УЗ сигнала в поле контроля 16×16 точек и повторные реконструкции рассеянной составляющей с целью оценки повторяемости экспериментальных результатов.

На рис. 3, б приведено изображение вида С-scan, реконструированное по результатам повторных экспериментальных измерений об-

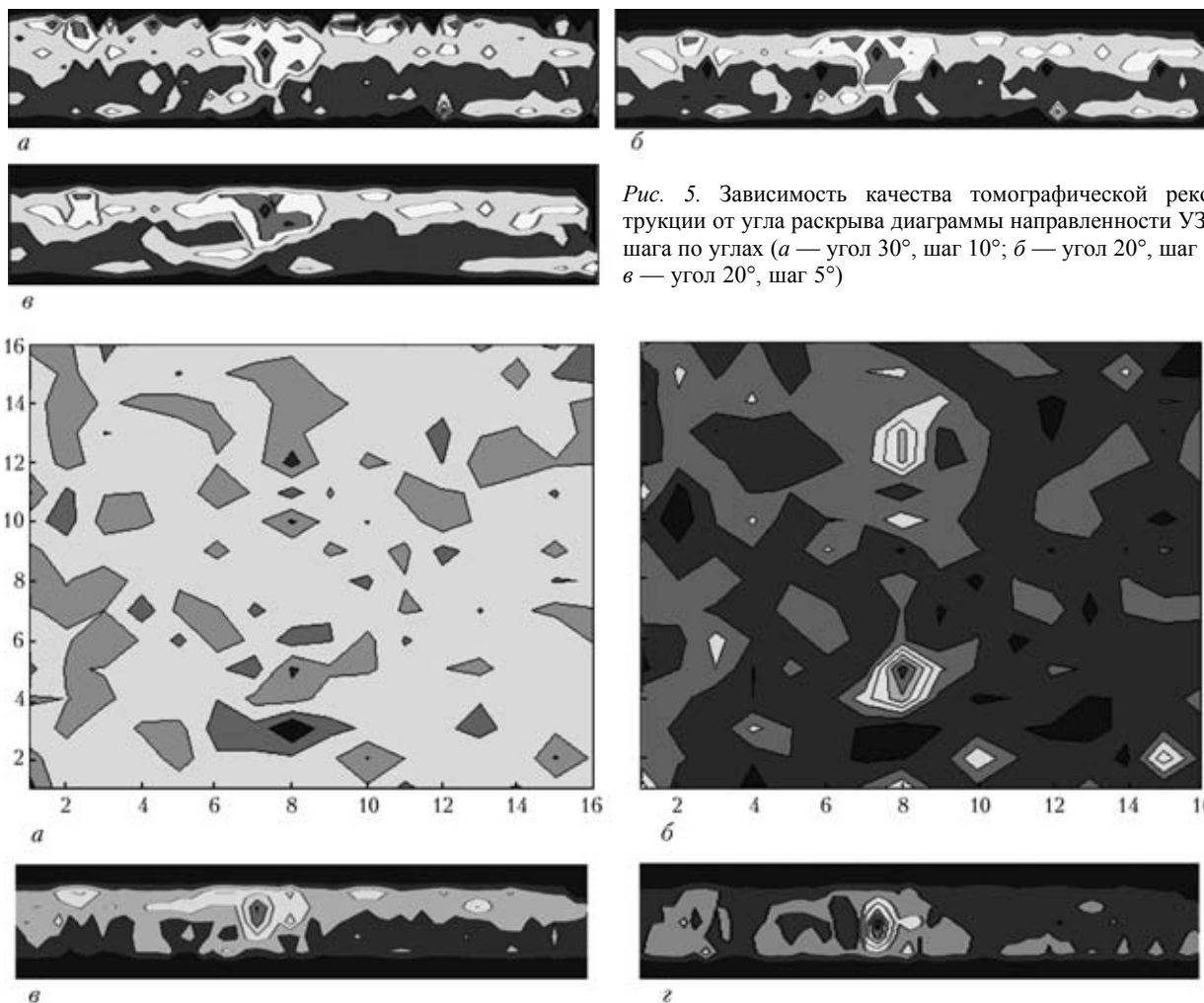


Рис. 5. Зависимость качества томографической реконструкции от угла раскрыва диаграммы направленности УЗП и шага по углам (а — угол 30°, шаг 10°; б — угол 20°, шаг 10°, в — угол 20°, шаг 5°)

Рис. 6. Изображения вида С-scan пространственных распределений коэффициента затухания (а) и «рассеивающей способности» материала с учетом затухания (б) (сравнить с рис. 2, а) и томографические изображения одного из сечений (в — без учета затухания, г — с учетом затухания)

ратнорассеянного сигнала в поле контроля 16×16 точек. Повторный эксперимент проведен через три месяца.

Следует заметить, что из-за «слабости» («зашумленности») обратно рассеянного УЗ сигнала повторяемость отдельных реализаций А-scan значительно хуже, чем повторяемость реконструированных изображений С-scan (сравнить рис. 3, а и рис. 3, б) и особенно реконструированных томографических изображений. Это обусловлено тем, что процедура томографической реконструкции помехоустойчивая и фильтрует высокочастотные шумы в результате наложения (накопления) многих измеренных проекций.

Реконструкция рассеянной составляющей с учетом затухания. При распространении в изделии УЗ сигнал затухает с глубиной. Для учета этого эффекта предложен и экспериментально апробирован алгоритм томографической реконструкции ПР рассеянной составляющей с учетом затухания. При этом определяется коэффициент затухания для каждой реализации А-scan и модифицируются значения усредненных модулей. Коэффициент затухания определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta n} \ln \frac{\bar{A}_0}{\bar{A}_{\Delta n}},$$

где

$$\bar{A}_0 = \frac{|\bar{s}_1| + |\bar{s}_2| + |\bar{s}_3|}{3},$$

$$\bar{A}_{\Delta n} = \frac{|\bar{s}_5| + |\bar{s}_6| + |\bar{s}_7|}{3},$$

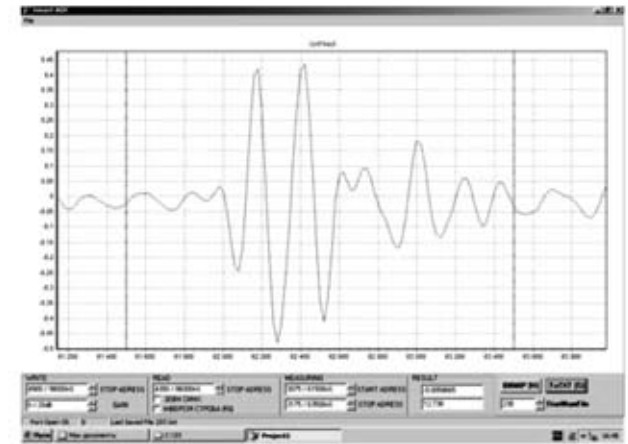
$$\bar{s}_n = \sum_{k=1}^{N_0} \frac{|s_k|}{N_0}, n = 1, \dots, N,$$

N_0 — количество отсчетов реализации А-scan, по которым осуществляется усреднение; N — количество усредненных отсчетов (в данном случае $N_0 = 36, N = 7$).

Рассчитаны коэффициенты затухания для каждой реализации А-scan $\alpha(i, j), i, j = 1, \dots, 16$ и построено изображение вида С-scan для коэффициента затухания (рис. 6, а). Видно, что изображение вида С-scan коэффициента затухания хорошо коррелирует с изображением С-scan рассеивающей способности (рис. 3).

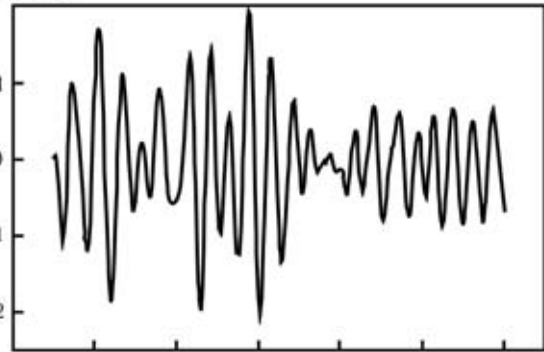
После определения коэффициента затухания для каждой реализации А-scan каждый усредненный отсчет каждой реализации А-scan модифицировался в соответствии с выражением:

$$\tilde{s} = \bar{s}_n e^{\alpha n}, n = 1, \dots, N.$$



а

s, отн. ед.



б

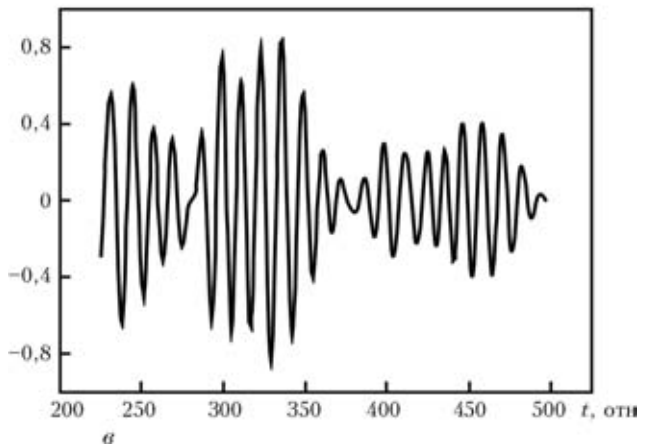


Рис. 7. Отраженный донный сигнал (а), реализация вида А-scan (б) и взаимокорреляционная функция реализации вида А-scan с отраженным донным сигналом

На основе модифицированных усредненных отсчетов построено изображение вида С-scan (рис. 6, б) и проведена 3D-томографическая реконструкция ПР рассеянной составляющей с учетом затухания (рис. 6, в). Видно, что учет затухания приводит к существенному улучшению качества реконструированного томографического изображения по глубине изделия.

Экспериментальная реконструкция на основе взаимокорреляционной функции. Для учета влияния формы зондирующего УЗ сигнала на

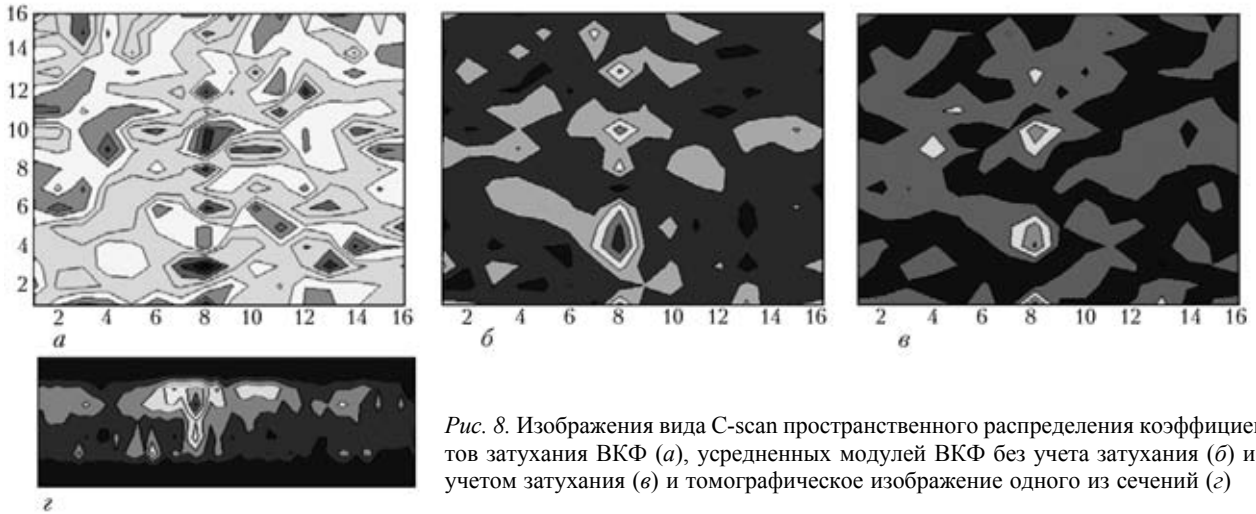


Рис. 8. Изображения вида C-scan пространственного распределения коэффициентов затухания ВКФ (а), усредненных модулей ВКФ без учета затухания (б) и с учетом затухания (в) и томографическое изображение одного из сечений (г)

качество реконструкции проведены экспериментальные исследования возможности использования взаимокорреляционной функции (ВКФ) рассеянного сигнала с отраженным донным сигналом в качестве информативного параметра о «рассеивающей способности» материала.

На рис. 7, а приведена осциллограмма отраженного донного сигнала, на рис. 7, б — пример реализации вида A-scan, зарегистрированной в точке с координатами (4, 7), а на рис. 7, в — ВКФ этой реализации s_k , $k = 1, 2, \dots$, с отраженным донным сигналом u_k , $k = 1, 2, \dots$, рассчитанная по формуле:

$$W_m(i, j) = \sum_k u_k s_{k+m}.$$

На основе усредненных по 36 отсчетам модулей ВКФ рассчитаны коэффициенты затухания ВКФ (по первым и следующим трем усредненным отсчетам) и построены изображения вида C-scan ПР коэффициентов затухания ВКФ (рис. 8, а), усредненных модулей ВКФ без учета затухания (рис. 8, б) и с учетом затухания (рис. 8, в), а также томографическое изображение одного из сечений (г).

Отметим, что применение ВКФ повышает помехоустойчивость томографической реконструкции, позволяет учитывать форму зондирующего УЗ сигнала и уточнять искомое пространственное распределение.

Выводы

Изложены результаты экспериментальных исследований разработанного метода УЗ компьютерной

томографии на основе рассеянного сигнала. Исследования проведены на толстолистовом изделии из алюминиевого сплава со сварным швом с использованием разработанного авторами портативного УЗ компьютерного томографа UST-05M, реализующего диагностические технологии томографической реконструкции пространственного распределения «рассеивающей способности» структуры материала на основе сканирования поверхности изделия прямым пьезопреобразователем и регистрации обратно рассеянного сигнала в виде реализаций A-scan. Эксперименты подтвердили информативность метода и его эффективность для решения задач оценивания изменений объемной однородности структуры металла в процессе его эксплуатации.

1. *Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала. Часть 1* / В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2010. — № 2. — С. 37–42.
2. *Акустические методы контроля* / Под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
3. *Спосіб оцінки деградації матеріалу на основі томографічних зображень* / В. В. Кошовий, І. М. Романишин, Р. І. Романишин та ін. // Декларативний патент на корисну модель. Заявка ФМІ НАНУ № u 2009 02646 від 23.03.2009 р. Рішення про видачу № 8023/1 від 03.07.2009 р. — Київ: ДП «Український інститут промислової власності».
4. *Впровадження технології ультразвукової комп'ютерної томографії для моніторингу експлуатаційної деградації металу товстостінних елементів АЕС* / Звіт про НДР (заклучний). № держреєстрації 01070005232. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2009. — 104 с.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ НАПРАВЛЕННЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ВОЛНАМИ

И. З. ЛЮТАК

Представлен один из подходов к определению напряженно-деформированного состояния трубопроводов малых и больших диаметров ультразвуковыми направленными кольцевыми волнами, а также графические зависимости скорости распространения восьми мод ультразвуковых направленных кольцевых волн от величины механических напряжений в стенке трубопровода.

The paper presents one of the approaches to determination of the stress-strain state of large and small diameter pipelines by ultrasonic guided circular waves, as well as graphic dependencies of the velocity of propagation of eight modes of ultrasonic guided circular waves on the magnitude of mechanical stresses in the pipeline wall.

В Украине эксплуатируется значительное количество трубопроводов, которые подвергаются силовым воздействиям вследствие сдвига грунтов, перераспределения нагрузок от проседания фундаментов и т. д. Определение деструктивных силовых воздействий на трубопроводы в эксплуатационных условиях, приводящих к изменению механических напряжений и деформаций в их стенках, является одной из важных задач.

Одним из наиболее распространенных методов, в котором используется зависимость скорости распространения УЗ волн от величины напряженно-деформированного состояния (НДС) металла является УЗ, основанный на явлении акустоупругости (ЯА).

Определением НДС металла трубопроводов с помощью УЗ волн занимаются ряд научно-исследовательских учреждений в Украине и за ее пределами. Отечественные ученые А. Гузь, А. Гуца, зарубежные Д. Игл и К. Винклер заложили основы подхода к определению НДС технологических объектов УЗ волнами [1–3]. При дальнейших исследованиях особое внимание уделялось усовершенствованию моделей зависимости скорости направленных УЗ волн от величины НДС [3–6]. В Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа на базе кафедры методов и приборов контроля качества и сертификации продукции разрабатываются методы определения НДС в стенках трубопроводов с использованием объемных волн (продольных и поперечных), а также мод направленных кольцевых волн.

Целью данной работы является усовершенствование модели определения величины НДС металла трубопроводов в зависимости от изменения скорости распространения мод УЗ направленных кольцевых волн (УЗНКВ).

Рассмотрим изменение скорости распространения мод УЗНКВ в зависимости от величины НДС на основе подхода Мурнагана, разработавшего модель упругости применительно к стали. В работе [2] на основе этого подхода была разработана модель ЯА для объемных УЗ волн, распространяющихся параллельно и перпендикулярно к направлению деформаций [2]. Используя ЯА, проведем вычисления изменения скорости распространения мод УЗНКВ в стенках трубопроводов. Зависимость скорости объемных УЗ волн от величины НДС записана в виде [2]:

$$\begin{aligned} \rho c_{xx}^2 &= \lambda + 2\mu + [4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \\ &\quad + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)] \epsilon, \\ \rho c_{xy}^2 &= \rho c_{xz}^2 = \mu + [4\mu + \nu(n/2) + m(1 - 2\nu)] \epsilon, \\ \rho c_{yy}^2 &= \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)] \epsilon, \\ \rho c_{yx}^2 &= \mu + [(\lambda + 2\mu + m)(1 - 2\nu) + \nu n/2] \epsilon, \\ \rho c_{yz}^2 &= \rho c_{zy}^2 = \mu + [(\lambda + m)(1 - 2\nu) - 6\nu\mu - n/2] \epsilon, \end{aligned} \quad (1)$$

где ϵ — деформация в направлении 1; ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность среды; c_{xx} , c_{xy} , c_{xz} — скорости распространения УЗ объемных волн вдоль оси, указанной первым индексом, и поляризацией колебаний, указанных вторым индексом; λ , μ — упругие константы Лямэ; l , m , n — упругие константы Мурнагана третьего порядка; α_x , α_y , α_z — компоненты главных деформаций.

УЗНКВ состоят из суперпозиции объемных продольных и поперечных УЗ волн, моды которых отличаются фазовой и групповой скоростями распространения [7, 8]. В общем случае мода УЗНКВ формируется четырьмя объемными волнами падающей и отраженной от верхней и нижней границ раздела сред. Рассмотрим распространение УЗНКВ по окружности трубы (рис. 1).

Моды УЗНКВ, возбужденные ультразвуковым первичным преобразователем (УПП), распространяются в стенке трубы и регистрируются приемным УПП. В зависимости от типа УПП (колебания продольные или поперечные) поле УЗНКВ в стенке трубы будет формироваться определенным набором объемных волн с соответствующей поляризацией колебаний, поэтому ЯА описывается различным набором уравнений (1). Рассмотрим три случая возбуждения УЗНКВ с использованием теории колебаний сплошных сред, учитывая поляризацию объемных волн:

— если УЗНКВ возбуждается прямым УПП с продольными колебаниями чувствительного элемента, то ЯА описывается компонентами объемных волн (c_{xx} , c_{yy} , c_{xy} , c_{yz});

— при возбуждении УЗНКВ прямым УПП с поперечными колебаниями чувствительного элемента, поляризованными в направлении оси x , ЯА описывается компонентами (c_{xx} , c_{xy} , c_{yx});

— УЗНКВ возбуждается прямым УПП с поперечными колебаниями чувствительного элемента, поляризованными в направлении оси z — ЯА описывается компонентами (c_{yz} , c_{xz}).

В результате анализа установлено, что скорость распространения УЗНКВ можно вычислить с помощью уравнений (1).

На практике определение изменения скорости распространения отдельных компонентов объемных волн, которые формируют УЗНКВ, при изменении величины НДС металла в стенках трубопроводов, является сложной задачей. При описании акустоупругости УЗНКВ воспользуемся уравнением энергии деформации W_s , полученным на основании теории Лагранжа с коэффициентами упругости третьего порядка [9]:

$$W_s = W_s(\text{СК}) = W_s(F^T F), \quad (2)$$

где СК — тензор деформаций Коши–Грина; F — градиент деформаций; F^T — транспонированный градиент деформаций.

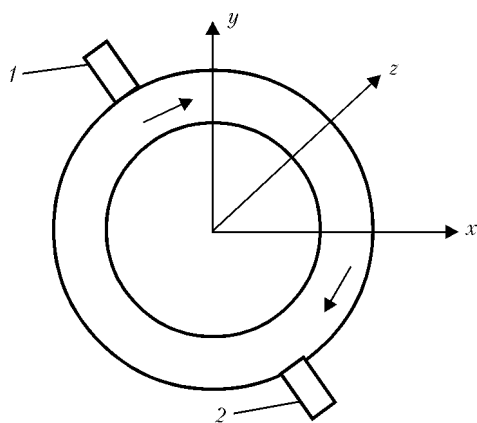


Рис. 1. Распространение УЗНКВ в стенке трубы: 1, 2 — соответственно генерирующий и приемный УЗ первичные преобразователи (стрелками показано распространение мод)

Это уравнение позволяет применять уравнения акустоупругости для многоосного случая деформации упругой среды, в том числе для деформации стенки трубопровода и дает возможность объединить в одном уравнении выражения для величины приложенных внешних усилий, деформации упругой среды и изменения скорости распространения УЗ объемных волн и мод УЗНКВ. Способ вычисления скорости распространения УЗНКВ для двумерного пространства базируется на факторизации функции, описывающей деформации, и реализован с помощью метода конечных элементов для вычисления собственных колебаний механической системы [10]. Еще одним преимуществом метода конечных элементов является возможность с его помощью более точно определять скорость распространения УЗНКВ, поскольку по окружности трубы взаимная пропорция продольной и поперечной волн изменяется вследствие криволинейности границ раздела среды УЗНКВ.

Соотношение между разницей скоростей мод УЗНКВ, полученной по представленной модели, можно вычислить по формуле [9]:

$$\frac{c - c_0}{d\varepsilon c_0} = 1 + \frac{f - f_0}{d\varepsilon f_0} + \frac{f - f_0}{f_0}, \quad (3)$$

где c , c_0 — соответственно скорости ультразвука в деформированной и недеформированной средах; f , f_0 — соответственно частоты собственных колебаний механической системы в деформированной и недеформированной средах; $d\varepsilon$ — изменение деформации упругой среды.

Представленный метод вычисления акустоупругости УЗНКВ позволяет проводить анализ для любых диаметров трубопроводов.

Для вычисления разности скоростей распространения мод УЗНКВ $c - c_0 / c_0$ возьмем трубу диаметром 273 мм и толщиной стенки 10 мм из стали с параметрами, которые приведены при проверке результатов в лабораторных условиях [2]. Вычисление разности скоростей будем проводить для восьми мод УЗНКВ в двух частотных диапазонах 1 и 2,5 МГц. В связи с тем, что при увеличении частоты необходимо увеличение числа конечных элементов на частоте 2,5 Гц расчет будет проводиться только на половине окружности трубы (рис. 2). Граничные условия на разрезе будут симметричными, что позволяет моделировать часть трубы как одно целое. Расчеты проведем в три этапа: на первом — рассчитываются собственные частоты трубы без напряжений; на втором к трубопроводу прикладываются внешние усилия и рассчитываются величины напряжений и деформаций; на третьем — рассчитываются собственные частоты трубопровода после приложения

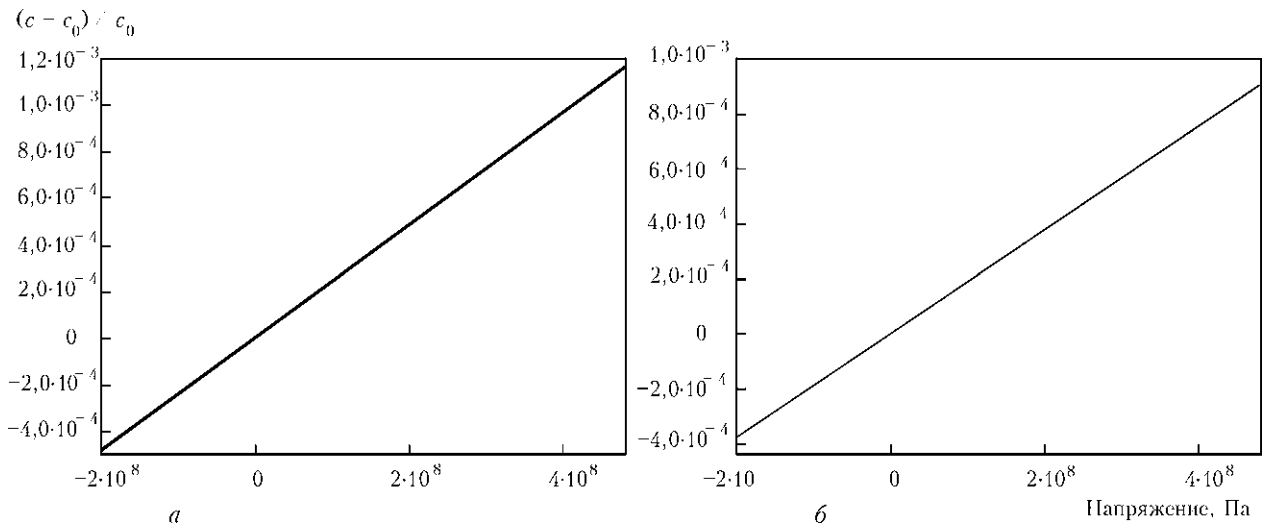


Рис. 2. Акустоупругость УЗ направленной кольцевой волны в стенке трубы: а, б — первая мода на частоте соответственно 2,5 и 1,0 МГц

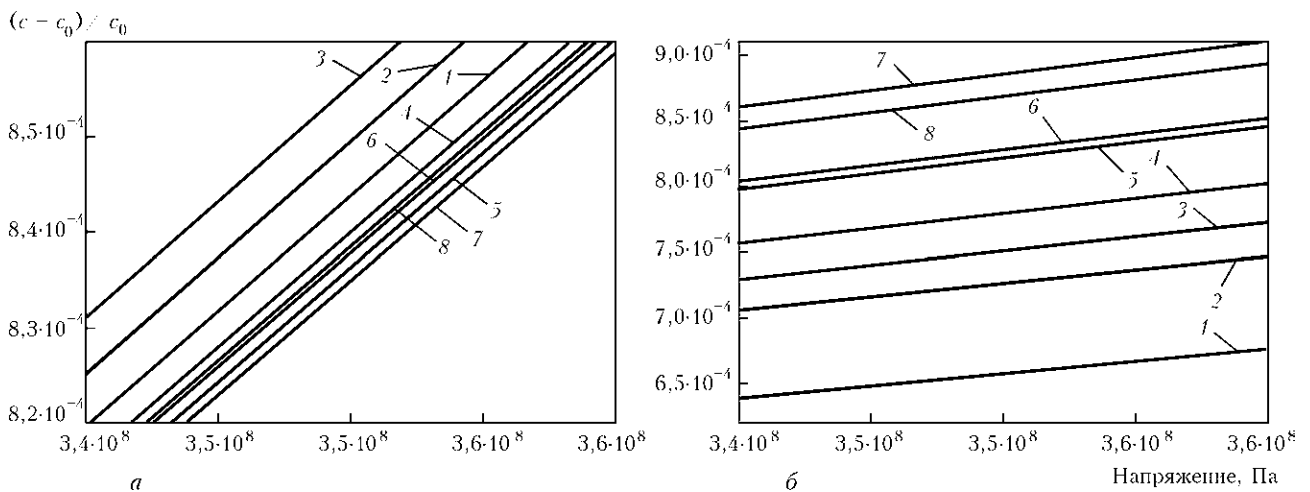


Рис. 3. Акустоупругость восьми мод УЗ направленной кольцевой волны в стенке трубы в окрестности частот 2,5 (а) и 1 МГц (б) в диапазоне высоких напряжений

внешних усилий, т. е. его НДС. Как видно из представленных результатов, собственные частоты зависят от величины НДС, а величина акустоупругого коэффициента (левая часть уравнения (3) от частоты (рис. 2). Здесь и далее рассматривается отрезок трубы с приведенными выше параметрами.

Для оценки изменения скорости распространения отдельных мод УЗНКВ от величины НДС получены графические зависимости (рис. 3). Как видно, разность скоростей мод УЗНКВ от величины НДС на частоте 2,5 МГц больше, чем на частоте 1 МГц. Для указанного частотного диапазона наибольший коэффициент акустоупругости получен для 7-й и 8-й мод.

Для определения скорости распространения отдельных мод УЗНКВ в стенке трубопровода проведен расчет их дисперсных свойств по разработанному алгоритму. Групповую скорость определяли по аппроксимированному линейному

уравнению. Высшие моды аппроксимированы полиномом высокого порядка.

Выводы

УЗНКВ можно использовать для определения НДС трубопроводов разных диаметров. Результаты приведенных расчетов разности скоростей распространения мод УЗНКВ в зависимости от НДС трубопровода показывают, что каждая из восьми мод характеризуется собственным акустоупругим коэффициентом, величина которого зависит от частоты моды.

1. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорот, О. И. Гуша, В. К. Лебедев. — Киев: Наук. думка, 1974. — 108 с.
2. Egle D. M., Bray D. E. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel // J. Acoust. Soc. Am. — 1976. — **60**. — P. 741–744.
3. Winkler K. W., Xingzhou L. Measurements of third-order elastic constants in rocks // Ibid. — 1996. — **100**. — P. 1392–1398.

4. *Dipole flexural waves splitting induced by borehole pressurization and formation stress concentration* / Z. Cao, K. Wang, G. Li et al. // *Chin. J. Geophys.* — 2003. — **46**. — P. 1021–1030.
5. *Zhengliang Cao, Kexie Wang, Zaitian Ma. Acoustoelastic effects on guided waves in a fluid-filled pressurized borehole in a prestressed formation* // *J. Acoust. Soc. Am.* — 2004. — **116**, № 3. — P. 1406–1415.
6. *Ping'en Li, Youquan Yin, Xianyue Su. Acoustoelastic effects on mode waves in a fluid-filled pressurized borehole in triaxially stressed formations* // *Acta Mechanica Sinica.* — 2006. — **22**, № 6. — P. 569–580.
7. *Лютак І. З. Побудова та обчислення математичної моделі поширення кільцевих мод в трубопроводі спрямованими хвилями в ультразвуковому діапазоні частот* // *Техн. діагностика и неразруш. контроль.* — 2009. — № 2. — С. 30–35.
8. *Лютак І. З. Розроблення алгоритму обчислення дисперсних властивостей спрямованих ультразвукових хвиль та дослідження їх залежності від механічних характеристик сталі* // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів.* — 2009. — Вип. 14. — С. 22–28.
9. *Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Comsol [електронний ресурс]: Версія 3.5a / Компанія COMSOL, Inc.* — 2009. — 1 електронний оптичний диск (DVD-ROM). — Системні вимоги: Windows XP. — Назва з титул. екрану.
10. *Wilcox P. Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section* / P. Wilcox, M. Evans, O. Diligent et al. // *Review of Progress in QNDE.* — 2002. — **21**. — P. 203–210.

Ів.-Франк. нац. техн. ун-т нафти и газа

Поступила в редакцію
21.06.2010



Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. С. А. Недосека защитил 2 июня 2010 г. докторскую диссертацию на тему «*Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии*».

Диссертация посвящена решению проблемы оценки фактического состояния сварных конструкций с накопленными повреждениями и разработке методов акустико-эмиссионной диагностики и мониторинга, имеющих целью заблаговременно на основе прогнозирования разрушающей нагрузки и остаточного ресурса выявить опасность возникновения трещин и не допустить разрушения.

Для решения задач были объединены современные подходы в таких научных направлениях, как континуальная механика, акустика и математическое моделирование. Результаты исследования АЭ, полученные при механических испытаниях образцов на статическое растяжение, сопоставлены с экспериментальными данными, полученными дополнительными методами: АЭ сканированием, определением ударной вязкости, взвешиванием в жидкости, ЛМ-твердости и металлографическим анализом. Показано, что влияние сварного соединения на АЭ свойства материала состоит в увеличении количества событий АЭ с увеличением объема металла, составляющего зону термического влияния.

Формализован и применен объектный подход к решению задачи, описывающей возникновение, рост и взаимодействие множественных пор в процессе накопления повреждений при деформировании, а также возникновение вследствие этого волн АЭ. Это позволило существенно упростить решение задачи за счет инкапсуляции базовой функциональности модели в

объектах, моделирующих поры, и обеспечить в рамках того же самого алгоритма моделирования, возникновения и развития разнообразных полей повреждений в разных условиях с учетом влияния концентрации напряжений

Разработана математическая модель, связывающая АЭ и акустические свойства материала с процессом накопления повреждений, который трактуется как возникновение, рост и взаимодействие сферических пор с учетом влияния объемного распределения повреждений и геометрии концентратора на прохождение через материал акустических сигналов. Модель позволяет создавать эталоны АЭ для различных условий формирования поврежденности в материале. Усовершенствована методика аналитического расчета возникающих и распространяющихся в материале волн АЭ путем разбития суммарной волны на элементарные составляющие по волновым числам и комплексным частотам. Выполненные расчеты возникающих и распространяющихся в стержневых и плоских элементах конструкций акустических волн показали зависимость спектра, формы и амплитуд волн от толщины материала. Разработан и подтвержден экспериментально метод прогноза разрушающей нагрузки, основанный на сравнении данных реальных АЭ испытаний с эталонами, получаемыми с помощью математической модели накопления повреждений, представленной в виде вектора состояния материала.

Научные результаты, полученные в работе, подтверждены на практике при анализе состояния действующих конструкций, внедрены и применяются в производственных условиях при диагностическом контроле и непрерывном АЭ мониторинге труб, барабанов котлов, сосудов давления, хранилищ и оборудования цехов производства аммиака, на мостовых переходах труб аммиакопровода.



ОБ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ НЕВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-АМПЛИТУДНОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ

В. Ф. ДАВИДЕНКО

Рассмотрен новый подход к физико-математическому моделированию поля эхо-канала, выявивший два его проявления: энергетическое и геометрическое. Общим описанием впервые охвачено поле эхо-канала во всём объёме как в ближней, так и в дальней зонах, обусловившее возможность описания границ поля. На основе трёх высокоинформативных безразмерных переменных получено уравнение универсальной АРД-диаграммы с параметром — размером эквивалентного отражателя, решающее задачи ультразвуковой эхо-амплитудной дефектометрии при всех начальных условиях.

A new approach to physico-mathematical simulation of echo-channel field is considered, which has revealed two effects: energy and geometrical. A general description for the first time covers the echo-channel field in its full volume, both in the near and far zones, which enabled description of field boundaries. An equation of an all-purpose ARD-diagram with the parameter of the equivalent reflector size, was derived proceeding from three highly-informative dimensionless variables. It allows solving the problems of ultrasonic echo-amplitude flaw detection at all the initial conditions.

Элементарная неволновая теория поля (ЭНТП) посвящена решению прямой и обратной задач ультразвукового контроля (УЗК). Решение прямой задачи УЗК ЭНТП находится в энергетическом, а решение обратной — в геометрическом поле преобразователя. Каждое из этих полей характеризуется внутренней структурой и внешней формой. Внутренняя структура поля описывается уравнениями силовых линий, которыми для энергетического поля служат равноразмерные, а для геометрического — равносигнальные силовые линии. Внешняя форма полей описывается энергетическим или геометрическим уравнением границ полей соответственно. Графическое изображение энергетического поля с его структурой и границами представляется в виде АРД-диаграммы (амплитуда–расстояние–дефект), а геометрического поля — в виде ДРА-диаграммы (дефект–расстояние–амплитуда). Кроме симметрии задач, полей, структур и границ существенна также асимметрия условий распространения поля: в среде без затухания звука (идеальная среда) и в среде с затуханием звука (реальная среда).

ЭНТП основана на обычном аппарате высшей математики при начальных условиях, исключающих волновой характер процессов возбуждения, распространения и отражения звуковых импульсов. Поэтому теория названа элементарной. Прямую задачу УЗК, обычно решаемую с помощью АРД-диаграммы, общепринято называть дефектоскопией, а обратную, для решения которой еще не применяют ДРА-диаграмму — дефектометрией.

Система единиц измерения в ЭНТП.

Физические единицы измерения:

r – расстояние до отражателя, мм;
 S – эквивалентная площадь отражателя, мм²;
 $p = P/P_0$ – относительная амплитуда эхо-сигнала;

P – случайная текущая амплитуда эхо-сигнала;
 P_0 – амплитуда опорного эхо-сигнала;
 d – диаметр пьезоэлемента преобразователя, мм;
 λ – длина волны УЗ колебаний, мм.

Относительные единицы измерения в идеальной среде:

$x = \lambda r/d^2$ – относительная дальность отражателя;
 $y = \sqrt{S}/d$ – относительный эквивалентный размер отражателя;
 $n = d^2/\lambda^2$ – параметр пьезоэлемента, характеризующий его динамический диапазон.

Масштабные безразмерные единицы измерения в реальной среде:

$u = ngx = \delta r$ – масштабная безразмерная дальность отражателя;
 $v = ngy = \delta \sqrt{nS}$ – масштабная безразмерная эквивалентная величина отражателя;
 ng – показатель торможения поля (масштабный коэффициент) в реальной среде;
 $g = \delta \lambda$ – удельное затухание звука (затухание на одной длине волны).

Диаграмма направленности (ДН) поля УЗ преобразователя. В современной теории УЗК применяются два вида функций направленности полей УЗ преобразователей: $2J_1(X)/X$ — для круглых пьезоэлементов и $\sin(X)/X$ — для прямоугольных, где $X = k a \sin \varphi$. Однако роль, отводимая ДН, крайне незначительна и заключается всего лишь в определении угла расхождения звукового пучка (дивергенция) или амплитуды эхо-сигнала, пришедшего из заданного направления. ДН лишена



формирующей активности, влияющей как на внутреннюю структуру поля, так и на его внешние границы.

Известные функции ДН малопродуктивны вследствие трудности их использования не только при математическом анализе поля, но даже при вычислениях (для вычисления функции $J_1(X)$ требуются специальные таблицы функции Бесселя). Поэтому в элементарной волновой теории поля (ЭНТП) предпринята успешная попытка вывода новой функции ДН, которая легко вычисляется, математически анализируется и отражает главные свойства формирующегося звукового поля.

В основу вывода новой функции ДН положена физико-статистическая модель, предполагающая строение пьезоэлектрического излучателя в виде набора большого количества статистически независимых элементарных излучателей с поперечными размерами не более половины длины волны генерируемых звуковых колебаний ($\lambda/2$). Каждый элементарный излучатель формирует поле с круговой ДН $\Phi(\varphi) = \cos\varphi$. При синхронном и синфазном возбуждении расположенных близко элементарных источников звука их поля статистически взаимодействуют, складываясь в согласованную остронаправленную структуру, которую можно описать функцией $\Phi(\varphi) = (\cos\varphi)^{\pi n}$, где πn — количество элементарных излучателей площадью $\lambda^2/4$, укладываемых в круглой пластине диаметром d . Так как ДН излучения и ДН приема равны, то в режиме излучения–приема ДН преобразователя возводится в квадрат и становится равной $\Phi^2(\varphi) = (\cos\varphi)^{2\pi n}$.

Эта функция преобразуется в более простые и удобные для анализа формы:

$$\begin{aligned} (\cos\varphi)^{2\pi n} &= (1+\text{tg}^2\varphi)^{-\pi n} = (1+a^2/r^2)^{-\pi n} = \\ &= (1+nS/\pi nr^2)^{-\pi n} = \exp(-nS/r^2) = \exp(-\pi n \text{tg}^2\varphi) \dots (1) \end{aligned}$$

при достаточно большом $\pi n = 10^2 \dots 10^3$.

Проведено численное сравнение новой функции ДН $(\cos\varphi)^{2\pi n}$ с известными функциями, возведенными в квадрат: $\{2J_1(X)/X\}^2$ и $(\sin X/X)^2$, (рис. 1), из которого видно, что новая функция ДН1 при равных условиях занимает промежуточное положение между двумя известными 2, 3. При этом она постепенно отдаляется от функции $\sin X/X$ в области малых углов φ и приближается к функции $2J_1(X)/X$ в области больших углов φ . Таким образом, новая функция ДН характеризуется объединяющими свойствами, т. е. более универсальными, чем известные, а ее тождественные формы более аналитичны. Благодаря этому функция ДН в виде $\Phi^2(\varphi) = \exp(-nS/r^2) = \exp(-y^2/x^2) = \exp(-v^2/u^2)$ может с успехом их заменять, обеспечивая возможность аналитического моделирования структуры, формы и взаимодействия полей

УЗ преобразователей с внешней средой функций ДН.

Структура поля преобразователей в идеальной среде. В современной теории поля УЗ преобразователей при интегрировании звукового давления на удаленную площадку поля не учитывают дифференциальный характер функции направленности поля. Поэтому под интегралом Кирхгофа отсутствует множитель в виде ДН, который вводится только после интегрирования с целью учета угла падения волны на отражатель. В связи с этим в ЭНТП проведено следующее интегрирование давления:

$$\begin{aligned} \frac{P}{P^0} &= -\frac{ik}{2\pi} \int \frac{\cos\varphi}{r} (\cos\varphi)^{2\pi n} dS = \\ &= \frac{1}{\lambda r} \int_S (\cos\varphi)^{2\pi n + 1} dS, \\ \frac{r^2}{n\lambda r} \int_S \exp\left(-\frac{nS}{r^2}\right) d\left(\frac{nS}{r^2}\right) &= \\ &= \frac{r\lambda}{d^2} \left[\exp\left(-\frac{nS}{r^2}\right) \Big|_0^S \right] = \\ &= \frac{r\lambda}{d^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{nS}{r^2}\right) \right]. \end{aligned}$$

Полученный результат интегрирования представляет собой относительную амплитуду эхосигнала $p = P/P_0$ от нормального дискового (эквивалентного) отражателя с размером y , расположенного на расстоянии x от излучателя—прием-

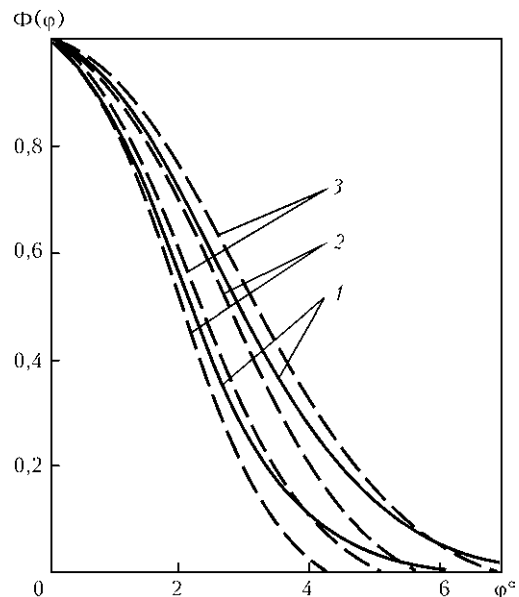


Рис. 1. Сравнение различных функций ДН



ника, и назван энергетическим уравнением поля, решающим прямую задачу УЗК и имеющим вид:

$$p = x \{1 - \exp(-y^2/x^2)\}. \quad (2)$$

Это уравнение легко преобразуется относительно эквивалентного размера дефекта, в результате чего получается геометрическое уравнение поля, позволяющее решать обратную задачу УЗК в виде:

$$y = x \sqrt{-\ln(1 - \frac{p}{x})}. \quad (3)$$

Уравнения (2), (3) дополняют друг друга и всесторонне раскрывают внутреннюю структуру поля: одно с позиции энергетики, другое — с позиции геометрии. Каждое из этих уравнений можно интерпретировать как траекторию особых силовых линий поля: для энергетического поля — равноразмерных с параметром $y = \text{const}$, а для геометрического — равносигнальных с параметром $p = \text{const}$. С помощью этих силовых линий можно достаточно точно передать нюансы зонной структуры полей, которые взаимосвязано по оси x представлены на рис. 2.

С целью аналитического исследования структуры полей найдены первые и вторые производные от основных переменных по длине поля, которые дают условия максимума относительной амплитуды эхо-сигнала и минимума эквивалентного размера отражателя:

$$dp/dx = 1 - (1 + 2y^2/x^2)\exp(-y^2/x^2) = 0, \quad (4)$$

$$dy/dx = 2\ln\{x/(x-p)\} - p/(x-p) = 0, \quad (5)$$

а также условия перегибов равноразмерных и равносигнальных силовых линий:

$$d^2p/dx^2 = (1 - 2y^2/x^2)(2y^2/x^3)\exp(-y^2/x^2) = 0, \quad (6)$$

$$d^2y/dx^2 = p/(x-p) \{1/(x-p) - 2/x\} = 0. \quad (7)$$

Графоаналитические решения уравнений (4) и (5), представленные в виде:

$$e^z = 1 + 2z, \text{ где } z = y^2/x^2 \text{ и } -2\ln(1-z) = 1/(1/z - 1), \text{ где } z = p/x,$$

дают следующие экстремальные решения: $y_{\min}^2/x^2 = 1,26$ и $p_{\max}/x = 0,715$.

Первое экстремальное решение дает уравнение образующей конуса сжатия геометрического поля преобразователя в виде линии 1, представленной на рис. 2, б):

$$y_{\min} = 1,124x. \quad (8)$$

Если в уравнение (8) подставить физические величины вместо относительных, то можно найти угол раскрытия конуса сжатия из соотношения $\sqrt{S} = 1,77a = 1,124\lambda r/d$ в виде:

$$a_{\min}/r = \text{tg}\varphi = 0,63\lambda/d. \quad (9)$$

Полученная величина угла раскрытия конуса сжатия практически совпадает с предсказываемой теорией дифракции (в 2 раза меньше, чем в $\sin\varphi = 1,22\lambda/d$) с учетом того, что в ЭНТП рассматривается поле в режиме излучения-приема, а в известных теориях только в режиме излучения. Несмотря на методическую убедительность расчета угла раскрытия в ЭНТП по сравнению с известными методиками, полученный результат не имеет практического значения, очевидно, как и все известные, так как он относится к идеальному объекту, каким является поле в среде без затухания звука. Поэтому реальную структуру поля в ближней зоне можно изучить только с учетом затухания, что будет показано дальше.

Из того же экстремального решения ($y_{\min} = 1,12x$) можно найти также длину ближней зоны поля через соотношение $x = 0,89y_{\min}$ в виде

$$r_{\text{бл}} = 0,89\sqrt{nS}. \quad (10)$$

Отсюда видно, что длина ближней зоны индивидуальна для каждой равноразмерной силовой линии энергетического поля, так как зависит не только от параметра преобразователя n , но и от фиксированной величины S эквивалентного отражателя. Благодаря этому ЭНТП создает теоретическую предпосылку для возможности реализации контроля малых размеров отражателей вблизи преобразователя с помощью, например, таких методов, как УЗ микроскопия. Современная теория такой возможности, как и возможности проведения УЗК на малых глубинах, вообще не предусматривает из-за жестко обусловленной и весьма протяженной ближней зоны поля, равной $N = a^2/\lambda$.

Наибольшая длина ближней зоны поля может быть найдена из указанного выше экстремального условия $p_3 = 0,715x$, откуда $x_{\max} = 1,4$, так как

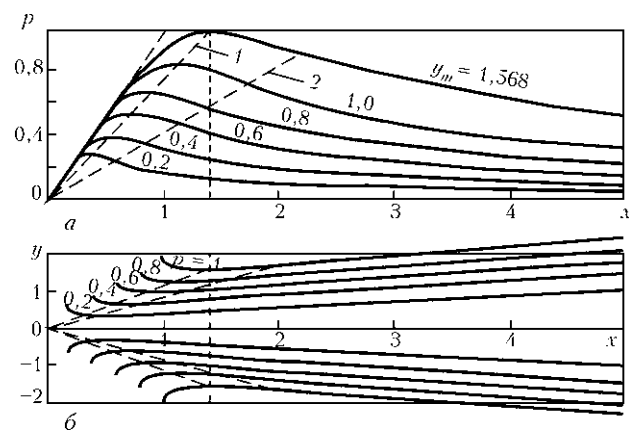


Рис. 2. Энергетическая (АРД) (а) и геометрическая (ДРА-диаграмма) структуры поля (б): 1 — линия максимумов (а), минимумов (б); 2 — линия перегибов



$p_{\max} = 1$. После подстановки физических величин получаем $r_{\max} = 1,4d^2/\lambda$, или в единицах общепринятой длины ближней зоны $r_{\max} = 5,6N$. Таким образом, в соответствии с ЭНТП длина ближней зоны поля может изменяться в диапазоне от 0 до $5,6N$, состыковываясь с дальней зоной через конус сжатия, а не через поперечное сечение на расстоянии N . Хотя современная теория также пользуется элементарными методами описания поля, однако, в ней априорно заложены некоторые волновые принципы. К ним относится, например, интерференционная модель формирования максимумов давления в ближней зоне. Положение последнего максимума принято за границу ближней и дальней зон поля. Однако при импульсном возбуждении пьезоэлемента короткими ударными импульсами эта модель неверна, а в условиях торможения (затухания) звука в реальной среде тем более, что будет показано дальше.

Неустойчивость формирования плоской волны в конусе сжатия с точки зрения ЭНТП можно объяснить тем, что конус сжатия окружен высокоэнергетичным хаотичным полем в виде рубашки, с которым контактируют края расширяющихся плоских фронтов зондирующих импульсов. Их края не имеют четких ограничителей, испытывают случайные энергетические воздействия со стороны рубашки (энергетическая подпитка) и могут срываться, вызывая непропорционально большие амплитуды эхо-сигналов или, наоборот, падая практически до нуля. Для более наглядного показа влияния затухания звука необходимо и достаточно сравнить характер траекторий силовых линий поля в разных средах.

Из рис. 2, а видно, что равноразмерные силовые линии исходят из нулевой точки поля по пропорциональному закону $p = x = \lambda r/d^2$, а затем, выгибаясь выпуклостью наружу вокруг экстремальных точек, лежащих на образующей конуса сжатия, начинают спадать, изменяя выпуклость на вогнутость вокруг точек перегиба, лежащих на прямой 2:

$$p_{\text{пер}} = 0,393x, \quad (11)$$

которая найдена из условия (6) в виде $y^2/x^2 = 0,5$ и дальше из (2) в виде $p = x(1 - e^{-0,5})$.

Вогнутость равноразмерных силовых линий после точки перегиба сохраняется в дальней зоне до бесконечности и имеет затухающий характер:

$$\lim(dp/dx)_{x \rightarrow \infty} = 1 - \exp(-y^2/x^2) = y^2/x^2 = 0. \quad (12)$$

Это значит, что и в среде без затухания направленные звуковое поле в бесконечности все же уменьшается до такого уровня, что его градиент по дальности не фиксируется.

Из рис. 2, б видно, что равносигнальные силовые линии геометрического поля возникают

где-то внутри хаотичной «рубашки» и стремятся к своему минимуму, выгибаясь выпуклостью вовнутрь поля вокруг точек, лежащих на образующей конуса сжатия, затем медленно поднимаются к периферии поля, изменяя вогнутость на выпуклость в точках, лежащих на линии перегибов:

$$y_{\text{пер}} = 0,833x. \quad (13)$$

Эта прямая получена из (7) в виде $p = 0,5x$ и далее после подстановки в (3) в виде $y = x\sqrt{\ln 2} = 0,833x$.

После точек перегиба равносигнальные линии идут по траектории $y = \sqrt{px}$, которая означает неограниченное, но медленное расширение поперечного сечения поля с градиентом расширения в бесконечности, стремящимся к нулю.

Структура поля преобразователей в реальной среде с затуханием звука. Ослабление давления в плоской звуковой волне, распространяющейся в однородной среде, происходит по экспоненциальному закону $p = p_0 \exp(-\delta r)$, где p_0 — давление в начале отрезка пути r ; p — давление в конце пути r . С учетом принятых масштабных безразмерных переменных u и v для среды с затуханием звука на двойном пути энергетическое уравнение поля записывается в виде:

$$p = u \{1 - \exp(-v^2/u^2)\} \exp(-2u). \quad (14)$$

Анализ на максимум этого уравнения показывает, что $p_{\max} = 0,5e^{-1}$. Поэтому для обеспечения изменения относительной амплитуды эхо-сигналов в полном динамическом диапазоне уравнение (14) необходимо пронормировать по максимуму, в результате чего энергетическое уравнение поля примет окончательный вид:

$$p/p_{\max} = q = 2u \exp(1 - 2u) \{1 - \exp(-v^2/u^2)\}. \quad (15)$$

Из этого уравнения выводится решение обратной задачи УЗК в виде геометрического уравнения поля:

$$v = u \sqrt{-\ln(1 - qe^{2u-1}/2u)}. \quad (16)$$

Анализ структуры энергетического поля начинается с вычисления первой производной от нормированного давления по длине поля:

$$dq/du = -\frac{2}{u} \left[\frac{\left(\frac{v^2}{u^2}\right)}{\exp\left(\frac{v^2}{u^2}\right) - 1} + u - 0,5 \right] = 0. \quad (17)$$

Выражение в квадратных скобках решается графоаналитическим способом с помощью номограммы (рис. 3), на которой в квадрате $0,5 \times 0,5$ изображена наклонная прямая $y_1 = 0,5 - u$, а также семейство пересекающих ее кривых $y_2 = z/(e^z - 1)$,



где $z = v^2/u^2$. Эти кривые с достаточной точностью аппроксимируются в диапазонах $0 \leq u \leq 0,5$ и $0 \leq v \leq 1,15$ прямыми $y_2 = 1,15u/v - 0,5$, исходящими из полюса с координатами $(0; -0,5)$. Точки пересечения указанного веерного семейства прямых с наклонной прямой дают решения уравнения (17) как $y_1 = y_2$ или $1,15(u/v) - 0,5 = 0,5 - u$, которое приводится к виду:

$$u = 1/(1,15/v + 1). \quad (18)$$

Это уравнение имеет ключевое значение для определения длины ближней зоны поля в среде с затуханием звука. Если вместо масштабных безразмерных переменных подставить их физические аналоги, то можно получить следующее выражение:

$$r_6 = 1/\{1,15/\sqrt{nS} + \delta\}. \quad (19)$$

Полученный результат наглядно объясняет влияние затухания звука на уменьшение длины ближней зоны для каждой равноразмерной силовой линии поля. Если затухание $\delta = 0$, то длина ближней зоны становится равной ранее полученной для идеальной среды (10). Однако уменьшение ближней зоны происходит не линейно, а по более сложному закону, который преобразует

конус сжатия поля в идеальной среде в рупор сжатия в реальной среде.

Этот эффект можно показать с помощью изменения угла раскрытия рупора сжатия через отношение его радиуса $a = \sqrt{S}/\pi$ на данном расстоянии r от излучателя к этому же расстоянию:

$$a/r = \text{tg}\varphi = 0,63(\lambda/d) + 0,56(\delta\sqrt{S}). \quad (20)$$

Раскрытие рупора сжатия в реальной среде при $S \rightarrow 0$ сначала происходит по такому же закону, как и в идеальной, а затем вступает в действие закон положительной обратной связи. Нарастает площадь поперечного сечения рупора и площадь фронта плоской волны, увеличивается сопротивление среды (фактор $\delta\sqrt{S}$), увеличивается угол раскрытия рупора, что прогрессивно ускоряет увеличение его поперечного сечения и приводит, в конце концов, к полному расплющиванию края рупора.

Форму рупора можно найти следующим путем. Сначала определяется первая производная от сечения поля по дальности:

$$dv/du = -\ln(1-z) - (0,5-u)/(1/z-1) = 0, \quad (21)$$

где $z = q \exp(2u-1)/2u$.

Графоаналитическим методом анализа находится решение следующего уравнения:

$$[2u/\{q \exp(2u-1)\} - 1] \times \ln[1/\{1 - q \exp(2u-1)/2u\}] = 0,5 - u, \quad (22)$$

которое является геометрическим местом максимумов относительных амплитуд эхо-сигналов и имеет вид:

$$q_m = 4u(1-u). \quad (23)$$

После подстановки этого экстремального решения в геометрическое уравнение поля получаем геометрическое уравнение рупора сжатия, имеющее вид:

$$v = u\sqrt{-\ln\{1 - 2(1-u)\exp(2u-1)\}}. \quad (24)$$

Предел, к которому стремится поперечное сечение рупора, будет:

$$\lim(v)_{u \rightarrow 0,5} = 0,707\sqrt{-\ln(1-2u)} = 0,707\sqrt{-\ln\Delta}, \quad (25)$$

где Δ — относительное приближение к концу рупора сжатия (см. табл. 1).

Из таблицы видно, что максимальное поперечное сечение поля в среде с затуханием остается практически таким же, как и в среде без затухания.

Таблица 1. Раскрытие рупора сжатия вблизи предела длины

$\Delta, \%$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0
v_{\max}	1,86	1,76	1,70	1,66	1,63	1,57	1,52

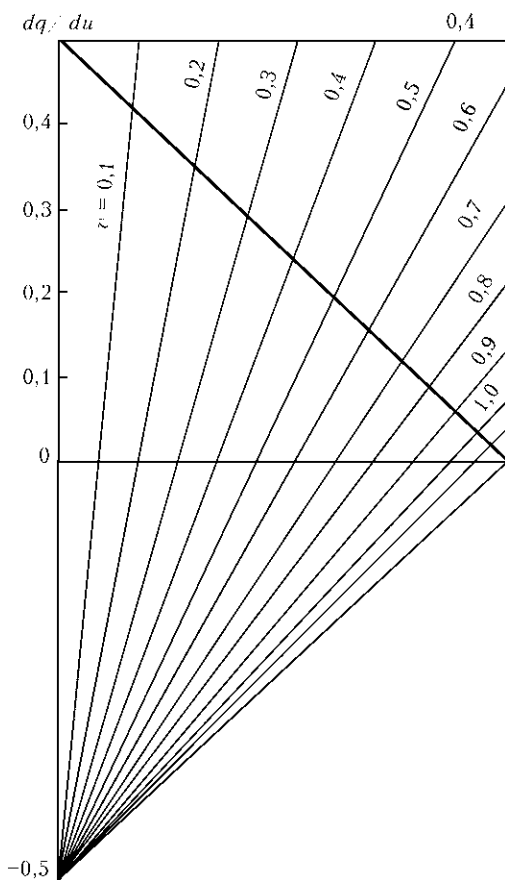


Рис. 3. Графоаналитическое решение уравнения (17)



Графические изображения энергетического и геометрического полей преобразователей представлены на рис. 4.

Влияние затухания звука на структуру поля преобразователей можно аргументировать следующими изменениями характера силовых линий в реальной среде:

крутизна нарастания амплитуды эхо-сигналов вблизи преобразователя увеличивается почти в четыре раза ($dp/dx = 1$ — в идеальной и $dq/du = 2e^{-2u}$ — в реальной среде);

крутизна нарастания максимумов амплитуд эхо-сигналов увеличивается более чем в пять раз ($dp/dx = 0,715$ — в идеальной и $dq/du = 4(1-u)$ — в реальной среде);

крутизна нарастания перегибов равноразмерных силовых линий возрастает более чем в три раза ($dp/dx = 0,393$ — в идеальной и $dq/du = 1,35$ — в реальной среде);

главный максимум энергетического поля смещается ближе к преобразователю ($x_m = 1,4$ — в идеальной и $u_m = 0,5$ — в реальной среде);

градиент спадания амплитуды эхо-сигналов на больших дальностях поля в идеальной среде стремится к 0, а в реальной — к (-2);

деформация поля по длине в среде с затуханием звука происходит за счет сплющивания конуса сжатия и превращения его в рупор сжатия с увеличением угла раскрытия до 180° ;

равносигнальные силовые линии геометрического поля в среде с затуханием не изменяют свою первоначальную вогнутость на выпуклость, как в идеальной среде, а сохраняют ее до полного загиба на 90° ;

затухание звука в среде не оказывает влияния на диаграмму направленности и, вероятно, на форму поля вследствие взаимного его уничтожения по ширине и длине поля ($y/x = v/u$).

Границы поля ультразвуковых преобразователей. В современной теории УЗ признается формирующая роль ДН только в поперечном се-

чении поля. Предполагается, что по длине поле свободно расширяется вдоль конических изобар подобно лучу прожектора. Такое представление не слишком далеко от полученных в ЭНТП данных для идеальной среды. Однако в среде с затуханием звука равносигнальные силовые линии имеют совершенно другой характер своих траекторий и напоминают зажатый пучок соломки, направленный свободным концом навстречу ветру. Это означает, что звуковое поле в реальной среде не бесконечно и не конусообразно, а имеет форму, предопределяемую ДН преобразователя не только по ширине, но и по длине.

Если предположить, что дальность проникновения акустического поля в реальную среду пропорциональна интенсивности излучения преобразователя в данном направлении, то исходя из определения ДН как отношения интенсивности излучения в данном направлении к интенсивности излучения вдоль оси излучателя, ДН можно представить в двух видах:

$$\Phi^2(\varphi) = \exp(-v^2/u^2) \approx u/u_d = r/r_d \quad (26)$$

где $u_d = \delta r_d$ — дальность поля вдоль центральной оси (максимальная дальность).

Здесь отношение интенсивностей звука заменено отношением пропорциональных дальностей, а знак приближенного равенства поставлен в связи с заменой наклонной дальности в заданном направлении на нормальную дальность вдоль центральной оси. В связи с малостью углов раскрытия ДН разность между указанными дальностями незначительна.

Логически полученное уравнение (26) придает новое качество ДН, которое проявляется в ее формирующей роли как в поперечном, так и в продольном направлении поля. Благодаря этому впервые выведено уравнение формы поля в виде лепестка, которым интуитивно правильно принято изображать акустическое поле (рис. 5):

$$v = u\sqrt{\ln(u_d/u)}. \quad (27)$$

Максимальная ширина поля находится на расстоянии, определяемом из условия:

$$dv/du = \ln(u_d/u_m) - 0,5 = 0, \quad (28)$$

откуда $u_m/u_d = \exp(-0,5) = 0,606$.

После подстановки условия максимума в формулу (27) находим масштабную максимальную ширину поля:

$$v_m = 0,428u_d \quad (29)$$

Отсюда соотношение между максимальной шириной поля $b = 2a$ и его длиной можно выразить через физические единицы в виде:

$$b_m/r_d = 0,483\lambda/d. \quad (30)$$

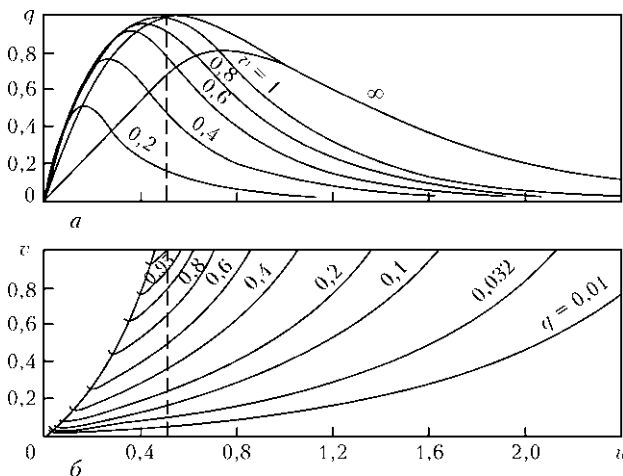




Таблица 2. Параметры поля для индивидуальных АРД-диаграмм

Предельная дальность поля u_d	Положение макс. ампл. донного эхо-сигнала u_m	Максимальная амплитуда донного эхо-сигнала		Максимальное сечение поля v_m	Нормиров. множитель $2/p_m$
		p_m , отн. ед.	p_m , дБ		
0,1	0,293	0,627	4,0	0,325	3,2
1,2	0,319	0,673	3,4	0,367	3,0
1,4	0,340	0,709	3,0	0,404	2,8
1,6	0,357	0,738	2,6	0,437	2,7
1,8	0,370	0,762	2,4	0,465	2,6
2,0	0,382	0,783	2,2	0,492	2,6
2,2	0,392	0,800	2,0	0,515	2,5
2,4	0,400	0,814	1,8	0,535	2,5
2,6	0,407	0,827	1,6	0,554	2,4
2,8	0,413	0,838	1,5	0,571	2,4
3,0	0,419	0,848	1,4	0,588	2,4

Таким образом, это отношение для поля обычных УЗ преобразователей находится в диапазоне 12...20. В современной теории эффективную ширину поля ультразвуковых преобразователей определяют, исходя из его конусообразной формы, на каком-то заданном расстоянии, выраженном в единицах длины ближней зоны поля.

Удобно ввести новую нормированную единицу длины поля в виде $z = u/u_d$. Тогда геометрическое уравнение поля можно записать в виде:

$$v = u_d z \sqrt{\ln(1/z)}, \quad (31)$$

удобном для графического построения поля (рис. 5).

Уравнение энергетической границы поля следует из замены в энергетическом уравнении (15) теоретической функции ДН на функцию ДН по определению, т. е. $\exp(-v^2/u^2) = u/u_d$, что приводит его к виду:

$$q = 2u(1 - u/u_d)\exp(1 - 2u). \quad (32)$$

Здесь появилась новая постоянная u_d , которая создает индивидуальность границ поля для каждого преобразователя через его наибольшую протяженность, а также через положение и величину максимума амплитуды эхо-сигналов. Положение максимума амплитуды определяется из условия $dq/du = 0$, откуда величина масштабной дальности равна:

$$u_m = 0,5 [u_d + 1 - \sqrt{u_d^2 + 1}]. \quad (33)$$

После подстановки этой величины в уравнение (32) определяется максимальная амплитуда донного эхо-сигнала от неограниченного по площади нормального к оси поля отражателя, имеющая следующую величину:

$$q_{\max} = 2/u_d [\sqrt{u_d^2 + 1} - 1] \times \exp[\sqrt{u_d^2 + 1} - u_d]. \quad (34)$$

Расчетная величина максимума относительной амплитуды донного эхо-сигнала должна быть принята в качестве коэффициента нормировки индивидуальных АРД-диаграмм при настройке чувствительности конкретных преобразователей по донным эхо-сигналам в клиновидном образце. Однако для этого, прежде всего, необходимо экспериментально по тому же образцу определить предельную дальность поля конкретного преобразователя в материале образца. Такое принципиально новое тестирование преобразователя проводится путем сканирования образца по глубине донной отражающей поверхности с измерением амплитуды и задержки донных эхо-сигналов. Для облегчения процедуры сканирования образца и повышения точности измерений параметров эхо-сигналов необходимо проводить фильтрацию эхо-сигналов по признаку наибольшей амплитуды при зафиксированной задержке. Полученные результаты измерений подставляются в следующую формулу:

$$u_d = u / \{1 - q \exp(2u-1)/2u\}, \quad (35)$$

которая должна давать близкие результаты в разных точках образца. Эти результаты должны подвергаться усреднению с целью сглаживания случайных флуктуаций, вызванных нестабильностями акустического контакта и направленности преобразователя.

Каждому протестированному преобразователю присваивается индивидуальная АРД-диаграмма, отличающаяся нормировочным множителем $2/q_m$:

$$q/q_m = 2/q_m u \exp(1 - 2u) \{1 - \exp(v^2/u^2)\}. \quad (36)$$

На практике удобно пользоваться заранее рассчитанной таблицей (табл. 2).

При увеличении предельной дальности поля свыше $u_d > 2,5$ все меньшие изменения происходят вблизи максимума давления поля. Максимальные сечения поля реальных преобразователей, соответствующие максимальным эквивалентным отражателям, также ограничены и могут быть определены по формуле

$$v_m = u_m \sqrt{\ln(u_d/u_m)}. \quad (37)$$

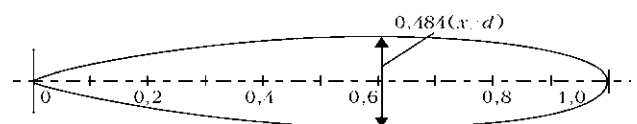


Рис. 5. Геометрические границы поля УЗ преобразователя

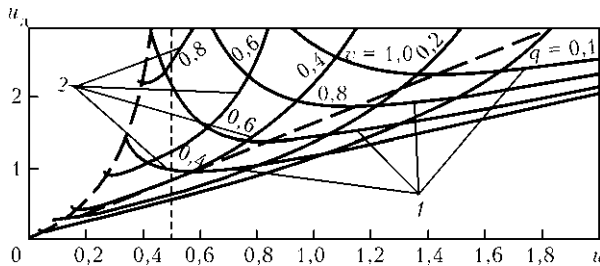


Рис. 6. Тестирование преобразователей на предельную дальность поля по параметрам донных эхо-сигналов и относительным поперечным сечениям поля на разных глубинах дна

Из табл. 2 видно, что реальные для дефектометрии величины наибольших эквивалентных отражателей находятся в диапазоне $0,1 < v < 0,6$, что соответствует приблизительно 36-кратному диапазону по площади. Расширение динамического диапазона измерения площади возможно преимущественно за счет повышения чувствительности к малым дефектам.

Иллюстрация тестирования преобразователей по дальности представлена на рис. 6 в виде номограммы, образованной семействами двух типов кривых. Первое семейство кривых 1 выражает зависимость предельной дальности от амплитуды донных эхо-сигналов, принятых с разных глубин дна, а второе 2 выражает зависимость предельной дальности от величин поперечного сечения поля на разных глубинах дна.

Выводы

ЭНТП позволяет сделать следующие выводы и обобщения:

эквивалентный отражатель, являясь идеальным объектом для математического моделирования, одновременно служит удовлетворительной оценкой размеров не критических дефектов сварных соединений;

в пространстве, ограниченном по длине плоскими и параллельными излучателем и отражате-

лем, а по ширине — ДН, образуется сложная структура поля с ближней и дальней зонами;

ДН излучателя—приёмника формируется из множества сферических ДН элементарных излучателей и выражается обратной экспоненциальной функцией отношения приведенной площади сечения поля к квадрату дальности сечения;

впервые в поле эхо-канала проинтегрировано неравномерное распределение давления в сечениях канала на разных дальностях и выявлена его структура в ближней и дальней зонах, сильно подверженная влиянию затухания звука в среде;

впервые предложено принять в качестве базового опорного сигнала максимальное отражение от плоского дна клиновидного образца с углом клина, равным углу ввода преобразователя, с глубины, равной длине его ближней зоны, и все эхо-сигналы измерять по отношению к базовому опорному сигналу, называя их базовыми относительными эхо-сигналами.

1. Скучик Е. Основы акустики. — Т. 2 / Пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — 542 с.
2. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справ. / Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1991. — 752 с.
3. Щербинский В. Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. — М.: Тиссо, 2003. — 326 с.
4. Давиденко В. Ф. Новая функция направленности поля ультразвуковых преобразователей и ее практические приложения / Свид-во о регистрации авторского права на произведение № 9889 от 26.04.2004. Украина, Мин-во образования и науки, Гос. департамент интеллектуальной собственности.
5. Давиденко В. Ф. Ультразвуковая дефектометрия на основе универсальных АРД-диаграмм / Свид-во о регистрации авторского права на произведение № 11201 от 29.09.2004. Украина, Мин-во образования и науки, Гос. департамент интеллектуальной собственности.
6. Баженов В. Г., Давиденко В. Ф. Клиноэталонный метод настройки ультразвуковых дефектоскопов. — Вісник Нац. техн. ун-ту України "КПІ", Сер. Приладобудування. — 2008. — вип. 36. — С. 49–53.

ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ / СОСУДОВ

ООО «ИНТРОН ПЛЮС» разработан дефектоскоп **ИНТРОКОР М 150**, предназначенный для магнитного НК стальных листов стенок и днищ резервуаров, сосудов под давлением, а также других объектов из ферромагнитных конструкционных сталей.



УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕР А1209

Разработчик «СПЕКТР – Акустические Контрольные Системы. Толщиномер А1209» предназначен для контроля толщин стенок металлических и пластиковых труб, котлов, сосудов, обшивок. Поверхность объектов контроля из металла может быть гладкой, грубой до Rz160, радиусной или окрашенной. При этих условиях прибор с одним преобразователем типа LL017 обеспечивает измерение толщин в диапазоне от 0,9 до



300 мм. Возможно использование преобразователей от других производителей. Связь с компьютером осуществляется через ИК порт. Конструктивное исполнение IP65.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП УД-73 КСК

НПФ Спектр-КСК разработан УЗ дефектоскоп **УД-73 КСК** общего назначения. Предназначен для ручного НК продукции на наличие дефектов типа нарушения сплошности и однородности материала в сырье, готовых изделиях, полуфабрикатах, сварных, паяных, болтовых, клепаных и других соединениях. Проводит измерения: глубины и координат залегания дефектов; толщины различных изделий при одностороннем доступе к ним; отношений амплитуд сигналов, отражённых от дефектов; эквивалентных размеров дефектов.



Оценивает скорость распространения УЗ колебаний в различных материалах. Толщина прозвучивания материала от 0,5 до 6000 мм, что является достаточным для неразрушающего контроля продукции на наличие дефектов. Разработаны специализированные железнодорожные и нефтегазовые версии дефектоскопа УД-73 КСК.

МД-М – НОВЫЙ МОДУЛЬНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ СВЕРХМОЩНЫЙ ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ



Новый модульный дефектоскоп **МД-М** представляет собой революционное решение для ручного магнитопорошкового контроля. Разработанный НПЦ «КРОПУС» совместно с ГНИИ 13 МО РФ и ДНТЦ «Дефектоскопия» дефектоскоп воплотил в себе все последние достижения в области НК методом магнитных частиц и предназначен для замены устаревших дефектоскопов ПМД-70 и ПМД-87 (УНМ 300/2000). В приборе предусмотрена регулировка тока до 5000 А, памятью настроек контроля, режимов “ток-пауза”, автоматическое размагничивание, регулируемая длительность намагничивания и размагничивания и другие функции. Дефектоскоп МД-М имеет модульную конструкцию. В каждом из трех модулей предусмотрена возможность автоматической установки заданного тока, сохранение параметров выбранного режима намагничивания в ячейках памяти. Размагничивание на применении электромагнита основано на использовании скин-эффекта. Принципиальная схема дефектоскопа обеспечивает необходимые эксплуатационные характеристики и значительно более широкие возмож-

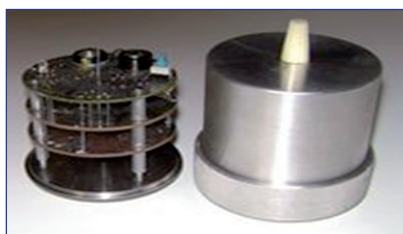
ности при значительном уменьшении габаритов и массы по сравнению с существующими дефектоскопами.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ СИСТЕМА РАНИС



ООО «ФорТехЛэб» на рынке представлена система высокого класса **РАНИС** для промышленного НК и мониторинга, а также для научных исследований. В системе использованы цифровые методы обработки сигнала. Измеряемые параметры импульса: энергия, MARSE, длительность, время нарастания, амплитуда, число пиков. Регистрация и отображение формы сигнала проводится одновременно по всем каналам. На каждом канале имеется встроенный генератор калибровочных и тестовых импульсов. Система комплектуется предварительными усилителями с рекордно низким уровнем шумов для усиления сигнала от пьезоэлектрических датчиков. Интерфейс с компьютером USB 2.0

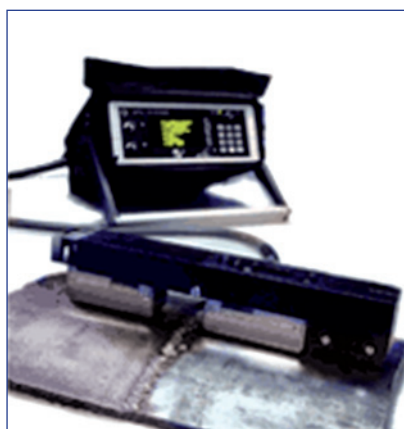
НОВЫЕ АЭ СИСТЕМЫ С РАДИОКАНАЛОМ



ООО «ЭЦ НОРМА» разработана многоканальная беспроводная АЭ система с радиоканалом. Построена по принци-

пам сетевых технологий. Число каналов произвольное. Отличается малым весом и габаритами, простотой эксплуатации, улучшенными техническими характеристиками, низкой стоимостью.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА СЕРИИ СКАНЕР



Малогабаритная измерительная ультразвуковая установка серии **Сканер** модель **СКАРУЧ** (СКАнер РУЧной) (Разработчик ООО «АЛТЕС») предназначена для оперативного обнаружения и определения характеристик дефектов в сварных соединениях и основном металле трубопроводов, сосудов и металлоконструкций с толщиной стенки 4...60 мм и проведения толщинометрии изделий толщиной до 100 мм. Используется для ручного и механизированного УЗ контроля качества сварных соединений и основного металла со скоростью продольного сканирования 0,5...1,0 м/мин вдоль сварного шва или участка основного металла. УИУ СКАРУЧ работает в режиме автоматической фиксации и расшифровки результатов контроля (АФ и РРК) при ручном сканировании системой преобразователей, а также в режиме ручного дефектоскопа (толщиномера) общего назначения. Контроль может

проводиться как в цеховых, так и в монтажных условиях.

УМБТ2 – УСТРОЙСТВО МЕХАНИЗИРОВАННОГО УЗК БУРИЛЬНЫХ ТРУБ



Устройство **УМБТ2** применяется в составе установки УИУ **СКАРУЧ** для контроля основного металла буровых труб: поиска коррозии в основном металле трубы (4-мя ПЭП); поиска дефектов продольной ориентации (4-мя ПЭП); поиска дефектов поперечной ориентации (4-мя ПЭП). Контроль ведётся в щелевом варианте акустического контакта. Контактная жидкость – вода.

АУДИТ107– ТОЛЩИНОМЕР

Фирмой Юни-Экспорт Инструментс Лтд широкому потребителю предложен **АУДИТ-107** – ультразвуковой толщиномер, разработан для пользователей, которым необходимо прово-



дить инспекцию различных видов материалов. Пользователь может устанавливать необходимые скорости звука для тестируемого материала или может выбирать калибровку прибора по стандарту известной толщины. Прибор защищен от воздействий окружающей среды по IP65, укомплектован щупом DT25, предназначенным для работы в трудных условиях.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ В ЛИТЫХ И КАТАНЫХ СЛЯБАХ АГАТ-УС501

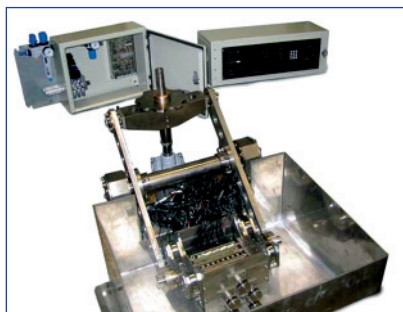
Компанией «NordinKraft» разработана УЗ система для контроля внутренних дефектов в литых и катаных слябах АГАТ-УС501.

Применяется для контроля сляба толщиной 100...450 мм при температуре контролируемой поверхности 100 °С. Система чувствительна к дефектам, эквивалентным по отражающей способности плоскодонному сверлению диаметром 1 мм.



УСТАНОВКА СКАНЕР – ДЛЯ АУЗК БЕСШОВНЫХ ТРУБ

Автоматизированная измерительная ультразвуковая установка серии СКАНЕР ООО «Алтес» с автоматической фиксацией и расшифровкой результатов контроля (АФ и РРК), (мо-



дель № 5.03), предназначена для сплошного контроля тела трубы и определения участков с толщиной стенки, выходящей за пределы минусового и плюсового допусков, обнаружения расслоений и продольно- и поперечно-ориентированных дефектов в металле стальных бесшовных труб диаметром 50...426 мм и толщиной стенки 3,0...40,0 мм в технологическом потоке производства труб. Способ ввода колебаний — иммерсионный, контактная жидкость — питьевая вода. Длина неконтролируемых концов не более 200 мм. Установка предназначена для работы в цеховых условиях.

ЭЛКОМЕТР 136 ПОРТАТИВНЫЙ «ХОЛИДЕЙ-ДЕТЕКТОР»

Компанией Юни-Экспорт Инструментс Лтд разработан Элкометр 136 Портативный «ХОЛИДЕЙ-ДЕТЕКТОР», предназначенный для определения толщины покрытий. Это



предварительная процедура перед тестированием проколов и пористости. Установка напряжения соотносится с толщиной покрытия. Прибор легкий, портативный, идеален для работы в полевых условиях. Предусмотрены: настройка чувствительности, аудио- и видеосигналы при обнаружении трещин. Поставляется со щеточным электродом. Широкий выбор зондовых аксессуаров.

РЕНТГЕНОВСКИЕ АППАРАТЫ СЕРИИ V&G



Портативный рентгеновский аппарат серии V&G (разработчик ООО «ЖАКСУН») предназначен для проведения радиографии в нестационарных условиях, при контроле сварных швов, а также литья из черных и цветных металлов. Преимущества аппарата V&G: сверхмалые массогабаритные параметры; простота, удобство и надежность при эксплуатации в любых климатических условиях в температурном диапазоне от -40 до +50 °С, низкое энергопотребление, никель-кадмиевые аккумуляторные батареи; возможность применения панорамной трубки по отдельному заказу. Рентгеновский аппарат V&G состоит из двух блоков: рентгеновского излучателя; панели управления, которые соединяются съемным кабелем. Компоненты аппарата в нерабочем состоянии укладываются в чемоданчик типа «дипломат».

ПИРОМЕТРЫ СЕРИИ RAYNGER

Пирометры серии **Raynger** – переносные неконтактные ИК-термометры (разработчик фирма RAYTEK). Эти приборы измеряют температуру в диапазоне от -50 до 3000 °С с различных расстояний. Они идеально приспособлены для работы в жестких производственных условиях. Эргономичная форма, прочный корпус, простота использования и большие возможности делают приборы данного класса незаменимыми для решения задач грамотной эксплуатации оборудования и профилактики аварий на производстве. Основные области применения переносных инфракрасных термометров: профилактическое и планово-предупредительное техническое обслуживание оборудования; энергоаудит; программы обслуживания транспортных средств и летательных аппаратов; определение неисправностей электрических подключений/цепей; работа в опасных/агрессивных зонах; контроль двигателей, подшипников и т.п.



КОЭРЦИТИМЕТР ИМПУЛЬСНЫЙ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ КИМ-2

Филиалом ФНПЦ «Прибор» разработан импульсный микропроцессорный коэрцитиметр **КИМ-2** мало-



го размера и веса, отличающийся удобством в работе и простотой в обслуживании. Коэрцитиметр предназначен для неразрушающего контроля качества термической, термомеханической или химико-термической обработок, а также определения твердости и механических свойств деталей из ферромагнитных материалов при наличии корреляционной связи между контролируемым и измеряемым параметрами. Прибор может быть использован для разбраковки по маркам стали и контроля поверхностных слоев ферромагнитных материалов. Прибор представляет из себя электронный блок с накладным преобразователем в виде приставного электромагнита со съёмными полюсными наконечниками и со встроенным в его магнитную цепь датчиком Холла. Размер контактной поверхности преобразователя: толщина полюса 5 мм; ширина полюса 15 мм; межполюсное расстояние 30 мм. Принцип работы прибора состоит в намагничивании контролируемого участка детали накладным преобразователем и последующем размагничивании этого участка нарастающим полем и фиксации напряженности поля, соответствующей коэрцитивной силе, или измерение амплитуды сигнала с датчика Холла, соответствующей остаточной магнитной индукции после размаг-

ничивания предварительно заданным током.

ТВЕРДОМЕР ЭЛЕКТРОННЫЙ ПЕРЕНОСНОЙ ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ТЭМП-2

НПФ «Технотест-М» разработал твердомер электронный переносной программируемый **ТЭМП-2**, позволяющий проводить измерение твердости материала непосредственно в единицах НВ, HRC, HV, HSD. Твердомер предназначен для экспрессного измерения твердости сталей, сплавов и их сварных соединений по шкалам Бринелля, Роквелла, Шора, Виккерса, а также определения предела прочности Rm по ГОСТ 22761-77 для углеродистых сталей перлитного класса.



Может быть использован в производственных и лабораторных условиях в различных отраслях машиностроения, металлургии, энергетике, в ремонтных, монтажных организациях и т.д. Объектами измерений могут быть сосуды давления различного назначения, трубопроводы, роторы турбин и генераторов, прокатные валки, коленчатые валы, шестерни, промышленные полуфабрикаты (отливки, поковки, листы, трубы), сварные швы включая угловые и др.

АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ МАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ

КАН ШОУЧЯН, В. И. МИКУЛОВИЧ

Представлен метод подавления шума в вибрационных сигналах машин на основе эмпирического метода декомпозиции (EMD), позволяющего любой произвольный сигнал разделить на семейство существенных модальных функций (IMF). Для более эффективного подавления шума в разных группах компонентов IMF предложено использовать различные методы вычисления уровня порога: метод мягкого порога EMD и метод оценки энергии шума. Приводятся результаты экспериментальных исследований вибрации вертолета с несбалансированным рулевым винтом, подтверждающие эффективность рассмотренного метода.

The paper presents a procedure of noise suppression in vibration signals of machines based on empirical method of decomposition (EMD), which allows dividing any arbitrary signal into a family of essential modal functions (IMF). For more effective noise suppression, it was proposed to use different methods of calculation of noise threshold: EMD method of soft threshold and method of noise energy assessment. Results of experimental studies of vibrations of a helicopter with unbalanced antitorque propeller are presented, confirming the effectiveness of the considered method.

Функционирование промышленного оборудования с вращающимися деталями неразрывно связано с вибрацией корпусов, опор, составных частей и отдельных деталей. В зависимости от технического состояния машин интенсивность и характер вибрации проявляются самым разным образом. Углубленный и разноплановый анализ вибрационных сигналов позволяет решать многие задачи технической диагностики и прогнозирования, выявлять зарождающиеся дефекты на ранней стадии их возникновения. Однако сложная внутренняя структура вибрации, ее нестационарный характер и наличие разномасштабных локальных особенностей существенным образом затрудняют процесс обработки механических колебаний и выделения информативных (диагностических) признаков [1].

В настоящее время для обработки вибрационных сигналов в большинстве случаев применяется классический метод спектрального анализа, основанный на дискретном преобразовании Фурье. При этом предполагается, что анализируемые процессы являются стационарными или, по меньшей мере, квазистационарными. Вследствие такого допущения спектральный Фурье-анализ является малоинформативным при исследовании мгновенной структуры нестационарных процессов, так как не отражает их частотно-временных характеристик [2].

Указанные проблемы частично решаются переходом к кратковременному (скользящему) преобразованию Фурье с адаптацией временных окон структурным изменениям сигнала таким образом, чтобы гипотеза стационарности была приемлема.

Основным недостатком такого подхода является непреодолимое противоречие между временным и частотным разрешением [2, 3].

В настоящее время показано, что анализ сигналов скользящими окнами является частным случаем анализа в базисе вейвлетов. Вейвлетный анализ, как известно, является весьма эффективным современным методом обработки сложных сигналов, позволяющим детально анализировать их структуру в частотно-временном представлении [3].

Отличительной особенностью анализа в базисе вейвлетов является его высокая чувствительность к кратковременным высокочастотным флуктуациям сигнала, так как окно вейвлета обеспечивает адекватную оценку таких флуктуаций за счет одновременного увеличения амплитуды окна при уменьшении его ширины. При этом разрешающая способность анализа во временной области возрастает с увеличением частоты. Тем не менее, при выборе разных базисных функций разложение (декомпозиция) сигнала оказывается не единственным.

Наиболее эффективным для обработки сложных сигналов различной природы может быть преобразование Гильберта–Хуанга (Hilbert–Huang transform — ННТ), под которым понимается совокупность EMD нелинейных и нестационарных сигналов и преобразования Гильберта [2]. ННТ в целом представляет собой частотно-временной анализ данных и не требует выбора априорного функционального базиса из заранее известного набора, как это делается в Фурье и вейвлет-преобразованиях. Базисные функции, называемые «существенной модальной функцией» (intrinsic mode function — IMF) или эмпирическими модами, в этом случае адаптивно извлекаются из ана-



лизируемых сигналов процедурами отсеивания EMD. Причем разложение осуществляется с учетом локальных особенностей (экстремумов и нулей) и индивидуальной внутренней структуры сигналов: наличия амплитудной, частотной и фазовой модуляции, шумов и помех, выбросов.

Данный метод позволяет преодолеть проблему выбора базисных функций в вейвлетном преобразовании и существенно повысить точность получаемых результатов. Кроме того, на основе эмпирического метода декомпозиции можно решать и задачу понижения уровня шума, присутствующего в обрабатываемых сигналах, так как для восстановления сигнала могут использоваться выбранные компоненты IMF с фильтрацией или с установлением порога, ограничивающего уровень шума.

Целью предлагаемой работы является применение метода EMD для удаления шумов в вибрационных сигналах с тем, чтобы повысить достоверность выявления диагностических признаков в системах контроля состояния машинного оборудования.

Алгоритм EMD. Эмпирический метод декомпозиции, как было отмечено выше, включает разложение заданного сигнала $x(t)$ на ряд существенных мод (IMF). Каждая IMF заменяет отдельные составляющие анализируемого сигнала в определенном масштабе или в определенной полосе частот и должна удовлетворять следующим условиям:

- во всем наборе данных число экстремумов и число пересечений нулевого уровня должно быть либо равным, либо отличаться максимум на единицу;

- в любой точке среднее значение огибающей, определенной локальными максимумами, и огибающей, определенной локальными минимумами, должно быть нулевым.

Разложение в EMD начинается с самой высокочастотной моды, содержащейся в сигнале $x(t)$, так что каждая последующая IMF содержит колебания более низкой частоты, чем предыдущая. Чтобы произошло успешное разложение на эмпирические моды, сигнал $x(t)$ должен иметь, по крайней мере, два экстремума: один минимум и один максимум.

В общем виде алгоритм EMD включает следующую последовательность операций [2].

1. Определение всех экстремумов (максимумов и минимумов) исходного сигнала $x(t)$.

2. Нахождение верхней $A_{\max}(t)$ и нижней $A_{\min}(t)$ огибающей по всем локальным максимумам и минимумам соответственно. Для этой цели чаще применяется интерполяция кубическими сплайнами.

3. Вычисление среднего значения полученных огибающих $m_1(t) = [A_{\min}(t) + A_{\max}(t)]/2$.

4. Выделение разности $h_1(t) = [x(t) - m_1(t)]$.

Если $h_1(t)$ не удовлетворяет двум условиям, указанным выше, то $h_1(t)$ используется в качестве исходного сигнала для повторения пунктов (1–3) до тех пор, когда функция $h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t)$ будет удовлетворять им. В этом случае функция $c_1(t) = h_{1k}(t)$ будет являться IMF1 сигнала $x(t)$.

Вычитая функцию $c_1(t)$ из $x(t)$, получим:

$$x(t) - c_1(t) = r_1(t). \quad (1)$$

Функция $r_1(t)$ используется далее для выполнения этапов (1–4). В результате будет получена функция $c_2(t)$, которая будет IMF2 сигнала $x(t)$.

Повторяя данную операцию, можно получить n компонентов IMF $x(t)$:

$$\begin{aligned} r_1 - c_2(t) &= r_2 \\ r_{n-1} - c_n(t) &= r_n \end{aligned} \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) позволяют получить декомпозицию $x(t)$ в n -эмпирическом приближении:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n, \quad (3)$$

где r_n — последний остаток.

Шумоподавление с использованием мягкого порога EMD. Шумы, сопровождающие полезную информацию в сигнале, удовлетворяют приведенным выше определениям функций IMF и при разложении в EMD они в основном «отсеиваются» в высокочастотные компоненты IMF. Однако на эти же компоненты могут оказывать влияние и высокочастотные составляющие информационной части сигнала в зависимости от их положения в главном частотном диапазоне. Поэтому первоочередной становится задача формирования определенных критериев отбора только шумовых компонентов IMF для исключения их при последующей реконструкции сигнала. В этом случае все компоненты IMF можно разделить на компоненты с преобладающим шумом и компоненты с преобладающим полезным сигналом. Затем для удаления шума в каждой из этих групп компонентов IMF можно использовать метод мягкого порога EMD или метод оценки энергии шума. После чего по выбранным компонентам IMF можно восстановить сигнал с меньшим уровнем шума [4].

Пусть $c_i(t)$ — детерминированные IMF конечной длины L , а IM_i — IMF с аддитивными шумами $n_i(t)$ и дисперсией $\sigma_i^2(t)$:

$$IM_i(t) = c_i(t) + n_i(t). \quad (4)$$

Тогда оценка компонентов IMF $\hat{c}_i(t)$ с учетом удаленного шума может быть определена таким образом:

$$\hat{c}_i(t) = \Gamma(IM_i, \tau_i), \quad (5)$$

где $\Gamma(IM_i, \tau_i)$ — пороговая функция или метод фильтрации, определяемый параметрами τ_i , применительно к IM_i сигнала.

Тогда восстановленный сигнал с пониженным уровнем шума $\hat{x}(t)$ определяется как:

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^n \hat{c}_i(t) + r_n(t). \quad (6)$$

Для снижения уровня шума метод EMD можно комбинировать с методом фильтрации типа сглаживания Савицкого–Голэя или нелинейного преобразования с установлением мягкого порога [5].

Удаление шумов с использованием мягкого порога EMD. Сглаженный вариант входных данных можно получить путем установления порога IMF до восстановления сигнала. Если $\Gamma(IM_i, \tau_i)$ — пороговая функция, а τ_i — пороговое значение, то его можно определить многими способами [6].

Донохо и Джонстоун [6] предложили универсальный порог τ_i для удаления гауссова шума, который задается посредством равенств:

$$\tau_i = \hat{\sigma}_i \sqrt{2 \log(n)}, \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_i = MAD_i / 0,6745, \quad (8)$$

где n — число компонентов IMF; $\hat{\sigma}_i$ — дисперсия шума i -го компонента IMF; MAD_i — абсолютное среднее отклонение i -й IMF:

$$MAD_i = Med \{ |IM_i(t) - Med \{ IM_i(t) \}| \}. \quad (9)$$

Вместо установления одного глобального порога для исходных сигналов здесь в зависимости

от уровня шума используется совокупность порогов по одному для каждой IMF (масштабный уровень). Метод установления мягкого порога сжимает компоненты IMF на τ_i по направлению к нулю следующим образом:

$$\hat{c}_i(t) = \begin{cases} IM_i(t) - \tau_i, & \text{если } IM_i(t) \geq \tau_i \\ 0, & \text{если } |IM_i(t)| < \tau_i \\ IM_i(t) + \tau_i, & \text{если } IM_i(t) \leq -\tau_i \end{cases} \quad (10)$$

Оценка уровня энергии белого шума в EMD.

Для компонентов IMF преобладающего полезного сигнала применение формулы (8) некорректно. Энергия гауссового шума может быть оценена непосредственно [4]:

$$E_i T_i = \text{const}, \quad (11)$$

где E_i — плотность энергии шума i -го компонента IMF; T_i — значение его среднего периода.

Средний период может быть получен усреднением мгновенной частоты преобразования Гильберта первого компонента IMF. На основании энергии этого шума и среднего периода текущего IMF можно оценить энергию шума следующим образом:

$$E_{i+1} = \text{const} / T_{i+1}. \quad (12)$$

Экспериментальные исследования.

В качестве иллюстрации возможностей разработанного метода ниже приводятся результаты обработки вибрационных сигналов с выхода датчика вибрации AP38, установленного на главном редукторе одного из вертолетов в исправном состоянии и с повышенной вибрацией. Первоначально предполагалось, что причиной этому является несба-

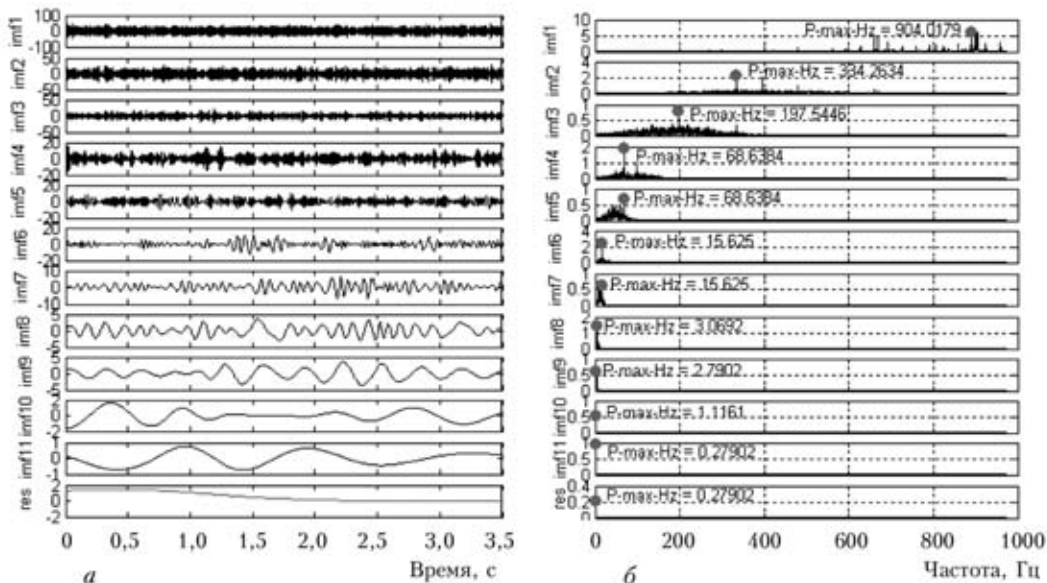


Рис. 1. Результаты декомпозиции вибрации (а) и амплитудный спектр компонентов IMF (б) (исправное состояние)

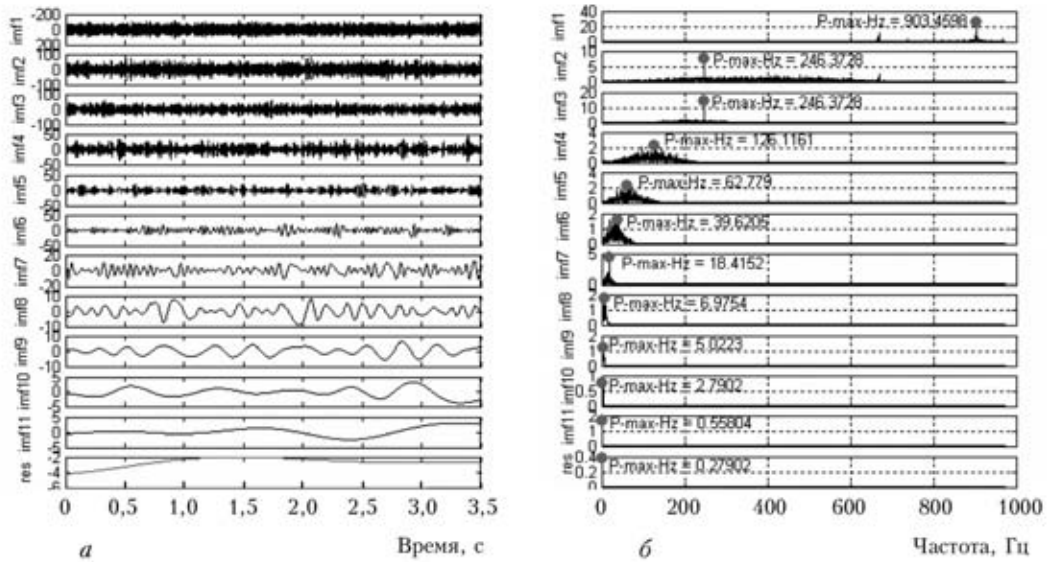


Рис. 2. Результаты декомпозиции вибрации (а) и амплитудный спектр компонентов IMF (б) (неисправное состояние)

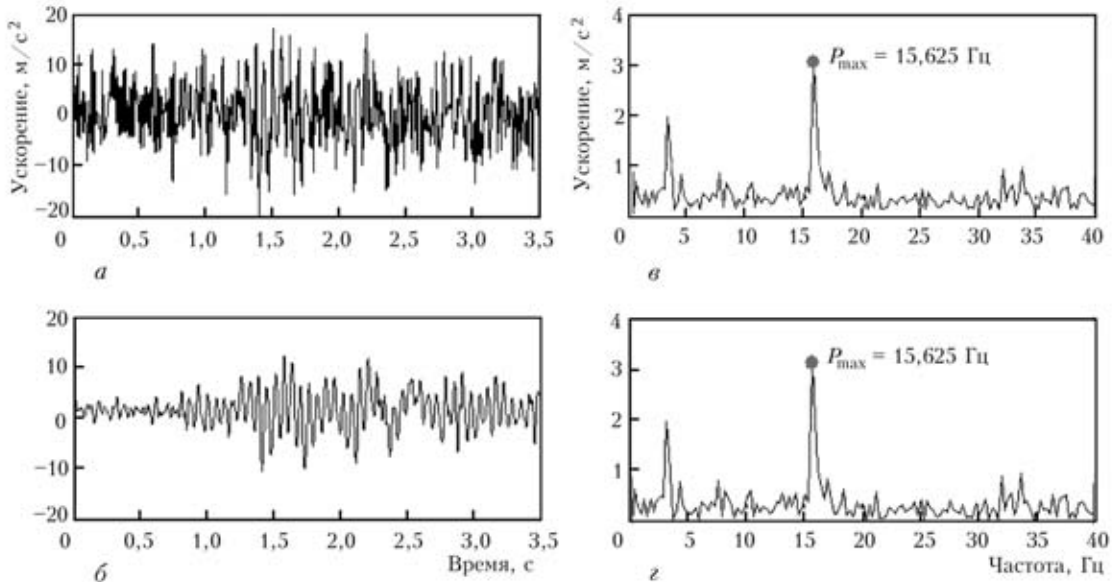


Рис. 3. Восстановленные сигналы до (а) и после шумоподавления (б) и их амплитудные спектры (в, з) для исправного вертолета

лансированность несущего винта. Однако его балансировка не давала ожидаемых результатов.

Для выявления источника повышенной вибрации были выбраны следующие частотные диапазоны: 2...20 Гц (несущий винт) и 10...30 Гц (рулевой).

На рис. 1 представлены результаты декомпозиции вибрации исправного и неисправного вертолета на 11 компонентов IMF и остаток *res.*, а их амплитудные спектры — на рис. 2.

В соответствии с определенным частотным диапазоном для дальнейшего анализа выбраны компоненты IMF5-IMF11. На рис. 3 показаны восстановленные на основе выбранных компонентов IMF сигналы и их амплитудные спектры до и после шумоподавления с использованием методов

мягкого порога EMD и оценки энергии шума для исправного, а на рис. 4 — неисправного вертолета.

Как видно, амплитудные спектры, представленные на рис. 3, 4, позволяют лучше обнаружить присутствие мощных гармонических составляющих в полосе частот от 18 до 19 Гц, которые отсутствовали в амплитудном спектре вибрации исправного вертолета.

Как оказалось, в данной частотной полосе расположена первая гармоника вибрации рулевого винта, которая появилась вследствие несбалансированности хвостового винта, вызванная дефектом сборки его редуктора. После выполнения соответствующих работ по его балансировке вибрация вертолета стала соответствовать нормальному уровню.

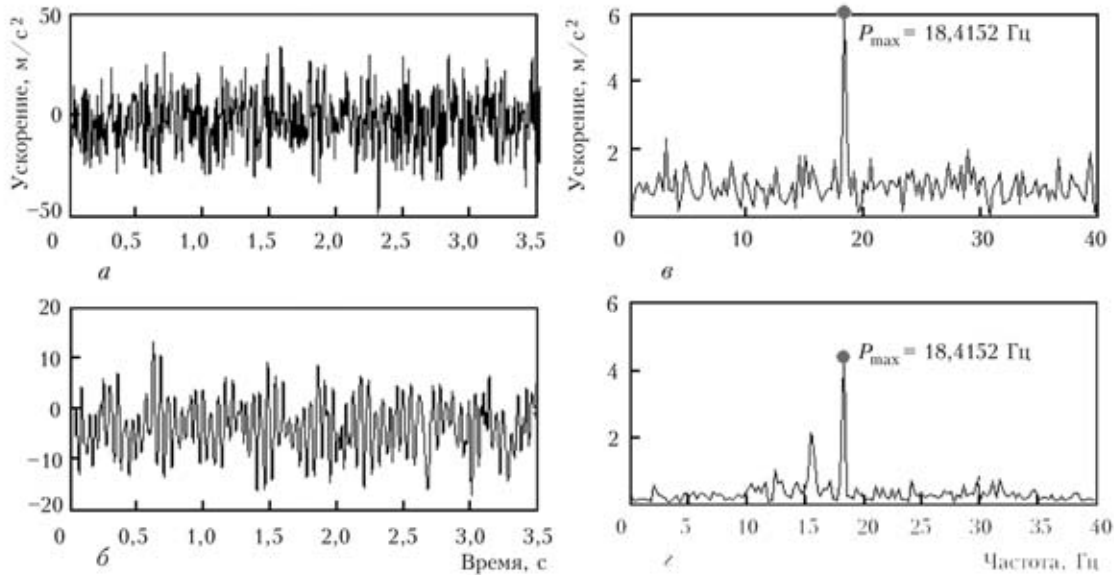


Рис. 4. Восстановленные сигналы до (а) и после шумоподавления (б) и их амплитудные спектры (в, з) для неисправного вертолета

Для сравнения вибрационные сигналы вертолета в исправном и неисправном состоянии с использованием вейвлета Добеши-5 были разложены на отдельные компоненты с масштабом декомпозиции $j = 5$. На рис. 5, 6 представлены амплитудные спектры выбранного коэффициента аппроксимации для пятого масштаба (частотный диапазон 0...30,5175 Гц) до и после шумоподавления с использованием метода мягкого порога.

Как видно, шумоподавление с применением этого метода в данном случае неидеально для низких частот, и, кроме того, получаемые результаты

неоднозначны при выборе различных базисных функций вейвлета.

Сравнение результатов шумоподавления в вейвлет-анализе и методе EMD совместно с Фурье-анализом показывает, что метод EMD позволяет получать лучшие результаты, чем вейвлет-анализ, и не требует предварительного выбора подходящей базисной функции, что в вейвлет-анализе составляет достаточно сложную проблему. При этом отношение сигнал — шум увеличивается более чем на 8 дБ.

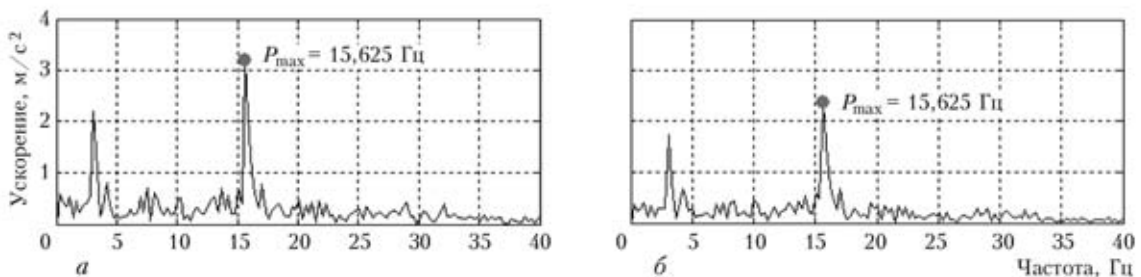


Рис. 5. Спектр вибрации исправного вертолета до (а) и после шумоподавления (б)

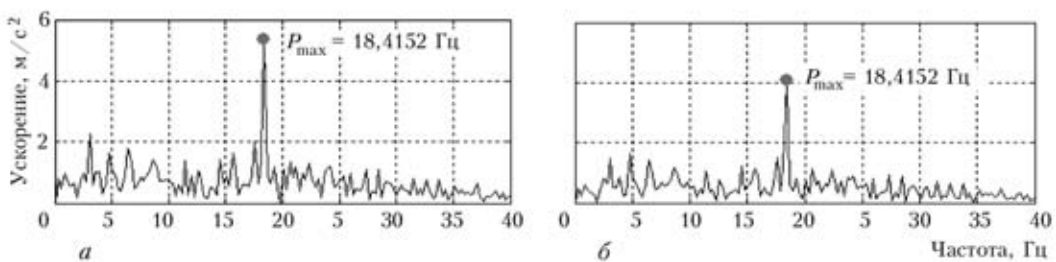


Рис. 6. Спектр вибрации неисправного вертолета до (а) и после шумоподавления (б)

**Выводы.**

В результате проведенных исследований установлено, что метод EMD характеризуется вполне определенной частотной избирательностью на каждом уровне компонентов IMF.

Для более эффективного подавления шума в разных группах компонентов IMF лучше использовать различные методы вычисления уровня порога: метод мягкого порога EMD и метод оценки энергии белого шума. Применение одинакового метода вычисления порога приводит к значительным искажениям в реконструированных сигналах.

Спектральный анализ отдельных компонентов IMF, соответствующих определенным частотным диапазонам вибрации, является наиболее эффективным для вибрационной диагностики машин.

1. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. — С.-Пб.: Изд-во АО ВАСТ, 1997. — 240 с.
2. The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long et al. // Proc. R. Soc. Lond. — 1998. — A454. — P. 903–995.
3. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. — М.: СОЛОН-Р, 2002. — 448 с.
4. Zhaohua Wu, Norden E. Huang. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method // Ibid. — 2004. — A454. — P. 1597–1611.
5. Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and differentiation, of data by simplified least squares procedures // Analytical chemistry. — 1964. — 36. — P. 1627–1639.
6. Donoho D. L., Johnstone I. M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage // Biometrika. — 1994. — 81, № 3. — P. 425–455.

Белорус. гос. ун-т, Минск
Харбинский науч.-техн. ун-т, Китай

Поступила в редакцию
14.01.2010



Новости УО НКТД

С 7 по 11 июня 2010 г. в Москве в выставочном комплексе "Экспоцентр" на Красной Пресне проходила 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю (10 ECNDT) и выставка средств НК и ТД. По данным аналитического центра 10 ECNDT в работе конференции приняли участие более 5000 человек из 60 стран мира. На выставке разместили свои стенды 150 фирм. Особенностью этого мероприятия было то, что рабочим языком конференции был английский.

Учеными Украины было представлено 30 докладов по разным проблемам НК и ТД. Наиболее интересными из них были доклады Бондаренко А. И. по проблемам дальнедействующего низкочастотного УЗК; Посыпайко Ю. Н. и др. по магнитно-оптическому методу; Учанина В. Н., Казакевича М. Л. и др.

За неделю до начала конференции прошло пять заседаний технического комитета TC-135 Всемирной организации по стандартизации ISO, в работе которых приняли участие 65 ученых из 24 стран. Впервые в работе TC-135 участвовали украинские специалисты. Двое из них (Троицкий В. А. и Казакевич М. Л.) вошли в состав TC-135. Самые многочисленные делегации были из Бразилии, Японии и Германии. Это было 17-е заседание ISO/TC-135. Решения, принимаемые ISO/TC, изучаются во всех странах и кладутся в основу континентальных (например, EN) и национальных (ДСТУ) норм.

Украинская делегация приняла участие в подготовительных и генеральных заседаниях Европейской федерации (EFNDT) и Интернационального комитета (ICNDT). Были заслушаны отчеты этих организации и представлены доклады о направлениях работы EFNDT и ICNDT. Обе международные организации вручили УО НКТД свои Membership Certificate.

На выставочных стендах было представлено 43 различных общества NDT. Интересные, информационно наполненные стенды были США (ASNT), Англии, Южно-Африканской республики, России, Чехии и др. стран. Проведен конкурс на лучший стенд, победителем которого признана ЮАР. Стенд Украины оказался одним из наиболее посещаемых, было распространено много наших книг и журналов, рекламных материалов.



СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. А. СИДОРОВ

Практическая реализация теоретических положений технической диагностики механического оборудования требует комплексного решения задач определения внутреннего состояния элементов механизма, определения значений прикладываемых нагрузок, восстановления работоспособного состояния механизма. Определено направление развития теории практической диагностики — разработка методов и средств управления техническим состоянием.

Practical realization of theoretical principles of technical diagnostics relative to mechanical equipment requires a complex solution of the problems of determination of inner state of mechanism elements, determination of applied load magnitudes, and restoration of operable condition of the mechanism. Direction of development of theory and practice of technical diagnostics is established, namely development of methods and means of technical condition control.

Теоретические вопросы технической диагностики в основном решены в 1970-х годах и представлены в работах И. А. Биргера [1], П. П. Пархоменко [2], Б. В. Павлова [3]. Предполагалось, что «начальное техническое состояние устройства, внешние условия работы и закономерности протекания процесса износа и разрушения могут быть заданы в форме дифференциальных уравнений, решение которых с достаточной точностью предскажет момент поломки» [4].

Практическая реализация теоретических положений показала необходимость решения ряда дополнительных задач при определении технического состояния механического оборудования. Установлено, что состояние оборудования определяется внутренним состоянием отдельных элементов механизма, значениями прикладываемых нагрузок и реализацией воздействий по восстановлению работоспособного состояния механизма [5]. Соответственно современные задачи определения технического состояния механического оборудования заключаются в комплексном решении данных вопросов в общем аспекте эффективного восстановления работоспособного состояния механической системы. Рассмотрение уровней решения задач позволит классифицировать реализуемые функции диагностическими системами и выявить направления дальнейшего развития.

Известны методы функционального и тестового диагностирования, определяющие реакцию объекта контроля на неизвестное или известное внешнее воздействие [6]. Опыт диагностирования механического оборудования металлургических предприятий показывает необходимость использования информации, полученной при работе в режиме холостого хода и при работе под нагрузкой [7]. Решение задачи функционального диагностирования

должно предусматривать возможность однозначного определения действующей нагрузки. В этом случае точность диагностирования увеличивается и повышается эффективность ремонтных работ.

Определение внутреннего состояния элементов механизма. *Первый уровень* — это анализ технического состояния без применения технических измерительных или регистрационных средств на основании органолептических методов диагностирования. Эта информация не может быть представлена в численном выражении, поскольку решение принимается по результатам анализа чувственных восприятий. Поэтому точность метода зависит от квалификации, опыта и способностей лиц, проводящих диагностирование. При органолептическом контроле используются технические средства: лупа, микроскоп, технический стетоскоп и т. п., не являющиеся измерительными.

Решение принимается на уровне «соответствует» «не соответствует» и определяется диагностическими правилами типа «если—то», имеющими конкретную реализацию для узлов механизма. Практически состояние оборудования оценивается по двухуровневой шкале — продолжать эксплуатацию или необходим ремонт. Объем информации о техническом состоянии, а в данном случае минимально необходимый.

Основная цель — обнаружение отклонений от работоспособного состояния механизма. Решение о техническом состоянии механизма принимает технологический или ремонтный персонал. Принимается решение об остановке оборудования для визуального осмотра и последующего ремонта или продолжения эксплуатации.

Основные органолептические методы, используемые при оценке технического состояния механического оборудования, следующие:



– анализ шумов механизмов на основании акустического восприятия и анализа колебаний механизмов;

- контроль температуры;
- восприятие вибрации;
- визуальный осмотр механизма;
- методы осознания.

Эти методы универсальны, и если они применяются квалифицированным персоналом, имеющим значительный опыт работы наблюдения за состоянием оборудования, то их выполнение является залогом работоспособного состояния механического оборудования [8].

С позиций состояния механического оборудования работоспособное состояние следует определить не только как выполнение всех функций механизмом в пределах заданных параметров. При этом необходимо обеспечить: низкий уровень шума и вибрации; минимизацию динамических, в частности, ударных процессов; допустимые значения температуры деталей механизма; отсутствие трещин и подтеканий масла. Это позволяет сформулировать перечень диагностических параметров, объединив субъективные и объективные (приборные) методы технического диагностирования: анализ шумов механизма, измерение параметров вибрации, измерение температуры, результаты визуального осмотра.

Второй уровень позволяет решать вопросы контроля технического состояния механического оборудования на основе текущего контроля (мониторинга) значений диагностических параметров. Наиболее часто используется контроль температуры и параметров вибрации.

Целевую функцию данной задачи можно определить как контроль пороговых значений. Проводится измерение и контроль одного или нескольких диагностических параметров и сравнение с заданными пороговыми значениями. Требуется повышение уровня знаний персонала для интерпретации полученных данных на уровне «допустимо», «недопустимо». Для встроенных (стационарных) систем диагностирования реализуются функции защиты — сигнализация о превышении заданного уровня или отключения оборудования.

При реализации данной задачи используются портативные приборы, анализаторы или встроенные системы диагностирования. Их использование цеховыми группами диагностирования или как элемент системы управления позволяет предупредить возникновение аварийных ситуаций. На этом принципе строятся системы защиты оборудования по контролируемым диагностическим параметрам: осевому смещению, температуре, параметрам вибрации. Техническое состояние рассматривается как совокупность диагностических параметров, изменяющих значения при изменении состояния объекта [9].

Методическое обеспечение — это разработка методов оценки технического состояния: взаимной, относительной и абсолютной оценки. Основные положения взаимной и относительной оценки приведены в работах [10, 11]. Абсолютный метод представлен все более расширяющимся перечнем стандартов, регламентирующих допустимые уровни вибрации для различных классов машин.

Третий уровень позволяет решать вопросы распознавания (диагностирования) неисправностей механического оборудования. Появляется возможность отслеживания трендов изменения составляющих диагностических сигналов. Специализированными подразделениями ремонтных служб (службы диагностирования, виброналадки) используются в основном анализаторы вибрации, что позволяет решать широкий круг задач, связанных с определением времени ремонтного воздействия.

Обнаружение неисправностей механического оборудования проводится на основе диагностических моделей типа «если—то». При интерпретации результатов применяют экспертные системы, основанные на формализации отработанных алгоритмов диагностирования или анализе опыта квалифицированных экспертов.

Классическая теория технической диагностики изначально предполагает установление связи между пространством состояний и пространством диагностических признаков. Для этого формулируются условия разбиения множества W на подмножества: исправных W_1 и неисправных W_2 состояний; определяется критерий для оценки работоспособности объекта диагностики (различение состояний в подмножестве W_1); устанавливаются признаки возникших неисправностей (различение состояний в подмножестве W_2); устанавливаются соответствия между пространством состояний W и пространством диагностических признаков D [9].

Традиционный подход к определению технического состояния механизма, в общем аспекте решения задач технической диагностики, в первую очередь предполагает поиск неисправностей, т. е. различение состояний в подмножестве W_2 [10]. С этой целью строится диагностическая модель, составляется словарь неисправностей, определяются диагностические признаки и так далее. Поиск неисправностей ведется по выбранным диагностическим признакам в зоне предполагаемых значений. Определяющим становится не количество и вид неисправностей, а количество возможных проявлений неисправностей, имеющее в несколько раз большее количество. Увеличивается число диагностических параметров, усложняются диагностические модели, растет количество обрабатываемой информации. Это усложняет процесс постановки правильного диагноза.

Методическое обеспечение заключается в разработке справочников повреждений. Для механического оборудования в наибольшей степени используется анализ составляющих вибрационного сигнала [12, 13] (рис. 1).

Определение значений прикладываемых нагрузок. *Первый уровень* — отображение значений прикладываемых нагрузок на основные органы чувств человека. Для этого также используются органолептические методы диагностирования: уровень и характер шума и вибрации, плавность выполнения операций и реакция механизма на управляющие воздействия. Эта информация не может быть формализована. Использование органолептических методов контроля является непременным и важным условием безаварийной работы механического оборудования.

Оператор непосредственно связан с объектом управления. Состояние объекта управления оценивается не только на основании визуальной информации, но и при помощи осязания, слуха, обоняния. Квалифицированный оператор распознает вибрации, скрипы металлоконструкций и ускорения — рывки механизмов. На основании имеющегося опыта работы оператор оценивает техническое состояние и определяет отклонения параметров от стандартных, принимает решение по управлению состоянием механизмов и конструкций. Чем выше опыт и квалификация оператора, тем более точно он может определять состояние оборудования и металлоконструкций, тем самым выявлять места их поломки или отклонения от заданных норм. Так работает система управления первого поколения [14]. Идентифицировав отклонение параметров отклонились от принятых норм, оператор передает информацию обслуживающему персоналу (механикам, электрикам), которые и устраняют неисправность.

Фактические значения действующих сил на данном уровне остаются неизвестными и определяются на уровне «больше—меньше».

Второй уровень — контроль пороговых значений внешней нагрузки. Контроль осуществля-

ется путем регистрации силовых параметров привода: текущих значений силы тока, значений давления в нагнетательных линиях гидропривода, частоты вращения вала электродвигателя. Для реализации функций защиты в схемах управления устанавливаются токовые реле защиты от перегрузок, предохранительные клапаны.

Выполняется визуализация действующих нагрузок в виде аналоговых, цифровых показывающих приборов, временной реализации текущих значений контроля (рис. 2, 3).

Осуществляется контроль и защита оборудования по контролируемому параметру. В случае превышения заданных порогов включается звуковая, световая сигнализация, проводится отключение оборудования. Пороги устанавливает разработчик или обслуживающий персонал на основе опыта использования оборудования или рекомендаций стандартов.

Третий уровень — это распознавание уровней прикладываемых технологических и паразитных нагрузок. Это позволит определять зоны стабилизации технического состояния при изменении режимов работы оборудования, минимизировать степень разрушающих технологических нагрузок. Примером такого решения может быть график изменения общего вектора виброскорости редуктора привода прокатной клетки от частоты вращения вала двигателя (рис. 4). В данном случае снижение виброскорости произошло из-за проявления гирокосмического эффекта при работе оборудования на податливом фундаменте.

Использование информации о внешней нагрузке является необходимым элементом при определении текущего состояния механизма и прогнозировании снижения ресурса из-за накопления повреждений под влиянием повышенных нагрузок. Следовательно, реализация данных задач должна решаться в рамках единой системы диагностирования.

Восстановление работоспособного состояния механизма. *Первый уровень* позволяет восстановить рабочее состояние механического обо-

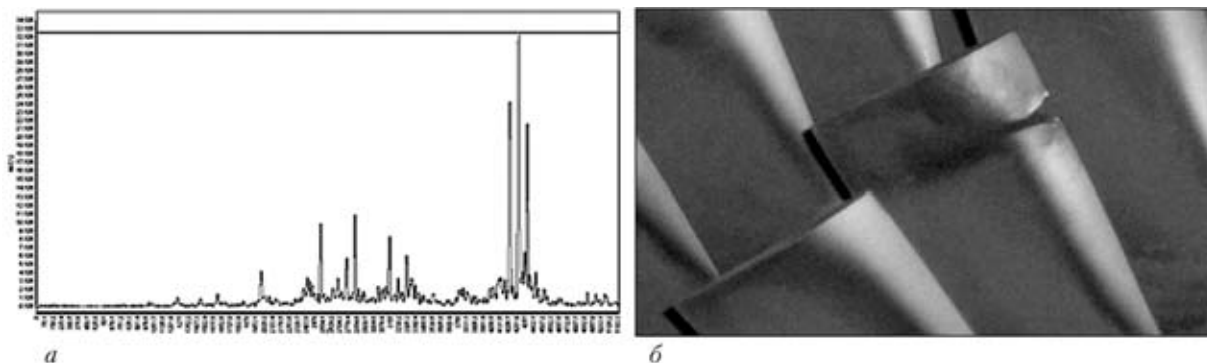
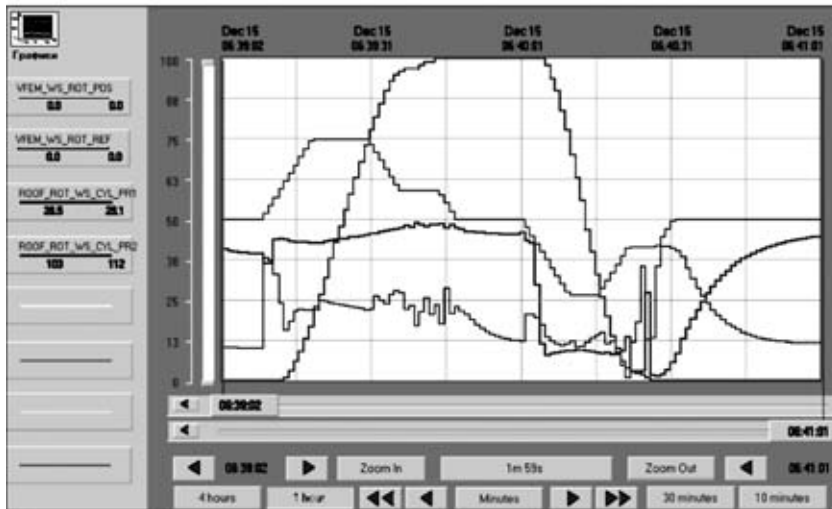


Рис. 1. Преобладающая лопаточная частота в спектре виброускорения, зафиксированного на корпусе компрессора (а) и визуальное подтверждение повреждений лопатки при ремонте (б)



б

Рис. 2. График движения свода (а) и пример реализации процесса (б)

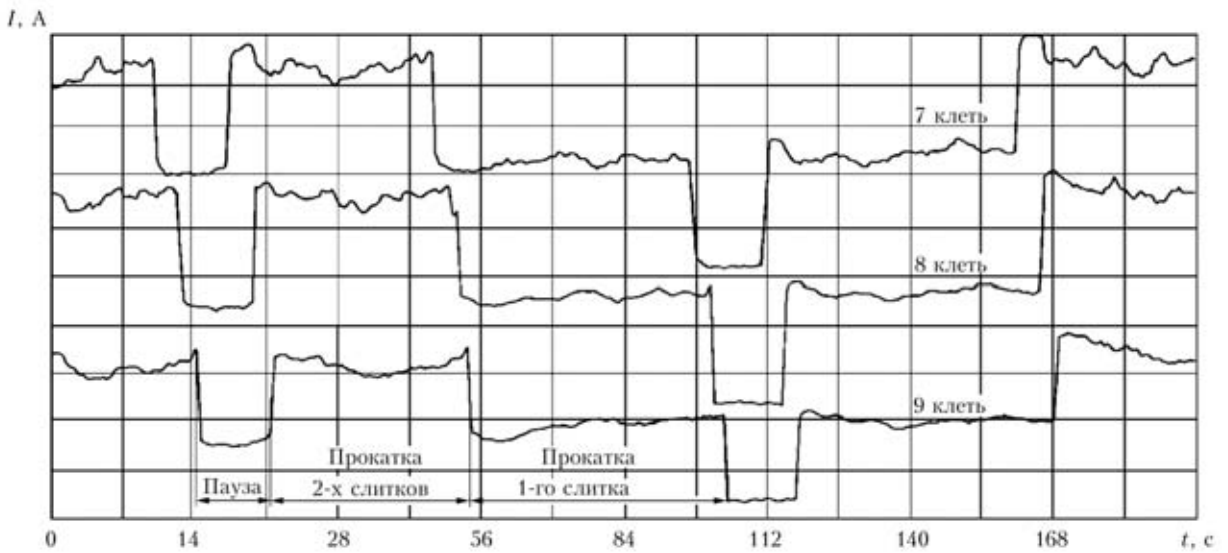


Рис. 3. Временные формы токовых характеристик двигателей прокатных клетей

рудования путем выполнения предупредительных операций по техническому обслуживанию и ремонту. При техническом диагностировании требуется не только обнаружение неисправностей, а и выдача четких рекомендаций. Следовательно, для каждого возможного вида ремонтных воздействий R_i необходимо определить диагностические признаки D_i . Необходимость проведения каждой операции следует определить несколькими решающими правилами, сопоставив их с ограниченным числом диагностических признаков.

Основанием для решения может послужить ограниченное число реальных ремонтных воздействий применительно к конкретному механизму. Перечень операций по техническому обслуживанию следующий: осмотр, очистка механизма, окраска деталей, смазка и затяжка резьбовых соединений. Операции по ремонту механического оборудования: регулировка — центрирование валов, установка зазоров, выверка положения элементов, балансировка; замена быстроизнашивающихся деталей (подшипников, валов, зубчатых передач, резьбовых соединений, уплотнений); восстановление корпусных деталей.

Методическое обеспечение — обоснование необходимости проведения ремонтов. Это позволит создать теоретические предпосылки для перехода на ремонт механического оборудования по состоянию.

Второй уровень — проведение упреждающего ремонта. Исходя из методологии теории катастроф, авария начинается развитием подготовительных процессов, дальнейшим доминированием нескольких процессов и завершается инициирующим событием. Соответственно, развитие отказа можно замедлить и предотвратить, влияя на скорость развития подготовительных процессов. Это обосновывает актуальность проведения предупредительных ремонтных воздействий для обеспечения безотказности и повышения долговечности оборудования. Необходимым условием для успешной реализации данного предложения является определение факторов, определяющих работоспособное состояние механизма и уровней данных факторов для оценки категории технического состояния.

Факторы, обеспечивающие работоспособность элементов и механизма в целом: состояние неподвижных соединений; состояние узлов трения; взаимное расположение деталей; равномерное распределение сил; накопление усталостных повреждений. Каждый из факторов имеет четыре уровня: исправного состояния, малых отклонений,

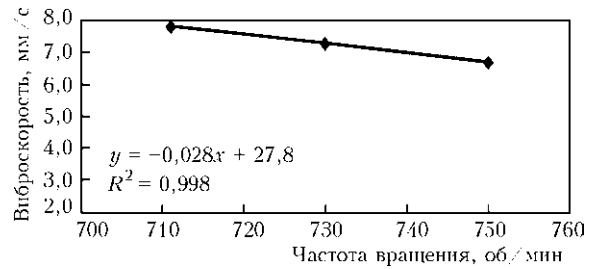


Рис. 4. Зависимость изменения вектора виброскорости редуктора прокатной клетки от частоты вращения двигателя

проведения ремонтных воздействий и предотказный. Уровни факторов необходимо определить по изменениям физических процессов износа или взаимодействия элементов. Соответствующие уровни факторов работоспособности элементов определяют техническое состояние механизма: хорошее, удовлетворительное, плохое и аварийное.

Основные предпосылки при определении уровней факторов следует определить изменением физики процесса износа, например, характера взаимодействия контактирующих либо сопрягаемых деталей.

Третий уровень позволит обеспечить управление техническим состоянием оборудования на этапе эксплуатации без остановки технологического процесса. Необходимое условие — наличие регуляторов технического состояния, отсутствующих в настоящее время. Примером такого вида регуляторов являются автоматические балансировочные устройства, используемые для оборудования, работающего в резонансном режиме.

Для контроля этих устройств и понадобятся закономерностей протекания процессов износа и разрушения, определяемые решением систем дифференциальных уравнений, описывающих техническое состояние [1–4]. Взаимосвязь решаемых задач определения технического состояния меха-

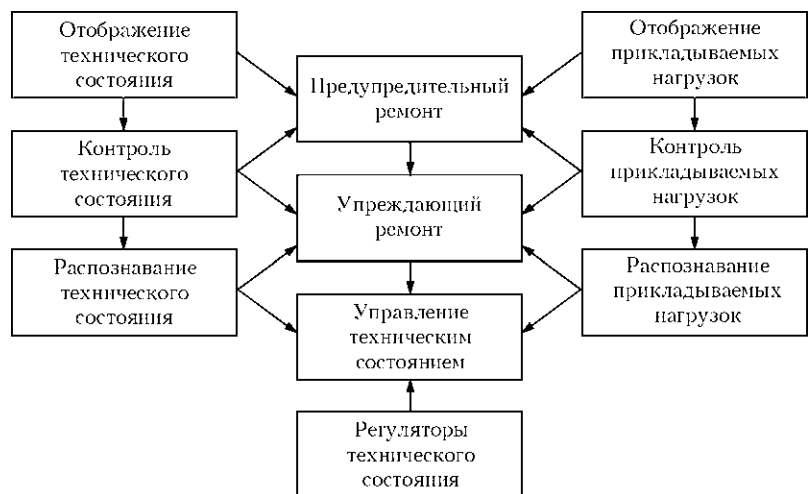


Рис. 5. Структурный график задач определения технического состояния механического оборудования



нического оборудования представлена структурным графиком (рис. 5).

Выводы

Проведенный анализ уровней задач определения технического состояния механического оборудования позволил установить направление развития теории практической диагностики — разработка методов и средств управления техническим состоянием.

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
2. Основы технической диагностики: В 2-х кн. / Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П. П. Пархоменко. — М.: Энергия, 1976. — 464 с.
3. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов. — М.: Машиностроение, 1971. — 224 с.
4. Суетин А. С. Роль технической диагностики в ремонтном производстве / А. С. Суетин, В. И. Дубов, Н. И. Хильченко // Металлургическое машиноведение и ремонт оборудования. Тематический отраслевой сб. — 1976. — № 5. — С. 63–65.
5. Седуш В. Я. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин: Учебник. — 3-е изд., перераб. и доп. — Киев: НМК ВО, 1992. — 368 с.

6. Артоболевский И. И., Бобровницкий Ю. Н., Генкин М. Д. Введение в акустическую диагностику машин. — М.: Наука, 1979. — 296 с.
7. Авакумов С. И., Сидоров В. А., Сотников А. Л. Особенности диагностирования металлургического оборудования // Металлургическая и горнорудная пром-сть. — 2002. — № 3. — С. 96–99.
8. Сидоров В. А. Аксиомы работоспособного состояния металлургического оборудования / Проблемы механики горнометаллургического комплекса: Тез. докл. междунар. научно-техн. конф., 25–28 мая 2004 г. — Днепропетровск, НГУ, 2004. — С. 103–104.
9. Введение в техническую диагностику / Под ред. К. Б. Карандеева. — М.: Энергия, 1968. — 224 с.
10. Голуб Е. С., Мадорский Е. З., Розенберг Г. Ш. Диагностирование судовых технических средств: Справочник. — М.: Транспорт, 1993. — 150 с.
11. Кравченко В. М., Сидоров В. А., Седуш В. Я. Техническое диагностирование механического оборудования. — Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. — 459 с.
12. Ширман А. Р., Соловьев А. Д. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. — Москва, 1996. — 276 с.
13. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: С.-Пб.: Изд. центр С.-Пб.ГМТУ, 2000. — 169 с.
14. Ницета В. В. Класифікація систем автоматизованого керування / Нафтова та газова пром-сть. — 2008. — № 6. — С. 51–54.

Донец. нац. техн. ун-т

Поступила в редакцию
12.01.2010

23–26 Листопада 2010 р.

IX МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2010

УКРАЇНА, КИЇВ
МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР



**УКРПРОМ
АВТОМАТИЗАЦІЯ**

- АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА
- КОМП'ЮТЕРИ І МЕРЕЖІ
- ВБУДОВАНІ СИСТЕМИ
- ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ
- ПРИЛАДИ І КОМПОНЕНТИ
- SCADA-СИСТЕМИ
- СИСТЕМИ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ
- УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВОМ
- ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
- СИСТЕМНА ІНТЕГРАЦІЯ І НАВЧАННЯ



**ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ,
ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ**

- СТАНДАРТИЗАЦІЯ
- СЕРТИФІКАЦІЯ
- МЕТРОЛОГІЯ
- НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА
- КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ І АПАРАТУРА
- ВАГОВЕ І ВАГОДОЗУЮЧЕ ОБЛАДНАННЯ
- ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ:
"ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА"

СИСТЕМА СЖАТИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Д. С. АСТАХОВ, В. В. ГОРОДНИЧИЙ

Рассматривается электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь, ослабляющий помехи от зондирующего импульса при непрерывном излучении. Предложена схема электрическая принципиальная такого ЭМА преобразователя и его конструкция.

The paper deals with electromagneto-acoustic (EMA) transducer weakening the probing pulse noise at continuous radiation. An elementary diagram of such an EMA transducer and its design are proposed.

Развитие бесконтактных методов УЗ НК, в частности, электромагнитно-акустического (ЭМА), требует повышения достоверности системы контроля в целом, поскольку коэффициент двойного ЭМА преобразования очень мал ($10^{-6} \dots 10^{-7}$) [1].

Для увеличения достоверности ЭМА системы контроля необходимо увеличивать отношение сигнал–шум (ОСШ) на входе приемника. Для этого наиболее целесообразно использовать сложные сигналы и применять к ним оптимальную обработку [1]. Поскольку для значительного увеличения ОСШ необходимо использование сигналов большой длительности, возникает необходимость одновременного приема полезного сигнала и передачи зондирующего. При поточном контроле в производстве в принимающем ЭМА преобразователе наводится как полезный сигнал, так и зондирующий. Для приемника зондирующий сигнал является помехой, поэтому его необходимо компенсировать. Сложностью компенсации помехи для ЭМА метода является использование сигналов высокого уровня, достигающих единиц киловольт. Для проведения обработки сигнала необходимо понизить его амплитуду до уровня, с которым может работать приемник системы контроля. Для этого предлагается система сжатия динамического диапазона принимаемых сигналов. Данная система представляет собой две пары дифференциально включенных между собой катушек индуктивностей [2]. Общий вид конструкции системы представлен на рис. 1. Генератор 1, усилитель 2, излучающие высокочастотные катушки 3 и 4, соединенные с выходом генератора 1, и приемные катушки 5 и 6 соединены последовательно-встречно и подключены ко входу усилителя 2. При подаче электрического сигнала на преобразователь токи в катушках 1 и 2 протекают в одинаковых направлениях, поэтому ЭДС, наводимые токами в катушках 5,

6, взаимно компенсируются и на вход усилителя электрический сигнал не поступает, что уменьшает «электронную» мертвую зону. При приеме упругих волн токи в наружных катушках протекают в противоположных направлениях, в результате ЭДС, наводимые токами во внутренних катушках, суммируются. Электрическая схема соединения приемных и передающих катушек индуктивности показана на рис. 2. При импульсном режиме работы генератор нагружен на низкоомную нагрузку, а на усилитель подается сигнал с высокоомных катушек. В результате эффективность регистрации электромагнитных колебаний повышается. При использовании сложных сигналов большой длительности такой преобразователь неэффективен, поскольку прием и передача сигналов ведется одновременно. Поэтому необходимо изменить его электрическую часть, оставив при этом неизменной конструкцию (рис. 3).

Конденсатор $C1$ подбирается таким образом, чтобы в передающей цепи возникал резонанс. При этом передающие катушки не будут нагружены на выходные каскады усилителя мощности во время приема. Конденсаторы $C2-C4$ играют роль сумматора, а также служат для компенсации емкостной связи между катушками. Конденсатор $C4$ необходим для точной балансировки сумматора.

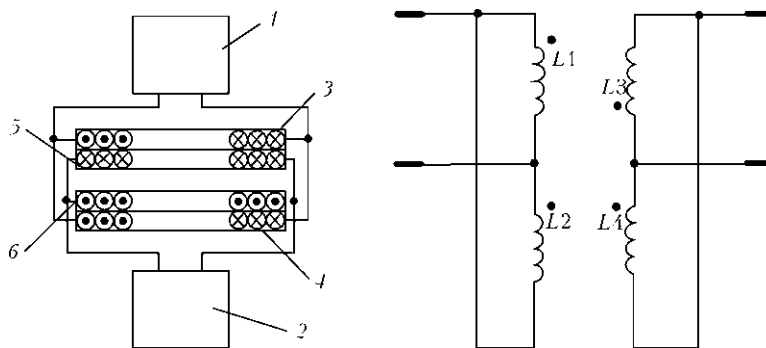


Рис. 1. Схема конструкции системы сжатия (обозначения см. в тексте)

Рис. 2. Электрическая схема соединения приемных ($L1, L2$) и передающих ($L3, L4$) катушек

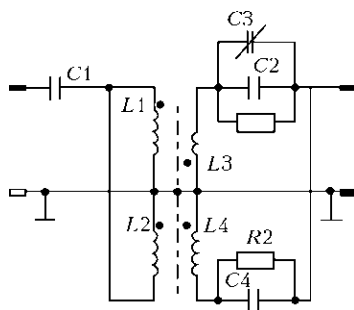


Рис. 3. Электрическая схема измененного ЭМА преобразователя: $L1, L2$ — излучающие, $L3, L4$ — приемные катушки

Поскольку приемные катушки находятся в разных рабочих условиях, схема оказывается несимметричной, в результате возникает фазовый сдвиг между сигналами в катушках $L3, L4$. Для его компенсации необходимы сопротивления $R1, R2$.

На рис. 4 приведены внешние катушки при возбуждении и приеме упругих волн. Направление токов во внутренних катушках при возбуждении и приеме упругих волн показано на рис. 5.

Принцип работы преобразователя. Электрические сигналы с генератора 1 поступают на внешние катушки 3 и 4 (рис. 1). При протекании тока в них на поверхности изделия индуцируются вихревые токи. Последние, взаимодействуя с магнитным полем (источник магнитного поля не показан), вызывают упругие напряжения, являющиеся источниками упругих волн. Токи в катушках 3 и 4 протекают в одинаковых направлениях, поэтому наводимые при этом в катушках 5 и 6 ЭДС возбуждаются навстречу одна другой и компенсируются. При регистрации упругих волн смещения проводящих частиц изделия в магнитном поле вызывают явление электромагнитного поля, которое наводит ЭДС в нижней катушке. В результате в нижней катушке возникает ток, который замыкается через верхнюю катушку. Токи в этих катушках протекают в противоположных направлениях и наводимая в катушках $L3$ и $L4$ ЭДС суммируется. На вход усилителя поступает ЭДС, равная сумме ЭДС, наводимых в каждой катушке.

В результате использования предложенного ЭМА преобразователя можно добиться значительного уменьшения помехи от зондирующего импульса на входе приемника. Эффективность преобразователя во многом зависит от качества настройки и стабильности параметров элементов схемы.

Следует учесть, что при движении ЭМА преобразователя вдоль объекта контроля (ОК) меняется зазор. Это вызывает изменение коэффициента вза-

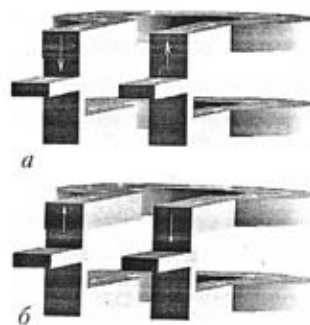


Рис. 4. Внешние катушки при возбуждении (а) и приеме (б) упругих волн

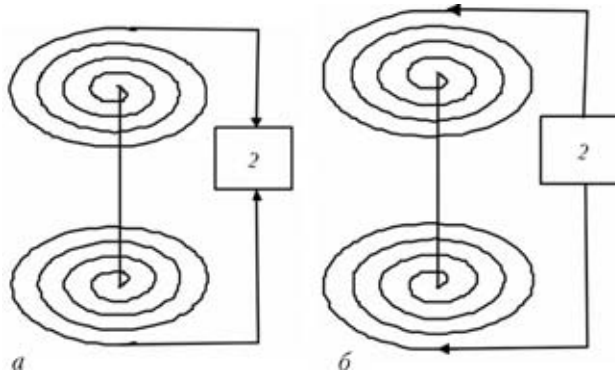


Рис. 5. Направление токов во внутренних катушках при возбуждении (а) и приеме (б) упругих волн

имной индукции между катушками и соответственно уровень наводимой помехи. Чем выше проводимость ОК, тем больше изменение помехи. Для компенсации колебания уровня помехи следующим этапом необходимо использовать автоматическую систему. Это позволит еще больше увеличить ОСП на входе приемника, и, таким образом, увеличить чувствительность системы контроля.

Оценочные расчеты показывают, что с помощью рассмотренного ЭМА преобразователя можно ослабить сигнал от зондирующего импульса примерно в 1000 раз. На практике удалось получить ослабление в 300 раз. При этом приемные и передающие катушки были выполнены печатным способом на фольгированном текстолите толщиной 0,5 мм. Эксперимент был проведен для катушек с количеством витков 20 и 30. В обоих случаях шаг спирали 1 мм, толщина проводника 0,5 мм.

1. *Неразрушающий контроль*: Справ. В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
2. А. с. 1357834 СССР, G 01 N 29/24. Электромагнитно-акустический преобразователь / С. Ю. Гуревич, Х. Б. Толпиков, Ю. Г. Гальцев. — Опубл. 06.01.86.

ПРО ДЕЯКІ ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ У СФЕРІ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

О. М. КАРПАШ, Я. М. ЗІНЧАК, М. О. КАРПАШ

Проведено аналіз нормативної документації, що стосується термінології, методичного і кадрового забезпечення у сфері технічної діагностики. Додатково описано проблемні питання і шляхи їх усунення.

Analysis of regulatory documents concerning terminology, methodological and staff support in the field of technical diagnosis is performed. Problem issues are outlined and ways of their solution are given.

Науково-технічні досягнення електронної, атомної, хімічної, енергетичної та інших галузей у ХХ ст. вивели суспільство на якісно новий рівень життя й одночасно призвели до величезних потенційних загроз. Зросли вимоги до рівня безпеки, які започаткували формування сучасного нормативно-правового, науково-методологічного, організаційного, технічного та управлінського забезпечення діяльності потенційно-небезпечних промислових об'єктів. Лідером у цьому напрямку стало Європейське Співтовариство, яке прийняло міжнародні угоди, що визначили вимоги до національних законодавств, які спрямовані на запобігання промисловим аваріям. Оскільки українське суспільство прямує у напрямку входження до складу ЄС, то нормативно-правові акти, стандарти та напрямки діяльності у сфері забезпечення безаварійної експлуатації потенційно небезпечних об'єктів повинні відповідати прийняттю у Європі. Деякі кроки у цьому напрямку уже зроблено. Зокрема у 2001 р. прийнято Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки», який передбачає систематичне виконання процедур із виявлення головних небезпек і оцінку вагомості і ймовірності виникнення цих небезпек на підприємствах [1].

Важливе місце у виявленні небезпек і оцінці їх вагомості посідає технічна діагностика.

Взагалі, є класичне визначення технічної діагностики, а саме: технічна діагностика — галузь науки і техніки, яка займається встановленням та визначенням ознак, що характеризують стан технічних систем для передбачення можливих відхилень, у тому числі і за межі допуску, внаслідок чого і відбуваються відмови, а також розроблення методів та засобів визначення фактичного фізичного (технічного) стану цих систем з метою своєчасного попередження порушення режиму роботи [2].

Технічна діагностика є одним з ефективних інструментів забезпечення експлуатаційної надійності об'єктів довготривалої експлуатації, а тех-

нічне діагностування уже давно набуло статусу штатної технологічної операції.

Аналізу стану технічної діагностики, проблем, що виникають під час її проведення, присвячено багато публікацій. Зокрема, це стаття академіка Б. Є. Патона та професора А. Я. Недосеки «15 лет спустя» [3].

Наш досвід організації та виконання робіт з технічної діагностики показав, що в даному питанні є ряд неузгодженостей, недоробок та протиріч, які у багатьох випадках знижують ефективність, спеціалізацію та удосконалення цієї надзвичайно важливої та відповідальної роботи.

Пропонуємо розглянути деякі питання технічної діагностики, а саме: термінологія, методичне забезпечення, підготовка та сертифікація фахівців.

Термінологія у сфері технічного діагностування. У табл. 1 наведено основні терміни у сфері технічного діагностування, що нормуються відповідними стандартами ДСТУ, ISO, ГОСТ та іншими нормативно-правовими актами.

Аналізуючи наведене в таблиці, бачимо, що в європейських стандартах відсутній термін «технічне діагностування». У міжнародному стандарті ISO 13372:2004 введена наступна термінологія:

моніторинг стану — виявлення та збирання інформації і даних, що вказують на стан машин;

діагностика — дослідження симптомів та синдромів з метою визначення пошкоджень або відмов (вид, ситуація, обсяг);

прогнозування — аналіз симптомів пошкоджень з метою передбачення майбутнього стану та залишкового ресурсу експлуатації.

Додаткова суперечність у термінах стосується і того, що «технічна діагностика» у світовій практиці стосується машин та агрегатів (механічних систем), а не металоконструкцій, їх елементів чи комбінацій, як це прийнято у нас останнім часом. Технічний стан металоконструкцій визначається методами і засобами неруйнівного контролю.

Окрім того, нормативний акт НПАОП 0.00-6.18-04 всупереч ДСТУ 2389-94 вводить нові поняття: експертне обстеження та технічний огляд [5].

Термінологія у сфері технічного діагностування

Нормативні документи	ДСТУ 2389-94/ГОСТ 20911-899 [4] Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення (Техническая диагностика. Термины и определения)	НПАОП 0.00-6.18-04 [5] Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки	ISO 13372:2004 [6] Моніторинг стану та технічна діагностика машин (словник)
Технічне діагностування	Визначення технічного стану об'єкта з означеною (заданою) точністю. <i>Примітка.</i> Завданнями ТД є: контроль технічного стану; пошук місця та визначення причин відмови; прогнозування технічного стану	Експертне обстеження (технічне діагностування) — комплекс робіт з визначення технічного стану Технічний огляд — комплекс робіт з контролю технічного стану, що здійснюється	—

Таким чином, необгрунтовано проходить підміна понять «технічна діагностика, неруйнівний контроль», що ускладнює в подальшому розроблення нормативних документів та формування вимог до фахівців, які здійснюють ці процедури. Вважаємо, що таке вільне застосування термінів, що суперечить основному стандарту, є недопустимим. Воно вносить суперечки під час виконання завдань різними суб'єктами господарювання.

На нашу думку термін «технічне діагностування» потрібно замінити на термін «моніторинг технічного стану» відповідно до ISO 13372:2004.

Виходячи зі сказаного вище, необхідно Держспоживстандарту України, ТК 78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» разом із Держгірпромнаглядом України прийти до єдиної термінології з технічної діагностики відповідно до вимог міжнародних стандартів та європейського досвіду.

Методичне забезпечення. Аналізуючи методичне забезпечення робіт технічного діагностування необхідно відзначити наступне:

1. Незначну кількість (не більше 25) нормативних документів (ДСТУ, СОУ, РД, ГОСТ), розроблених в Україні та Росії з технічного діагностування. А за відсутності (як відомо) таких документів результати технічного діагностування є нелегітимними.

Нами зроблено аналіз 20 нормативних документів (ДСТУ 2389-94, ДСТУ-НБВ.2.3-21:2008, ДСТУ 4227-2003, ДСТК 4046-2001, ДСТУ 4223-2003, НПАОП 0.00-6.18-04, ГСТУ 320.02829777.014-99, СОУ 11.2-30019775-044:2005, СТП 320.00135390.066-2002, СТП 320.00135390.069-2002, СТП 320.00135390.070-2002, СТП 320.00135390.071-2002, СТП 50.03-2000, ISO 13372:2004, ISO 18436:2004, ГОСТ 20911-89, РД153-112-017-97, РД12-411-01, РД 153-39.4P-124-02). У трьох із них викладені загальні технічні умови. У більшості нормативних документів наводяться методи та методики контролю параметрів устаткування, що впливають на його працездатність та експлуатаційну надійність. Практично ці нормативні документи можна віднести до нормативних документів з неруйнівного контролю.

2. Неадекватність вимог нормативних документів можливостям сучасного приладобудування та технічному забезпеченню служб, які здійснюють технічне діагностування.

У більшості стандартів наголошується на необхідності контролю таких параметрів: товщина стінки, межа міцності, межа плинності, ударна в'язкість, типи і розміри дефектів типу несцільності, швидкість корозії, напружено-деформований стан, швидкість росту тріщин, зміна структури металу, величина вібрації, стан ізоляційного покриття. У той же час світова практика вказує на те, що для розрахунку залишкового ресурсу, наприклад, магістрального трубопроводу, необхідно врахувати, як мінімум, 34-37 параметрів [7].

Практика показує, що, як правило, під час проведення неруйнівного контролю металоконструкцій існуючі засоби дають змогу здійснити вимірювання трьох-чотирьох параметрів:

товщини стінки, твердості поверхневого шару, наявності дефектів типу порушення суцільності матеріалу, інколи вказують напружено-деформований стан, значення вібрації.

3. У більшості документів не визначені бракувальні критерії та не встановлені граничні значення параметрів технічного стану об'єкта для визначення його виду (справний, несправний, працездатний тощо).

4. Складність, а в деяких випадках і неможливість виконання процедури «прогнозування залишкового ресурсу». У проаналізованих документах лише робиться висновок, що за результатами контролю проводиться розрахунок залишкового ресурсу, однак самі методики розрахунку залишкового ресурсу не приводяться.

Окрім того, процедура проведення розрахунку залишкового ресурсу в багатьох випадках не під силу за своєю складністю та відповідальністю фахівцям з неруйнівного контролю, які, як правило, мають освіту за напрямком «приладобудування». Таким чином, для належної організації методичного забезпечення робіт із технічного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки вважаємо за доцільне:

1. Активізувати роботу з розроблення нових нормативних документів та провести актуалізацію

діючих нормативних документів, що стосуються технічної діагностики.

2. Процедуру «прогнозування технічного стану» виключити з існуючих нормативних документів щодо технічного діагностування і звернутися з проханням до Інституту проблем міцності ім. В. Бакуля НАН України про розроблення разом із усіма зацікавленими організаціями та фахівцями типових (чи коректування існуючих) методик прогнозування залишкового ресурсу обладнання, конструкцій та інженерних споруд.

3. Просити Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України разом із компетентними організаціями, технічними комітетами стандартизації розробити регламент (сформулювати вимоги) до виду та обсягу параметрів, які необхідно контролювати в ході проведення технічної діагностики різних об'єктів і методики їх визначення.

4. Звернутись до Держгірпромнагляду України з рекомендаціями про проведення узгодженої політики у сфері термінологічного, методичного та кадрового забезпечення в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Підготовка та сертифікація фахівців. У цьому напрямку діяльності є також багато неузгодженостей.

У той час, як підготовка та сертифікація фахівців з неруйнівного контролю врегульовані ДСТУ EN 473:2001 [8] та НПАОП 0.00-1.27-97 [9], підготовка та сертифікація фахівців з технічного діагностування, практично, не врегульована.

У ДСТУ EN 473:2001 (п.5.3.2) вказано, що фахівці II та III рівнів уповноважені до «виконання робіт з інтерпретації, оцінювання результатів відповідно до застосовуваних стандартів, норм чи технічних умов». Проте, згідно з НПАОП 0.00-1.27-97 (п.5.4.3 та п.5.6.7), фахівці з неруйнівного контролю II та III рівнів кваліфікації мають право робити остаточні висновки про якість та технічний стан об'єкта.

Відомо, що поняття «інтерпретація та оцінювання результатів контролю» та поняття «висновок про якість та технічний стан об'єкта» далеко не тотожні.

У той же час, всупереч цьому, наказом Держгірпромнагляду України від 20.12.2006 р. № 16 затверджений і введений в дію НПАОП 0.00-6.08-07 «Порядок атестації фахівців, які мають право проводити технічний огляд та/або експертне обстеження устаткування підвищеної небезпеки» [10]. Відповідно до цього нормативного документа здійснювати технічне діагностування об'єктів має тільки експерт технічний з промислової безпеки. Підготовку експертів технічних даних документ закріплює виключно за ДП «Головний навчально-методичний центр Держгірпромнагляду України».

Це явний факт галузевого протекціонізму та пряме порушення вимог антимонопольного законодавства. Окрім того, нами зроблено аналіз програми навчання експертів технічних, що отримують посвідчення на право проведення технічного огляду та/або експертного обстеження обладнання нафтогазовидобувної промисловості. Проведено також опитування експертів технічних.

Навчальна програма таких експертів становить 176 год, з них тільки модулі № 14, 17 та 18 повинні забезпечити належну підготовку експертів із проведення технічного огляду (експертного обстеження), а це 20 год (8 лекційні, 12 практичні та семінарські). Очевидно, що підготовка таких експертів бажає бути тільки кращою і вони мали б проходити процедуру сертифікації, як це було прийнято в цілому світі. У даному центрі відсутня належна навчально-лабораторна база та штатні викладачі [11]. Така система підготовки експертів не відповідає складності та відповідальності завдань, що стоять перед технічними експертами, і навіть, у грубому порівнянні, значно відстає від підготовки фахівців з неруйнівного контролю II та III рівнів.

Ситуацію необхідно виправляти. Перша спроба створення системи підготовки та сертифікації фахівців із технічного діагностування була зроблена в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. Ще у 2000 р. було розроблено СТП 50-03-2000 «Технічна діагностика. Вимоги до персоналу та порядок його акредитації». Однак через певні обставини хороша ініціатива не знайшла продовження.

Щодо світового досвіду у цій галузі, то Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) закінчує розробку серії стандартів ISO18436 «Умови проведення технічного діагностування та моніторингу машин. Вимоги до навчання та сертифікації персоналу». Загалом за даним напрямком розроблено понад 15 нормативних документів, основними серед яких є:

ISO 18436-1:2004. Моніторинг стану та діагностика машин. Вимоги до навчання та сертифікації персоналу. — Частина 1: Вимоги до сертифікуючого органу та процесу сертифікації.

ISO18436-2:2003. Моніторинг стану та діагностика машин. Вимоги до навчання та сертифікації персоналу. — Частина 2: Моніторинг стану вібрації та діагностика.

ISO 18436-3:2008. Моніторинг стану та діагностика машин. Вимоги до кваліфікації та атестації персоналу. — Частина 3: Вимоги до навчального персоналу та навчальних процедур.

ISO 18436-6:2008. Моніторинг стану та діагностика машин. Вимоги щодо кваліфікації та атестації працівників. — Частина 6: Акустична емісія.

ISO 18436-7:2008. Моніторинг стану та діагностика машин. Вимоги щодо кваліфікації та атестації працівників. — Частина 7: Термографія.

ISO 13372:2004. Моніторинг стану та діагностика машин. Терміни та визначення.

Практично підготовка та сертифікація фахівців із технічного діагностування та моніторингу машин (ТД і ММ) за цими стандартами не відрізняється від підготовки та сертифікації фахівців із неруйнівного контролю.

Вважаємо за доцільне створити вітчизняну систему підготовки та сертифікації фахівців із ТД і ММ за аналогом із системою сертифікації фахівців із НК, взявши за основу вказані вище стандарти серії ISO з підготовки фахівців з технічної діагностики. При цьому необхідно ліквідувати монополію однієї організації на право проведення цих робіт. ІФНТУНГ готовий ввійти в цю систему. Це справа ближчої перспективи.

На даний час вважаємо актуальним організувати роботу центру навчання та атестації фахівців із технічного діагностування нафтогазопромислового устаткування та нафтогазопроводів на базі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу із залученням фахівців Держгірпромнагляду. Для здійснення цієї роботи університет має досвід, кваліфіковані кадри, спеціалізовані навчальні лабораторії, оснащені сучасними зразками нафтогазопромислового устаткування та апаратурою для технічного діагностування, навчально-науковий полігон моніторингу за станом підземних трубопроводів та електрокабелів для транспортування енергоносіїв (газ, нафта, електроенергії тощо).

В університеті функціонують кафедри «Технічної діагностики та моніторингу» і «Прилади та методи контролю якості».

Розроблені навчальні програми, матеріали з тестового контролю знань і відповідні завдання з розрахункових контрольних робіт для підготовки фахівців за спеціалізацією 7.092301 «Технічна діагностика металоконструкцій».

Окрім того, на різних кафедрах університету працюють висококваліфіковані вчені з питань проблем міцності та конструювання нафтогазопромислового устаткування.

У бібліотеці університету наявна відповідна технічна література та нормативна база. Зокрема у 2007 р. вийшли з друку два навчальні посібники з грифом МОН України, авторами яких є вчені університету:

Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання. — Івано-Франківськ: Факел, 2007. — 272 с.

Технічна діагностика систем нафтогазопостачання. — Івано-Франківськ: Факел, 2007. — 341 с.

Таким чином, фахівці, які пройдуть підготовку та атестацію у створюваному центрі будуть мати ґрунтовні знання із конструктивних особливостей нафтогазопромислового устаткування та нафтогазопроводів, теорії міцності, неруйнівного та руйнівного контролю, а також інженерними розрахунками та нормативною базою, що використовується під час технічного діагностування (експертного обстеження).

Аналогічні центри за галузевою ознакою необхідно створити в інших навчальних закладах та спеціалізованих організаціях, що мають необхідні кадри, методичне та технічне забезпечення.

Підводячи підсумок, необхідно сказати, що в галузі технічної діагностики є багато проблемних питань. Вони стосуються як термінології, так і методичного та кадрового забезпечення. Ці питання необхідно вирішувати. До вирішення повинні залучитися органи державної влади, академічні, галузеві, наукові інституції та технічні комітети зі стандартизації.

Сделан анализ нормативной документации, касающейся терминологии, методического и кадрового обеспечения в сфере технической диагностики. Выделены проблемные вопросы и предложены пути их устранения.

1. Закон України від 18.01.2001 р. № 2245-III «Про об'єкти підвищеної безпеки».
2. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідниковий посібник у 10 томах / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Київ: Наук. думка, 1988. — Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / Під заг. ред. В. І. Похмурського, С. І. Крижанівського. — Львів-Івано-Франківськ, 2006.*
3. *15 лет спустя* (по материалам статьи Б. Е. Патона и А. Я. Недосеки «Концепция технической диагностики трубопроводного транспорта» в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», № 3 за 1992 г.) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 3. — С. 3–10.
4. *ДСТУ 2389–94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення.*
5. *НПАОП 0.00-6.18–04. Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної безпеки.*
6. *ISO 13372:2004. Моніторинг стану та діагностика машин. Словник.*
7. *Системная надежность трубопроводного транспорта углеводородов / Под ред. В. Д. Черняева. — М.: Недра, 1997. — 517 с.*
8. *ДСТУ EN 473:2001. Неруйнівний контроль. Класифікація і сертифікація персоналу в галузі неруйнівного контролю. Основні вимоги.*
9. *НПАОП 0.00-1.27–97. Правила атестації фахівців з неруйнівного контролю.*
10. *НПАОП 0.00-6.08–07. Порядок атестації фахівців, які мають право проводити технічний огляд та/або експертне обстеження устаткування підвищеної безпеки.*
11. *Навчальна програма з підготовки експертів технічних з питань промислової безпеки / ДП «Головний навчально-методичний центр» Держгірпромнагляду України.*



10-Я ЮБИЛЕЙНАЯ ЕВРОПЕЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ВЫСТАВКА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

7–11 июня 2010 г. в Москве прошла 10-я Юбилейная Европейская конференция по неразрушающему контролю (10 ЕКНК). Конференция собрала рекордное за все время проведения подобных форумов количество стран-участниц — в Москву приехали представители 65 государств. Общее количество зарегистрированных участников составило 1021 человек, участников конференции и выставки 1230 человек.

Москва получила право проведения 10-й ЕКНК в результате конкурса, проводимого на очередной сессии EFNDT в 2005 г. в Вене. Президентом 10 ЕКНК был утвержден В. В. Ключев, академик РАН, президент Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике. Научный комитет был сформирован из представителей 43-х стран, в него вошли 153 чел. — известные ученые и руководители национальных обществ неразрушающего контроля.

В соответствии с программой 10-й ЕКНК состоялись следующие мероприятия.

1. Пленарное заседание (Plenary Session), на котором были представлены 6 докладов:

- Nanotechnologies and nanodiagnosics (Нанотехнологии и нанодиагностика). Президент 10-й ЕКНК, академик РАН Klyuev V. V. (Russia)
- EFNDT Positioning in European quality infrastructure (Позиционирование EFNDT в Европейской инфраструктуре качества). Профессор Krstelj V. (Croatia)
- Diagnostics of object state and monitoring of risks during implementation of large-scale projects (Диагностика состояния объектов и мониторинг рисков крупномасштабных проектов). Член-корр. РАН Makhutov N. A. (Russia)
- ICNDT Activities in the field of international NDT certification (Деятельность ICNDT в сфере международной сертификации персонала НК). Президент ICNDT, докт. Farley M. (United Kingdom)
- Prospects of mobile computed tomography (Перспективы мобильной компьютерной томографии). Докт., проф. Ewert U. (Germany)
- Thermal non-destructive testing: short history, state-of-the-art and trends (Термографический неразрушающий контроль: краткая история, современность и тенденции), докт, проф. Vavilov V. P. (Russia)

2. Заседания в 25 секциях, на которых было представлено 703 доклада, посвященные различным методам, направлениям и проблемам в обла-

сти неразрушающего и контроля и технической диагностики (НК и ТД).

3. Генеральная ассамблея Европейской Федерации по НК (EFNDT General assembly). На Ассамблее были проведены выборы новых членов совета директоров, представлен отчет Совета Директоров EFNDT, утвержден обновленный Устав EFNDT.

4. Генеральная ассамблея международного комитета по НК (ICNDT General Assembly) проходила под председательством Президента ICNDT докт. М. Фарлея. На Ассамблее были рассмотрены следующие вопросы: отчет о работе ICNDT за 2009 г., согласование оперативных процедур ICNDT, обсуждение членских взносов, бюджет на 2010 — 2011 гг., вручение сертификатов новым членам, промежуточный отчет о подготовке к 18-й Всемирной конференции по НК (18th WCNDT), отчеты Региональных групп: Asia Pacific, Pan-America, Europe, Africa, отчеты ассоциативных организаций: ISO, IAEA и IIW.

5. Заседание Совета директоров Европейской Федерации по НК (EFNDT BoD meeting). Собрание посвящено 10 ЕКНК, обсуждению стратегического плана, финансового отчета, бюджета 2010 — 2011 гг., доработке оперативных процедур EFNDT, вступлению новых членов, а также планированию следующего собрания, которое было предложено провести в Киеве (Украина).

6. Два заседания Международной академии по НК (Academia NDT International) под председательством Президента академии докт. Дж. Нардони, в которых приняли участие 25 действительных членов академии из 17 стран мира. В академию избрано 7 новых действительных членов и 2 почетных. Общее число членов академии НК составило 44 академика из 21 страны мира. Было принято решение в ближайшие 2-3 года довести численность академии до 100 членов, при этом важно расширять географию представительства различных стран.

7. Заседание исполнительного комитета Международного комитета по НК (ICNDT Executive committee meeting). На заседании были рассмотрены документы для обсуждения на генеральной ассамблее ICNDT, ключевые вопросы в работе WG1 и WG3, а также вступление новых членов из центрально-азиатского региона.

8. Форум по квалификации, сертификации и аккредитации (Forum on qualification,



certification and accreditation). Участники форума, представлявшие более 20 стран, обсудили последние изменения в стандартах ИСО 9712 и EN 473, и внесли предложение объединить требования этих стандартов и создать единый стандарт по сертификации персонала неразрушающего контроля.

9. Встреча EFNDT и Американского общества по НК (EFNDT-ASNT meeting). Совместная встреча была посвящена особенностям функционирования Американского комитета по неразрушающему контролю, были освещены вопросы обучения и сертификации персонала неразрушающего контроля в США, в частности новой инновационной программы, направленной на вовлечение и поддержку молодых специалистов.

10. Заседания ИСО ТК 135 «Неразрушающий контроль», в которых участвовало более 60 участников из 20 стран мира.

В рамках Конференции прошла Выставка средств неразрушающего контроля, в которой на 151 стенде приняли участие более 190 компаний из 16 стран и 32 национальных общества по НК.

Выставка 10-й ЕКНК в Москве стала самой представительной за всю историю международных конференций, расположившись на площади в 6,5 тыс. кв м. Посетителями Выставки стали более 5000 профессионалов-практиков из России и зарубежных стран. В рамках выставки прошел конкурс инноваций под председательством д-р. М. Дугласа (Канада).

Дипломы 10-й ЕКНК присуждены 6 инновационным разработкам:

- Малогабаритный бетатрон на энергию 2,5 МэВ для работы в полевых условиях (ГОУ ВПО Томский политехнический университет НИИ Интроскопии)
- ACOUSTIC EYE – система неразрушающего контроля внутреннего состояния труб теплообменников, парогенераторов и других промышленных объектов, имеющих в своем составе трубы небольшого диаметра (ООО МНПО «Спектр»)
- «ВИСТКОН» — автоматизированный стенд вихретокового контроля колец подшипников (UNITEST GROUP)
- Магнотриксционные генераторы волноводных волн повышенной мощности (Southwest Research Institute)
- «ШИЛО» — автоматизированная установка контроля кольцевых сварных швов в системе труба–трубная доска (Лаборатория ТСНК)
- АВГУР-Т — система для внешнего и внутреннего АУЗК сварных соединений и основного ме-

талла трубопроводов и тройников сварных с накладками (ООО «НПЦ «ЭХО+»)

В специально оборудованном зале было представлено 16 презентаций новейшего оборудования ведущими производителями мира. Представила интерес презентация Гарри Пасси (Компания «Sonotron NDT») «Ультразвуковой контроль с применением фазированных решеток. Визуализация результатов в соответствии с реальными геометрическими размерами и формой объекта контроля», а также УЗ дефектоскоп на фазированных решетках «ISONIC 2009».

В рамках выставки прошел конкурс среди компаний-экспонентов на «Лучший стенд ЕКНК 2010». Ими стали стенды компаний: • OLYMPUS; • ООО МНПО «Спектр»; • General Electric; • South African Institute for NDT (в номинации «Лучший стенд Национального Общества по НК»).

9 июня состоялся торжественный гала-ужин. Более 1000 участников и гостей приветствовали Президент 10-ой ЕКНК и РОНКТД академик В.Клюев, Президент EFNDT проф. В. Крстели, Президент ICNDT М. Фарлей, Президент международной академии НК докт. Дж. Нардони, Президенты Канадского, Китайского, Узбекского, Южноафриканского, Чешского Обществ НК и многие другие.

В рамках развлекательной программы выступили звезды российской эстрады: оркестр имени О. Лундстрема, фольклорный театр Людмилы Рюминой, дуэт «Баян-микс», Хор Турецкого.

На торжественном заседании, посвященном закрытию 10-й Юбилейной европейской конференции по неразрушающему контролю были подведены итоги работы конференции и представлены следующие страны-организаторы международных конференций — 18-й Международной конференции в ЮАР в 2012 и 11-ой Европейской конференции в Чехии в 2014 г.

Генеральный спонсор 10-й ЕКНК — ООО МНПО «Спектр».

Полный отчет о работе Конференции с изложением основных итогов работы секций и совещаний будет опубликован в журнале «Контроль и Диагностика» в августе 2010 года. Следующая встреча лидеров отрасли неразрушающего контроля состоится с 22 по 24 марта 2011 г. в Москве в СК «Олимпийский» на выставке «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности».

*Генеральный директор МНПО «Спектр»,
руководитель секретариата 10-й ЕКНК,
С. В. Клюев, канд. техн. наук*



П'ЯТНАДЦЯТА МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЛЕОТЕСТ-2010» В СЛАВСЬКУ

Традиційно в лютому спеціалісти з неруйнівного контролю збираються в засніжених Карпатах у відомому гірськолижному центрі Славське Львівської області. Цього року чергова міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2010. Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» проходила з 15 по 20 лютого.

Організаторами цієї щорічної конференції виступили Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД), Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України (ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ, м. Львів), Івано-Франківський національний університет нафти і газу (ІФНТУНГ), Науково-виробнича фірма «Ультракон-Сервіс», Київ, НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», Харків, і Центр «Леотест-Медіум», Львів (організаційне бюро конференції).

Відкрили конференцію голова Оргкомітету, член Правління і голова Західного відділення УТ НКТД, директор центру «Леотест-Медіум», канд. техн. наук Учанін В.М., заступник голови УТ НКТД, проректор ІФНТУНГ, докт.тех.наук, проф. Карпаш О.М. і член правління УТ НКТД, науковий співробітник ІЕЗ ім. Є.О. Патона Посипайко Ю.М.

Як і щороку, найбільшу кількість доповідей винесли на суд колег науковці ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ:

А.Я. Тетерко, В.І. Гутник, В.О. Нічога, І.В. Сторож, Л.В. Ващишин, П.Б. Дуб, В.М. Іванчук, О.А. Ніца, В.О. Нічога, Ю.М. Романишин, В.Г. Рибачук, С.М. Землянський, В.В. Кошовий, І.М. Романишин, Р.І. Романишин, Р.В. Шарамга.

Жвавий інтерес та цікаву дискусію викликали доповіді гостей з Канади та Чехії: *Einav (STAR.IK Ltd, Ontario, Canada); М. Нойберт, В. Величко (VVV Most, spol. s r.o., Východ, spol. s r.o., м. Мост, Чеська Республіка).*

Цікаві доповіді зробили науковці ряду провідних установ та підприємств України: *В.Я. Дереча, В.А. Кудерський, О.А. Гільова (АНТК ім. О.К. Антонова, Київ); А.А. Смоліна, А.А. Погорелов (УкрНИИ технології машинобудування, Днепропетровськ); С.В. Сьомочкін, А.О. Логінов, В.Н. Учанін, Ю.Д. Танчін (Авіакомпанія «Международные авиалинии Украины», ФМІ ім.*

Г.В. Карпенка); З.А. Берник, Я.Р. Корчак, В.М. Учанін (НВЦ «Техдіагаз», ФМІ ім. Г.В. Карпенка); А.А. Погорелов, М.Н. Новотний, А.В. Барсукова, Е.В. Дзигін (УкрНИИ технології машинобудування, Днепропетровськ); В.А. Михайловський (ЦКБ арматуробудування, Київ).

Багато доповідей цього року представили науковці університетів України: *А. Снарський, М. Женіровський (НТУУ «КПІ», Ін-т теоретичної фізики ім. Н.Н. Боголюбова); С.К. Фомічев, С.Н. Мінаков, М.А. Яременко (НТУУ «КПІ»); М.О. Карпаш, Т.Т. Котурбаши (ІФНТУНГ); Д.В. Ланде, А.А. Снарський (Інформаційний центр «ЭЛВИСТИ», НТУУ «КПІ»); І.М. Бучма, Т.М. Репетило (НУ «Львівська політехніка»); О.М. Карпаш, С.Р. Доценко, М.О. Карпаш, І.Я. Дарвай, А.В. Яворський, І.В. Рибіцький (ІФНТУНГ); Т.В. Победа, В.В. Мірошніков, С.В. Андриухін (Східноукраїнський нац. ун-т ім. В. Даля, г. Луганськ); А.Ю. Орлович, С.В. Серебренников, О.І. Сіріков (НТУ, Кіровоград); С.В. Серебренников, А.О. Корогвін, І.В. Флакей (НТУ, Кіровоград);*

Тези доповідей конференції та ряду інших наукових праць видані окремою збіркою.

В холі конференц-залу проходила виставка засобів НК та ТД. В ній брали участь: НВФ «Ультракон-Сервіс», НВФ «Промприлад», НВФ «Інтрон-СЕТ», STAR.IK Ltd, Ontario, Canada, Центр «Леотест-Медіум».

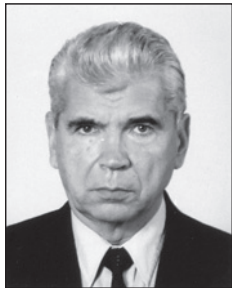
Конференція пройшла в діловій та доброзичливій атмосфері. Її учасники мали досить часу для плідних дискусій та відпочинку. Проживали учасники конференції в пансіонаті «Бойківщина», що розташований на околиці Славська в оточенні багаторічних сосен, ялин та смерек, поблизу гірськолижних трас. Частина дня її учасники могли присвятити відпочинку на гірських лижах на схилах гір Тростян, Кремень, Погар та Високий Верх (див. сайт www.trostian.com). Вперше цього року любителі лиж відвідали новозбудований гірськолижний центр „Плай” біля с. Плав'є на автотрасі Львів — Чоп.

Організатори конференції чекають на Вас в наступному році.

Оргкомітет: тел./факс: (0322) 75-08-69.

E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua
abo_leotest@org.lviv.net

Ю.М. Посипайко, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ



С. И. Кучуку-Яценко — 80

2 августа 2010 г. исполнилось 80 лет со дня рождения первого заместителя директора Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, академика НАН Украины **Сергея Ивановича Кучуку-Яценко**.

Сергей Иванович после окончания Киевского политехнического института был направлен на работу в ИЭС им. Е.О. Патона.

В 1960 г. С. И. Кучук-Яценко защитил кандидатскую, а в 1972 г. — докторскую диссертации. В 1978 г. был избран член-корреспондентом, а в 1987 г. — действительным членом Национальной академии наук Украины.

Основная научная деятельность С. И. Кучуку-Яценко связана с исследованиями физико-металлургических процессов при сварке различных материалов в твердой фазе. В частности, им получены новые данные об особенностях формирования соединений с образованием тонкого слоя расплава на контактирующих поверхностях свариваемых деталей, его поведении под действием электродинамических сил и особенностях его взаимодействия с газовой средой в зоне контакта.

Впервые было показано, что состояние расплава в период, предшествующий деформации свариваемых деталей, оказывает доминирующее влияние на образование металлических связей между контактирующими поверхностями и формирование химической неоднородности в зоне соединения.

Детально изучено влияние оксидных структур в расплаве на качество соединений и определены пути минимизации окислительных процессов в указанный период сварки, в том числе обнаружение их с помощью ультразвукового контроля.

Практическим результатом перечисленных фундаментальных исследований является разработка С. И. Кучуком-Яценко новых способов контактной сварки непрерывным, импульсным, пульсирующим оплавлением и контроля их качества. Эти преимущества наиболее значимы при сварке деталей сложной конфигурации с большими поперечными сечениями.

Сергей Иванович проводит исследования контактной сварки сопротивлением деталей из трудносвариваемых сплавов, композиционных материалов с использованием активирующих покрытий и специальных прослоек, имеющих композиционную структуру, в том числе состоящих из многослойных наноструктурированных материалов.

Научная и инженерная деятельность Сергея Ивановича характеризуется комплексным подходом к решению поставленных задач. Выполненные им фундаментальные исследования сопровождаются разработкой оригинальных технологий сварки, автоматического и в последние годы компьютеризированного управления процессом сварки и созданием современного сварочного оборудования.

Разработки С. И. Кучуку-Яценко и его сотрудни-

ков успешно использованы на машиностроительных заводах при изготовлении кольцевых заготовок, валов и заготовок из разнородных материалов. Особенно эффективным оказалось применение многопозиционной контактной сварки, позволяющей сваривать крупногабаритные детали одновременно в нескольких местах (корпуса двигателей, радиаторы мощных трансформаторов).

Впервые в мировой практике С. И. Кучуком-Яценко с группой сотрудников была разработана оригинальная технология контактной сварки и контроля качества изделий сложной формы и большого сечения из высокопрочных сплавов на основе алюминия, обеспечивающая получение соединений практически равнопрочных с основным металлом.

На ее основе разработано и освоено производство уникального оборудования, которое используется при производстве космической техники на заводах Украины и РФ. В 1986 г. в составе авторского коллектива удостоен Государственной премии СССР за создание технологии и оборудования для контактной стыковой сварки конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов.

Значительный вклад С. И. Кучук-Яценко внес в создание технологии и оборудования для контактной стыковой сварки трубопроводов различного назначения. При его активном участии разработаны технологии, системы управления и оборудование для контактной стыковой сварки труб диаметром от 60 до 1400 мм и выполнено его широкомасштабное внедрение при строительстве трубопроводов: сварено более 70 тыс. км различных трубопроводов, в том числе 4 тыс. км самых мощных трубопроводов в районах Крайнего Севера. Эта работа была отмечена Ленинской премией в 1989 г.

С. И. Кучук-Яценко — автор шестисот сорока научных публикаций, в том числе девяти монографий, 350 авторских свидетельств. Им получено более 300 украинских и зарубежных патентов, многие из которых приобретены по лицензионным соглашениям зарубежными фирмами.

В настоящее время академик С. И. Кучук-Яценко продолжает заниматься актуальными проблемами в области сварки, созданием прогрессивных технологий соединения трудносвариваемых материалов. Он возглавляет один из ведущих научных отделов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, он был избран первым президентом Общества сварщиков Украины, входит в состав его правления, является членом Общества сварщиков США и Великобритании.

Заслуги ученого отмечены орденом Князя Ярослава Мудрого, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом Знак Почета, медалями.

Сердечно поздравляем Сергея Ивановича с юбилеем, желаем новых творческих свершений и здоровья.

*Дирекция и сотрудники ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ
Правление Украинского общества НКТД
Редколлегия и редакция журнала «ТДиНК»*



Л. М. Лобанову — 70

В сентябре 2010 г. исполнится 70 лет доктору технических наук, профессору, академику НАН Украины, заслуженному деятелю науки и техники Украины, лауреату Премии Совета Министров СССР, Государственной премии Украины, Пре-

мии им. Е. О. Патона НАНУ, известному ученому в области материаловедения и прочности материалов и конструкций **Леониду Михайловичу Лобанову**.

Л. М. Лобанов окончил факультет промышленного и гражданского строительства Киевского инженерно-строительного института и механико-математический факультет Киевского государственного университета. С 1963 г. работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, с 1985 г. — заместитель директора института по научной работе и заведующий отделом оптимизации сварных конструкций новой техники. С 1984 г. — доктор технических наук, профессор, в 1997 г. избран академиком НАН Украины,

Научная деятельность Л. М. Лобанова связана с исследованиями поведения материалов при сварке, разработкой экспериментальных методов исследования и регулирования сварочных напряжений и деформаций, созданием высокоэффективных сварных конструкций и разработкой методов и средств их диагностики.

Широкое признание получили его разработки методов оптического моделирования, голографической интерферометрии, электронной спекл-интерферометрии и ширрографии для исследования напряженного состояния и контроля качества сварных соединений в конструкциях из металлических, композиционных и полимерных материалов. Разработанные методологические подходы и созданные приборы имеют высокую точность и информативность, применяются в научно-исследовательских организациях и предприятиях Украины, стран СНГ, Китая, Южной Кореи.

Л. М. Лобановым и его учениками сформировано новое научное направление — бездеформационная сварка конструкций, которая базируется на регулировании тепловых процессов во время сварки с целью уменьшения тепловложения и создании предварительно напряженно-деформированных состояний, оптимизированных по отношению к сварочным напряжениям и деформациям. Разработанные способы и технические средства устранения сварочных деформаций и напряжений были использованы при создании комплекса «Энергия-Буря» и других ракетно-космических систем. Принципиально новыми являются разработанные технологии бездеформационной сварки стрингерных панелей и оболочек из высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов.

Под руководством Л. М. Лобанова в ИЭС им. Е. О. Патона выполняется комплекс фундаментальных исследований в области статической и динамической прочности сварных соединений с учетом их механической неоднородности и наличия трещиноподобных дефектов, сопротивления сварных соединений хрупким

и слоистым разрушениям, а также усталостным разрушениям, научных подходов для обеспечения надежности и долговечности сварных конструкций при соблюдении требований относительно снижения их металлоемкости, методов неразрушающего контроля качества и диагностики сварных соединений и конструкций, оценки и продления ресурса сварных конструкций ответственного назначения. Созданы новые типы высокоэффективных сварных конструкций, к которым относятся легкие стрингерные металлоконструкции, пролеты мостов, тяжело нагруженные конструкции из высокопрочных сталей, уникальные конструкции преобразуемого объема. При его активном участии разработаны и введены в практику Государственные стандарты Украины, которые регламентируют требования к качеству сварных конструкций и технологии их изготовления, организовано систему сертификации сварочных технологий, материалов, оборудования и конструкций, разработана концепция Государственной программы по обеспечению технологической безопасности для основных отраслей экономики Украины.

Л. М. Лобанов принимал активное участие в создании трехтомного издания «Сварные строительные конструкции», в котором обобщен опыт по исследованию и разработке в области проектирования и изготовления конструкций, определения их технического состояния и реконструкции.

Леонид Михайлович ведет большую научно-организационную работу как председатель Украинского технического комитета по стандартизации в области сварки, заместитель председателя Межгосударственного научно-технического совета по сварке и родственным технологиям, член Межведомственного совета по вопросам научно-технологической безопасности при Совете Национальной безопасности и обороны Украины, заместитель председателя научного совета по целевой комплексной программе НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин». Он активно сотрудничает с международными научными организациями стран СНГ и дальнего зарубежья, регулярно выступает с научными докладами на престижных научных форумах, возглавляет ряд международных проектов.

Л. М. Лобанов — автор более 600 научных работ, в том числе 6 монографий, 60 авторских свидетельств и патентов. Подготовил 8 докторов и 15 кандидатов наук.

Награжден орденами «За заслуги» II и III степеней и «Знак Почета», знаком отличия Президиума НАН Украины «За научные достижения», медалью Ю. В. Кондратюка за участие в космической деятельности и многими другими медалями и знаками отличия.

Сердечно поздравляем Леонида Михайловича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, творческого долголетия и талантливых учеников!

*Дирекция и сотрудники ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ
Правление Украинского общества НКТД
Редколлегия и редакция журнала «ТДиНК»*

ПОДПИСКА — 2011 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	160 грн.	320 грн.	700 руб.	1400 руб.	26 дол. США	52 дол. США

*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Контактные телефоны: (38044) 271-26-23; 529-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно также оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____ 201 г. по _____ 201 г. включительно

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, e-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$
 Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$
 Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$
 Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$
Обложка внутренняя, полноцветная
 Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$
 Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$
 Третья страница обложки (200×290мм) — 340\$
 Четвертая страница обложки (200×290мм) — 340\$

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$
 Полноцветная (200×290мм) — 340\$
 Полноцветная (200×142мм) — 170\$
Реклама в разделе информации
 Полноцветная (165×245мм) — 300\$
 Полноцветная (165×120мм) — 170\$
 Полноцветная (82×120мм) — 80\$
 • Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
 • Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
 • Статья на правах рекламы — страница А4 (170×240мм) — 170\$
 • При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 7.07.2010. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
 Усл. печ. л. 9,2. Усл.-отг. 9,6. Уч.-изд. л. 9,2+6 цв. вклеек.
 Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе».
 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.