

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 3, 2013

Издается с января 1989 г.

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, В. Л. Венгринович,
Э. Ф. Гарф, А. А. Грузд,
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,
М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш,
В. В. Клюев, А. А. Лебедев,
Л. М. Лобанов, З. Т. Назарчук,
Н. В. Новиков, Ю. Н. Посыпайко,
Г. И. Прокопенко, В. А. Стороженко,
В. А. Стрижало, В. Н. Учанин,
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,
Е. В. Шаповалов, В. Е. Щербинин

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул.Боженко, 11
Институт электросварки им.Е.О.Патона
НАН Украины
Тел.: (044) 205-23-90
Факс: (044) 200-54-84, 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
URL: www.patonpublishinghouse.com

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Редактор

Т. В. Юштина

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа

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.

Журнал «Техническая диагностика
и неразрушающий контроль» переиздается
в полном объеме на английском языке
под названием «Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing»
издательством «Cambridge International
Science Publishing», Великобритания

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ.....3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Недосека А.Я., Недосека С.А. Формирование волн
акустической эмиссии.....5

Будадин О.Н. Новый метод определения термического
сопротивления ограждающих конструкций9

Недосека А.Я. Программное обеспечение систем АЭ
диагностики ЕМА-3.9 16

Карпаш М.О. Методология багатопараметрового
діагностування технічного стану трубопроводів
довгортривалої експлуатації23

Стороженко В.А., Мягкий А.В., Малик С.Б., Тихий В.Г.
Оптимизация процедуры тепловой дефектоскопии сотовых
конструкций31

Тороп В.М., Яхно Б.О., Козлов С.В. Расчетное обоснование
дополнительного раскрепления металлоконструкций верхних
блоков энергоблоков атомных электростанций от внешних
динамических воздействий36

Найда С.А., Дрозденко Е.С. Фокусируемые пьезоприемники
для акустотермометрии.....41

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Троицкий В.А. Портативная рентгенотелевизионная система48

Глуховский В.Ю., Бородай О.С. Определение и расчет геоме-
трических параметров дефектов объекта контроля с примене-
нием лазерно-тепловизионной дефектometрии53

Блинов Ю.Н., Хрипун Л.А. Особенности технического обсле-
дования конструкций высотных зданий и сооружений после
аварий и обрушений. Опыт НПО «Дискрет» по их ликвидации
и восстановлению методом промышленного альпинизма.....56

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

В Правлении Украинского общества НКТД.....60

Научный семинар по европейскому проекту «INNOPIES»
в Варшаве.....60

VII Научно-техническая конференция молодых ученых и
специалистов «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»63

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика
и неразрушающий контроль» ТК-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, V. L. Vengrinovich,
E. F. Garf, A. A. Gruzd,
E. A. Davydov, A. T. Zelnichenko,
M. L. Kazakevich, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, A. A. Lebedev,
L. M. Lobanov, Z. T. Nazarchuk,
N. V. Novikov, Yu. N. Posypayko,
G. I. Prokopenko, V. A. Storozhenko,
V. A. Strizhalo, V. N. Uchanin,
S. K. Fomichev, N. G. Chaurov,
E. V. Shapovalov, V. E. Shcherbinin

Address

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str.,
03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (044) 200-23-90,
Fax: (044) 200-54-84, 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
URL: www.patonpublishinghouse.com

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

«Tekhnicheskaya diagnostika
i nerazrushayushchiy kontrol»

journal is republished cover-to-cover in English
under the title of «Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing» by Cambridge
International Science Publishing, UK

CONTENT

NEWS.....3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A. Formation of acoustic
emission waves5

Budadin O. N. New method to determine thermal resistance of
enclosure structures9

Nedoseka A. Ya. Software of AE diagnostic systems EMA-3.916

Karpash M. O. Methodology of multiparametral diagnostics of
technical condition of pipelines in long-term operation23

Storozhenko V. A., Myagky A. V., Malik S. B., Tikhy V. G.
Optimization of the procedure of thermal flaw detection of
honeycomb structures31

Torop V. M., Yakhno B. O., Kozlov S. V. Calculated substantiation
of additional fastening of metal structures of head packages of
reactors to resist external dynamic impact.....36

Naida S. A., Drozdenko E. S. Focused piezo receivers for acoustic
thermometry.....41

INDUSTRIAL

Troitsky V. A. Portable X-ray TV system48

Glukhovskii V. Yu., Borodaj O. S. Determination and calculation
of geometrical parameters of defects of the object of control with
application of laser-TV flaw detection53

Blinov Yu. N., Khripun L. A. Features of technical examination of
structures of high-rise buildings and constructions after accidents
and collapse. Experience of SPA «Diskret» on their liquidation
and structure reconditioning by industrial alpinism method56

NEWS AND INFORMATION

In the Board of Ukrainian NDTTD Society60

Scientific Seminar on «INNOPIES» European project in Warsaw60

VII Scientific-Technical Conference of Young Scientists and
Specialists «Welding and Related Technologies»63

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Technical Committee on standartization «Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing» TC-78
Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic

OmniScan SX - новый ультразвуковой дефектоскоп на ФР

Компания Olympus, первооткрыватель и мировой лидер в области разработки и производства ультразвукового оборудования с фазированными решетками, предлагает вашему вниманию новый дефектоскоп OmniScan SX серии OmniScan®. Дефектоскоп имеет удобный и понятный интерфейс с сенсорным 8,4-дюймовым экраном. OmniScan SX является экономически выгодным решением для осуществления линейного сканирования, включая коррозионный мониторинг, контроль композитных материалов и сварных соединений с использованием одной фазированной решетки или одного канала TOFD.

OmniScan SX доступен в двух конфигурациях: SX PA и SX UT. Модель SX PA - это модуль фазированных решеток 16:64PR, который, аналогично УЗ-модулю SX UT, оснащен традиционным ультразвуковым каналом или каналом TOFD.

OmniScan SX совместим со всеми сканерами Olympus, датчиками и комплектующими, а также с программным обеспечением NDT SetupBuilder и OmniPC. Оборудование и программное обеспечение Olympus гарантируют эффективность и надежность неразрушающего контроля на всех этапах, начиная с проектирования и настройки и заканчивая сбором данных и анализом результатов контроля.



Olympus выпустил систему контроля трубопроводов UltraWave LRT

Компания Olympus, мировой лидер в технологии неразрушающего контроля, представила усовершенствованную систему экспресс диагностики трубопроводов UltraWave LRT, использующую технологию направленных волн.

Технология направленных ультразвуковых волн - один из методов неразрушающего контроля, применяющийся для выявления очагов внутренней и внешней коррозии, различных механических повреждений. Данный метод использует крутильные волны низкой частоты, которые распространяются вдоль трубы, отображая изменения площади



поперечного сечения. Так как потеря энергии минимальна, волны могут распространяться на большие расстояния, гарантируя 100%-ый охват поверхности трубы без перемещения датчика. Фокусирование волн на дефектных зонах повышает эффективность коррозионного мониторинга.

Технология направленных волн предоставляет возможность сканирования трубопроводов без выведения их из эксплуатации, и применяется как для контроля наземных структур, так и для коррозионного мониторинга подземных, изолированных, окрашенных и вертикальных труб.

С помощью данной технологии осуществляется также диагностика трубопроводных эстакад, опор и зажимов. Метод направленных волн гарантирует быстрый отбор бездефектных труб без необходимости земляных работ и снятия изоляционного покрытия, таким образом, значительно сокращая затраты на проведение обследования.

ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО СЛЕЖЕНИЯ ЗА СТЫКОМ (STS-200-H)

В ИЭС им. Е.О. Патона разработана система, предназначенная для автоматического слежения за центром стыка с разделкой кромок без заполнения или с частичным заполнением после технологического прохода при сварке под флюсом рабочих швов труб большого диаметра. Система состоит из двух основных элементов: лазерного сенсора, оснащенного микропроцессорным контроллером, и коммуникационного модуля.

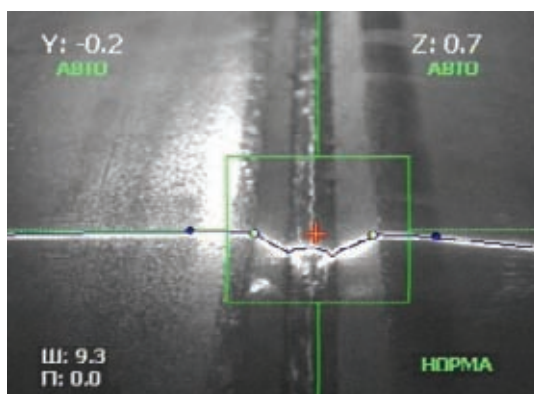
Лазерный сенсор предназначен для бесконтактного измерения поперечного и вертикального смещения центра стыка и передачи результатов измерения коммуникационному модулю через интерфейс RS-422. Также лазерный сенсор снабжается телевизионным выходом для визуального сопровождения работы системы. Основные функции коммуникационного модуля: прием данных от лазерного сенсора, формирование сигналов поперечной и вертикальной коррекции положения сварочной головки, быстрая настройка системы слежения, взаимодействие с главным контроллером сварочного стана, пультом оператора и внешним компьютером для сервисной параметризации и настройки системы слежения.

Система слежения встраивается в существующее технологическое оборудование сварочного стана. Телевизионный выход сенсора подключается к дисплею дистанционного видеонаблюдения. Коммуникационный модуль оснащается необходимыми интерфейсами, цифровыми и/или аналоговыми входами/выходами для взаимодействия с главным контроллером сварочного стана и пультом оператора (перечень необходимых сигналов дополнительно согласуется с Заказчиком в зависимости от типа сварочного стана).

Система слежения построена на базе современных электронных компонентов и печатных плат промышленного назначения, что обеспечивает повышенную надежность поставляемого оборудования. Основные преимущества системы слежения STS-200-H: большая чувствительность к глубине разделки благодаря большому триангуляционному углу обеспечивает надежное слежение за стыком при сварке тонкостенных труб; отсутствие операционной системы Windows; время загрузки системы после включения менее 2 с; отсутствие компьютера в составе системы слежения; трансформаторная гальваническая развязка питания и сигнальных цепей установлена непосредственно в сенсорном блоке, что позволяет исключить влияние электромагнитных полей от сварочных кабелей; взаимозаменяемые сенсорные блоки и коммуникационные модули; наличие телевизионного выхода, что позволяет сварщику визуально наблюдать за процессом слежения; доступна информация о фактической ширине разделки (не требует предварительного ввода) и превышении кромок в реальном времени; уникальный оптический тракт позволяет надежно исключать влияние бликов и посторонних засветок на процесс слежения за стыком; защитные стекла стандартного диаметра 20 и 30 мм могут быть легко заменены за считанные минуты.

Технические характеристики

точность слежения за центром стыка в поперечном и вертикальном направлениях, мм.....	± 0,5;
рабочая зона лазерного сенсора в поперечном направлении, мм	± 30;
рабочая зона лазерного сенсора в вертикальном направлении, мм	± 25;
номинальное расстояние от сенсора до трубы, мм	80;
минимально допустимая остаточная глубина разделки, мм	2;
максимальная длина линии связи между лазерным сенсором и коммуникационным модулем, м	50;
стандарт выходного телевизионного сигнала сенсора.....	PAL;
питание системы.....	24 В;
потребляемая мощность, Вт, не более	20;
напряжение пробоя гальванической изоляции сенсора, кВ, не менее	1,5;
степень защиты лазерного сенсора по IP.....	IP64;
диапазон рабочих температур сенсора, °C	-10...+65;





УДК 620.12.49

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А.Я. НЕДОСЕКА, С.А. НЕДОСЕКА

ИЭС им Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты аналитических исследований волн акустической эмиссии (АЭ), возникающих и распространяющихся в тонких пластинах. Анализ проведенных исследований показал, что, используя полученные результаты, можно управлять параметрами АЭ волн, поступающих для дальнейшей обработки в прибор. При этом характеристики АЭ преобразователей можно получить любые, требуемые условиями измерений и обработки. Библиогр. 8, рис. 4.

Ключевые слова: АЭ, аналитическая модель, импульс АЭ, спектр АЭ

Сложность получения и обработки АЭ информации, поступающей в измерительные приборы, предъявляет к АЭ датчикам особые требования. Датчик должен преобразовывать АЭ сигналы, возбуждаемые развивающимися дефектами, к виду, упрощающему их анализ и позволяющему более точно принимать решение о состоянии конструкции [1–8]. Расчеты показывают, что такие возможности можно реализовать аналитическим путем, моделируя процессы возбуждения, формирования и распространения АЭ волн. Следует отметить трудности, возникающие при решении такого рода задач, связанные с достаточно большим количеством факторов, влияющих на конечный результат. Сложность аналитического и физического моделирования процессов, протекающих в материалах при их разрушении, приводит к необходимости вырабатывать специфические требования к способу и процедуре решения задач, к их коррекции в ходе выполнения. Это вызывает необходимость применения определенных специфических приемов в процедуре расчета, а также выдвигает некоторые требования и к специалистам, обеспечивающим получение результатов на необходимом научном уровне и в оптимальный срок. Эти требования вполне понятны. Однако опыт работы на протяжении многих лет показал, что они все-таки должны быть сформулированы и представлены в виде взвешенных частей одного целого. Нам кажется, что условия, которым должен соответствовать специалист, должны быть такими, как представленные на диаграмме рис.1. Использование указанных подходов при решении сложных аналитических задач позволило получить наглядные и доступные для анализа результаты в сравнительно короткий срок.

Итак, рассмотрим пластину небольшой толщины с источником возмущения в ее центре на некоторой глубине от поверхности. Такие задачи нами были решены ранее [4–7]. Решения позво-

лили получить представление о характере волн, распространяющихся в пластинах при их возбуждении точечным источником на различной глубине. Было показано, что элементарные АЭ волны распространяются в неограниченном диапазоне частот и что умелый выбор и суммирование этих частот позволяет получить АЭ датчик с наперед заданными характеристиками.

Так, все волновое поле условно разбито на три диапазона: от нуля до скорости C_2 , от C_2 до C_1 и диапазон скоростей выше C_1 . Как показывают графики зависимостей скорости распространения акустических волн от волновых чисел (спектральные уравнения), зависимость эта с ростом скоростей распространения элементарных волн усложняется, и в случае волн, движущихся со скоростями выше C_1 , приобретает хаотически сложный вид. Эти зависимости для трех диапазонов скоростей представлены на рис. 2, где C_1 и C_2 – базовые физические константы:

$$C_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad C_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$$

(E – модуль упругости материала, МПа; ν – коэффициент Пуассона; $\rho = \gamma/g$ – плотность материала, $\text{кг см}^2/\text{см}^4$ (γ – удельный вес, кг/см^3 ; g – ускорение силы тяжести, см/с^2)); C_a – мгновенная скорость элементарных волн, составляющих перемещающийся импульс АЭ (определяется спектральным уравнением (А)).

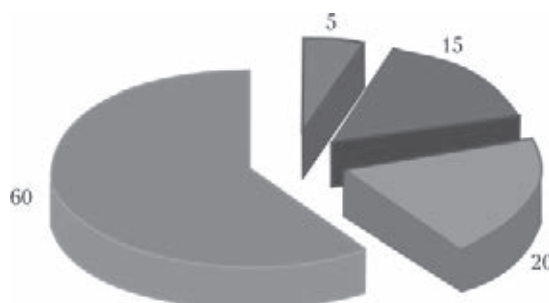


Рис. 1. Требования к специалистам, %: 5 – знания; 15 – опыт; 20 – умение; 60 – желание и настойчивость

© А.Я. Недосека, С.А. Недосека, 2013



На рис. 2, а представлены кривые зависимости относительной скорости перемещения АЭ волны от волнового числа α . Графики показывают нелинейную зависимость между указанными параметрами. Нелинейность постепенно перемещается к нулевому значению α и при толщине пластины 10 см и более эта зависимость прямолинейна и дает постоянное значение отношения C_a/C_2 , равное $0,927C_2$. Это скорость волны Рэлея, распространяющейся по поверхности пластины большой толщины. Можно также отметить, что это достаточно простые зависимости, выраженные одной нелинейной зависимостью для каждой толщины. Анализируя далее графики рис. 2, а, видим, что для этого случая зависимость между волновым числом и скоростью перемещения волны для заданной толщины пластины однозначна, т.е. каждому значению волнового числа α соответствует единственное значение скорости.

Но если скорости распространения волн становятся выше скорости C_2 , то в случае (рис. 2, б), когда рассматривается диапазон скоростей от C_2 до C_1 , зависимость между скоростями и волновыми числами становится сложной. Так, только для пластины толщиной 1 см все поле графика покрывается сетью кривых, указывая на большое число элементарных волн, распространяющихся в этой пластине. В этом случае наблюдаем неоднозначность, когда одному значению α соответствует несколько скоростей перемещения элементарных волн.

Картина еще более усложняется, когда элементарные волны двигаются со скоростями выше C_1 (рис. 2, в). Тогда каждому значению волнового числа соответствует бесчисленное значение скоростей. На рисунке показана сеть элементарных волн, покрывающая всю поверхность графика с ничтожно малыми интервалами между ними.

На графике показан диапазон скоростей, когда C_a/C_1 достигает значения 25. Нами также были проведены расчеты до значений $C_a/C_1=1200$ и далее. Результаты расчетов показали, что элементарные волны существуют во всех этих диапазонах. В то же время можно отметить, что величины перемещений поверхностей пластин практически мало зависят от элементарных составляющих волн,двигающихся с очень большими скоростями.

Зная спектральные характеристики пластины, другими словами, зная какие длины волн и при каких скоростях они могут распространяться в пластине, можно путем фильтрации выбрать требуемый для данного конкретного случая диапазон групп частот и шаг между ними, а также диапазон

скоростей, которые целесообразно получить для дальнейшего анализа.

Таким образом, можно построить преобразователь АЭ, который реализует заданные условия фильтрации волны и в прибор для дальнейшей обработки поступит АЭ импульс, сформированный по наперед заданным параметрам. Анализируя графики рис. 2, можно сделать вывод, что такими параметрами являются: α ; $\Delta\alpha$; $C_a/C_{1,2}$; $\Delta(C_a/C_{1,2})$ или $\sum (\Delta C_a/C_{1,2})$.

Представим пример расчета параметров АЭ преобразователя для работы с пластинами со средней толщиной 1 см. Выберем значение $\Delta\alpha = 1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$, что соответствует частотному диапазону 80...800 кГц. Величину $\Delta(C_a/C_1)$ примем равной $1 \dots 3$ с шагом 0,1. Проведя расчет перемещений верхней поверхности пластины при таких параметрах датчика, получим спектр волн, представленный на рис. 3.

Анализируя результаты расчета, можем сделать вывод, что на расстоянии 71 см сформировался импульс, распространяющийся с мгновенной скоростью, равной $0,71 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ (на графике выделен областью синего цвета). Импульс имеет несколько явно выраженных пиков с достаточно крутым передним фронтом, что позволяет проводить их обработку по специальным программам.

Можно считать, что АЭ преобразователь с такими параметрами может быть использован в контролирующей аппаратуре типа ЕМА-3. В расчетах были использованы формулы, полученные ранее [4-7]. Программа для расчета параметров фильтрации волны представлена на рис. 4.

Аналитические зависимости

$$w = \frac{1+v}{1-v} \frac{V_0}{2\pi^2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[1 - \frac{2}{1-\gamma^2} \right] \alpha \cos(\alpha \gamma_1 z_0) \times \\ \times \sin(\alpha C_a t) J_0(\alpha r) d\alpha, \\ 2(1-\gamma_2^2)^2 \cos(\alpha \gamma_1 \delta) \sin(\alpha \gamma_1 z_0) \sin(\alpha \gamma_2 \delta) + \\ + 8\gamma_1 \gamma_2 \sin(\alpha \gamma_1 \delta) \sin(\alpha \gamma_1 z_0) \cos(\alpha \gamma_2 \delta) + \\ + \left[4\gamma_1 \gamma_2 - (1-\gamma_2^2)^2 \right] \sin(\alpha \gamma_1 \delta) \times \\ \times \cos(\alpha \gamma_1 z_0) \sin(\alpha \gamma_2 \delta) = 0$$

представляют математическую модель волнового процесса для диапазона скоростей выше C_1 при возникновении мгновенного изменения объема материала в любой точке пластины [4-6]. Модель состоит из формулы, описывающей перемещения поверхности пластины и спектрального уравнения, определяющего состав спектра элементарных волн, образующих их пакет.

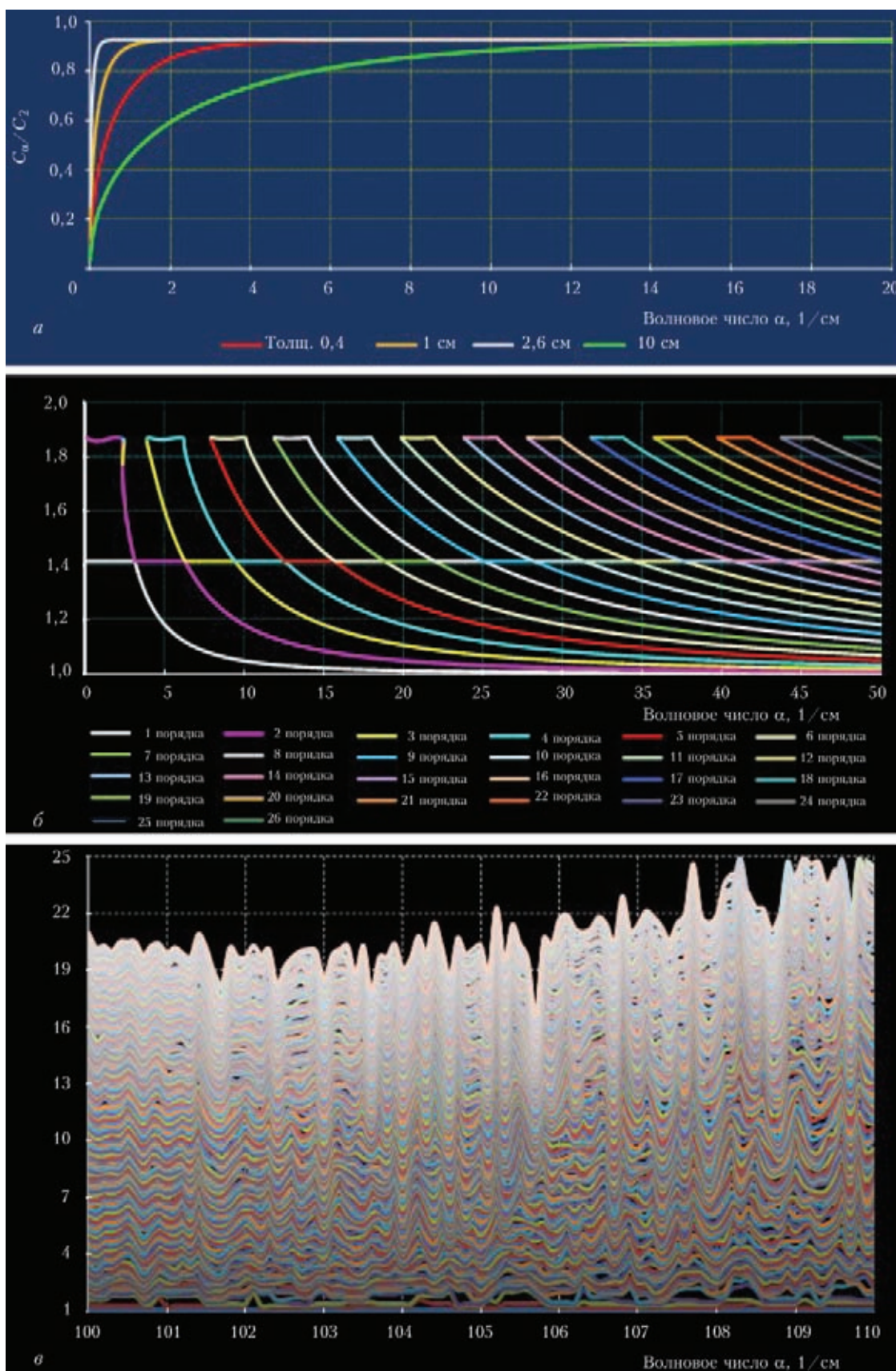


Рис. 2. Спектры АЭ волн для трех диапазонов волнового поля (описание а–в см. в тексте)

Здесь ν – коэффициент Пуассона; V_0 – внешнее изменение объема материала, вызвавшее АЭ, $\text{см}^3 \cdot \text{с}$; δ – толщина пластины; z_0 – глубина залегания изменившегося объема материала V_0 ;

t – время, с; r – радиус, см.

Остальные величины, входящие в формулы, ясны из приведенных ниже выражений:

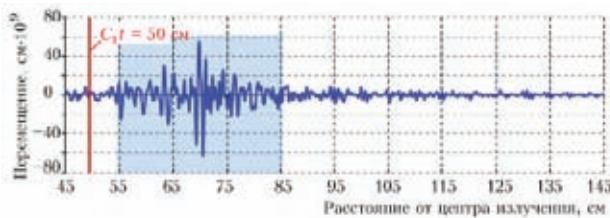


Рис. 3. Перемещения верхней поверхности пластины толщиной 1 см, вызванные источником излучения на глубине 0,2 см от поверхности (параметры фильтрации приведены в тексте)

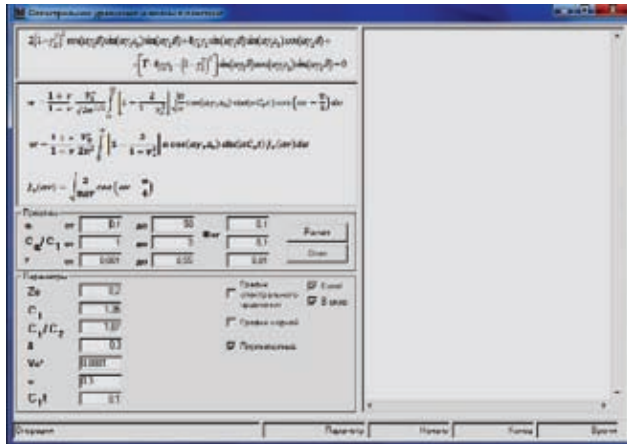


Рис. 4. Окно программы для выбора параметров АЭ преобразователя путем фильтрации волнового поля пластины

$$\Gamma = \frac{4\gamma_1\gamma_2}{(1-\gamma_2^2)^2}, \quad \gamma_2 = \sqrt{\frac{C_\alpha^2}{C_2^2}-1}, \quad \gamma_1 = \sqrt{\frac{C_\alpha^2}{C_1^2}-1}. \quad (A)$$

На рис. 4 показано окно программы расчета волн АЭ при различных условиях фильтрации. Программы типичны для всех трех диапазонов скоростей волн, поэтому в качестве примера на рисунке приведена программа для случая, когда диапазон рассматриваемых скоростей находится между C_1 и бесконечностью. В верхнем левом углу окна приведены расчетные формулы: сверху – спектральное уравнение, ниже – формула для расчета перемещений w . Формула для расчета условно представлена в пределах интегрирования от 0 до бесконечности – полный спектр элементарных волн. Действительное значение спектра выбирается по первой строке поля исходных значений (условно обозначено «пределы»). Туда подставляются значения нижнего и верхнего пределов интегрирования. Точность выполнения расчета определяет шаг по α в последней колонке верхней строки. Вторая строка поля «пределы» определяет диапазон и шаг сче-

та выбранных скоростей волн. Еще ниже расположена строка значений и шага счета по радиусу от 0 до принятого для конкретного случая значения. В поле «параметры» устанавливаются исходные параметры счета для данной пластины (толщина, материал, объем начального излучения, положение источника по глубине, примерное ожидаемое расположение максимального импульса по радиусу пластины). Там же указываются необходимые требования к оформлению расчетных данных и способам их представления. Программы построены для каждого диапазона скоростей.

Выводы

Построена аналитическая модель волнового поля пластины, появляющегося при внезапном возникновении АЭ источника.

Разработаны специальная методика и программы для выбора в общем волновом поле пластин требуемых рабочих параметров АЭ преобразователей.

Приведены основные параметры, характеризующие спектральный состав АЭ волны на выходе преобразователя (α ; $\Delta\alpha$; $C_\alpha/C_{1,2}$; $\Delta(C_\alpha/C_{1,2})$ или $\sum(\Delta C_\alpha/C_{1,2})_i$).

Спектральный состав импульса, поступающего в прибор, зависит только от амплитудно-частотной характеристики преобразователя.

1. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека. – Киев: Индпром, 2012. – 312 с.
2. Андрейкив А. Е., Лысак Н. В. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения. – Киев: Наук. думка, 1989. – 176 с.
3. Механіка руйнування і міцність матеріалів / Під заг. ред. В.В.Панасюка: Довід. посіб. Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т.Назарчука. – Львів: ФМІ, 2001. – 1132 с.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е.Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
5. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. Волны деформаций, возникающие при локальной перестройке структуры материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2004. – № 3. – С. 8–15.
6. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. О волнах Рэлея в пластинах ограниченной толщины // Там же. – 2006. – № 3. – С. 3–8.
7. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. О движении волн акустической эмиссии с большими скоростями // Там же. – 2013. – № 1. – С. 3–9.
8. Недосека А. Я., Недосека С. А., Овсиенко М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат // Там же. – 2011. – № 2. – С. 5–14.

The paper gives the results of analytical studies of acoustic emission (AE) waves emerging and propagating in thin plates. Analysis of the conducted investigations showed that by applying the derived results it is possible to control AE wave parameters, sent to the instrument for further processing. Any characteristics of AE transducers that are required by measurement and processing conditions can be obtained. 8 References, 4 Figures.

Key words: waves in thin plates, AE parameters monitoring

Поступила в редакцию
21.05.2013



НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

О.Н.БУДАДИН

ООО «НПО «Институт термографии». 107076, г. Москва, ул. Матросская Тишина, 23/7, корп.1.

E-mail: instermograf@mail.ru

Для объективной оценки рационального использования энергоресурсов и обеспечения достоверных результатов энергетического аудита проведены следующие работы. Разработан объективный метод теплового (тепловизионного) контроля термического сопротивления многослойных строительных конструкций в реальных условиях их эксплуатации, позволяющий осуществлять обработку данных без решения обратных задач и практически без участия оператора. Оптимизированы режимы контроля по разработанной методике. Показано, что наименьшая погрешность результатов контроля достигается при регистрации температурных историй в интервале 2,5–4 сут. Проведена метрологическая аттестация методики контроля. Показано, что погрешность получаемых результатов (систематическая и случайная) не превышает 8,8 %. Разработан прибор «ИТС-03-ПОТОК», обеспечивающий в автономном режиме автоматическое измерение термического сопротивления светопрозрачных и нестепрозрачных ограждающих конструкций. Данный прибор сертифицирован как средство измерения. Библиогр. 4, табл. 2, рис. 9.

Ключевые слова: тепловой (тепловизионный) контроль, термическое сопротивление, сопротивление теплопередаче, инструментальный энергетический аудит

Одной из величин, определяющих энергоэффективность строительной конструкции (в том числе величину сверхнормативных потерь через ограждающие конструкции), а следовательно, определение которой входит в обязательном порядке в технологию энергетического аудита, является термическое сопротивление. Это определено рядом нормативных документов, например [1] и др.

Большинство проблем, возникающих при определении этой величины, заключались в том, что, как правило, методы ее определения «работают» в условиях стационарности процесса теплопередачи через ограждающую конструкцию, в то время как в действительности процесс являлся сугубо нестационарным. Это приводило к ограничению возможности определения сопротивления теплопередаче и к большой погрешности получаемых результатов.

Решение этой проблемы впервые было предложено в работе [2] и развито в работе [3]. Оно заключается в решении обратной задачи нестационарной теплопроводности в многослойной среде. Метод универсален и в настоящее время находит широкое применение на практике.

Однако его применение выявило и сдерживается рядом недостатков, которые заключаются в следующем:

- имеется существенная нелинейная зависимость точности получаемых результатов от погрешности входных данных – результатов первичных измерений. Это приводит к необходимости обеспечивать малые значения погрешности результатов первичных измерений, что требует применения специальных измерительных приборов, квалифицированных операторов и т.п. Помимо

этого, требуется соблюдение специальных климатических условий при проведении измерений;

- наличие ошибки входных данных может привести к случаю, когда обратная задача не сходится, т.е. будет отсутствовать решение;

- решением обратной задачи, как правило, является не само сопротивление теплопередаче, а величина теплопроводности одного из слоев, обычно слоя с наименьшим сопротивлением теплопередаче – теплоизоляционного слоя;

- для реализации контроля по методикам, использующим решение обратной задачи, необходимо априори знать состав и теплотехнические характеристики слоев контролируемой ограждающей конструкции (для получения теоретических температурных полей на основе математических моделей), что на практике не всегда выполнимо;

- в результате решения обратной задачи в силу специфических особенностей математического аппарата и физических принципов получаются кроме основного решения (глобального минимума функции «невязки») несколько локальных минимумов (ложных решений). Это приводит к необходимости выбора оператором нужного «истинного» решения на основе других дополнительных входных данных и др., что вносит субъективную (а значит, трудно учитываемую) погрешность;

- перед применением метода обратной задачи необходимо провести цикл трудоемких исследований корректности, единственности, сходимости и устойчивости решения;

- методики контроля имеют малую производительность контроля, так как априори неизвестно, какая протяженность временной истории обеспечивает необходимую достоверность. Поэтому при проведении контроля стараются по-



лучить максимально возможную протяженность временной истории, что приводит к увеличению производительности;

– трудно обеспечить повторяемость результатов вследствие существенного влияния на результаты входных данных и субъективной погрешности, что существенно затрудняет оценку достоверности результатов и метрологическую аттестацию методики контроля.

Кроме того, на достоверность результатов по существующим методикам большое влияние оказывает субъективный фактор: поскольку априори известны значения теплотехнических характеристик слоев обследуемой конструкции (из проектной документации), а следовательно, и проектное значение сопротивления теплопередаче, то существует «соблазн» для оператора слегка поправить расчетные результаты в сторону проектных значений, тем более, что процесс решения обратной задачи в силу некоторой специфики это позволяет.

Это снижает доверие к получаемым результатам.

Цель настоящей работы – создание новой технологии определения сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, свободной от перечисленных выше недостатков, в том числе исключение решения обратной задачи и априорное знание теплотехнических характеристик слоев ограждающей конструкции.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– разработан математический аппарат определения сопротивления теплопередаче в нестационарных условиях теплопередачи, основанный на методах математического анализа и математической статистики, без использования методов решения обратной задачи и априорных знаний состава ограждающей конструкции. Он сводится к решению системы уравнений относительно термического сопротивления:

$$\begin{aligned}\bar{q}_b(t) &= \frac{\bar{T}_b(t) - \bar{T}_h(t)}{R} + \Delta q_b(t), \\ \bar{q}_h(t) &= \frac{\bar{T}_b(t) - \bar{T}_h(t)}{R} + \Delta q_h(t), \\ \Delta q_b(t) &= \alpha_b \left[\bar{T}_b(t) - \int_0^\infty k_{11}(\tau) \bar{T}_b(t - \tau) d\tau \right] + \\ &+ \frac{1}{R} \int_0^\infty k_{12}(\tau) \left[\bar{T}_b(t - \tau) - \bar{T}_b(t) - (\bar{T}_h(t - \tau) - \bar{T}_h(t)) \right] d\tau, \\ \Delta q_h(t) &= \alpha_h \left[\bar{T}_h(t) - \int_0^\infty k_{11}(\tau) \bar{T}_h(t - \tau) d\tau \right] + \\ &+ \frac{1}{R} \int_0^\infty k_{12}(\tau) \left[\bar{T}_h(t - \tau) - \bar{T}_h(t) - (\bar{T}_b(t - \tau) - \bar{T}_b(t)) \right] d\tau,\end{aligned}\quad (1)$$

$$\int_0^\infty k_{ij}(\tau) d\tau = 1,$$

где $\bar{q}_b(t)$, $\bar{q}_h(t)$ – величина усредненного теплового потока на внутренней и наружной поверхностях конструкции; $\bar{T}_b(t)$, $\bar{T}_h(t)$ – величины усредненной температуры на внутренней и наружной поверхностях конструкции; R – величина термического сопротивления; $\Delta q_b(t)$, $\Delta q_h(t)$ – корректирующие величины теплового потока; α_b , α_h – коэффициент теплообмена на наружной и внутренней поверхностях конструкции; k_{ij} – весовые коэффициенты; τ – параметр интегрирования;

– проведены теоретические и экспериментальные исследования разработанной технологии и разработана методика проведения контроля;

– разработана методика метрологической аттестации технологии определения сопротивления теплопередаче в нестационарных условиях теплопередачи и проведена метрологическая аттестация методики контроля.

Методика определения сопротивления теплопередаче заключается в следующем.

1. Измеряются температурные истории и истории тепловых потоков в течение трех-четырех суток на наружных и внутренних поверхностях ограждающей конструкции.

2. Полученные значения вводятся в специальную программу обработки.

3. Программа запускается на выполнение, без вмешательства оператора проводится расчет и формируется результат – термическое сопротивление или сопротивление теплопередаче в реперной зоне. Далее осуществляется определение приведенного сопротивления теплопередаче по обследуемой поверхности по общеизвестным формулам.

В рамках математической модели использовался математический аппарат анализа формы объектов, который представляет собой одну из основных задач распознавания образов и имеет определенное значение для решения задач машинной графики в интерактивном режиме. Он необходим для определения границ реперной зоны с целью минимизации погрешности результатов контроля.

Анализ формы оказывается полезным во всех случаях, когда требуется принять некоторое решение на основе формы наблюдаемых объектов.

Использовали два подхода к распознаванию формы объектов: при первом рассматриваем объект в целом и принимаем решение, исходя из его общей структуры; при втором исследуется контур объекта: обычно определяются углы, выступы, впадины и другие точки с высокими значениями кривизны.

Дальнейший анализ контура проводится несколькими способами. Простейшая методология предусматривает получение несложного пред-



ставления контура, например, в цепном коде. При использовании более развитой методологии контур аппроксимируется участками гладких кривых (например, В-сплайнами). Последнее предпочтительно в тех случаях, когда данные зашумлены, а также при использовании признаков, отражающих особенности значительной части контура. Первый подход более уместен при работе с данными, отличающимися низким уровнем шума, и использовании локальных признаков. Широкое применение аппроксимации многоугольниками объясняется не только связанной с ней возможностью обнаруживать максимумы кривизны, но и тем, что её реализация оказывается проще реализации других методов построения кривых по точкам.

Отыскание кривой, проходящей через заданное множество точек, составляет задачу интерполирования, а отыскание кривой, проходящей вблизи заданного множества точек, – задачу аппроксимации. Разработан метод, предусматривающий использование кусочно-полиномиальных функций различных типов. При решении задач аппроксимации уделяется внимание выбору критерия, характеризующего качество приближения.

Для решения поставленной задачи разработан метод интерполирования с помощью многочленов.

Пусть $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ – последовательность точек, заданных на плоскости, причём $x = x_i$ при $i = j$. Для этих точек можно записать интерполяционный многочлен $(n-1)$ -й степени так:

$$P_n(x) = y_1 \frac{(x-x_2) \dots (x-x_n)}{(x_1-x_2) \dots (x_1-x_n)} + y_2 \frac{(x-x_1)(x-x_3) \dots (x-x_n)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3) \dots (x_2-x_n)} + \dots + y_n \frac{(x-x_1) \dots (x-x_{n-1})}{(x_n-x_1) \dots (x_n-x_{n-1})}, \quad (2)$$

или представить в более строгом виде:

$$P_n(x) = \sum_{i=1}^n y_i \prod_{j \neq i} \frac{(x-x_j)}{(x_i-x_j)}. \quad (3)$$

Из приведенного выражения следует, что значение y умножается на дробь, равную 1 при $x=x_i$ и 0 при остальных значениях x , принимаемых им в заданных координатах. Частному случаю $n=2$ соответствует уравнение линии, соединяющей две точки:

$$P_2(x) = y_1 \frac{x-x_2}{x_1-x_2} + y_2 \frac{x-x_1}{x_2-x_1}. \quad (4)$$

Отметим некоторые недостатки, присущие разработанному методу: существенные колебания, которые может претерпевать кривая, построенная между двумя точками. Однако достоинство метода – достаточно простые формулы – перекрывают недостатки.

На рис. 1 приведен интерфейс программы обработки данных для определения величины термического сопротивления в реперной зоне ограждающей конструкции.

Проведены теоретические исследования разработанной методики измерения термического сопротивления многослойной строительной конструкции.

Как известно, температура на поверхности земли изменяется в течение суток по периодическому закону. На рис. 2 приведен график изменения температуры за 7 дней.

В идеальном случае при отсутствии шумов эти изменения можно представить следующей формулой:

$$T(t) = T_0 + T_m \sin(2\pi t/T_{\text{сут}}), \quad (5)$$

где T_0 – постоянное среднее значение температуры; T_m – амплитуда колебания; t – текущее значение времени; $T_{\text{сут}}$ – период суток (24 ч).

В реальных условиях на поверхности земли на температуру влияет большое количество случайных шумов и помех (ветер, туман, облака и т.п.). Представив эти влияния как случайные воздей-

Рис. 1. Интерфейс программы обработки данных ограждающей конструкции



тивления необходимо определять оптимальное время регистрации температурных историй.

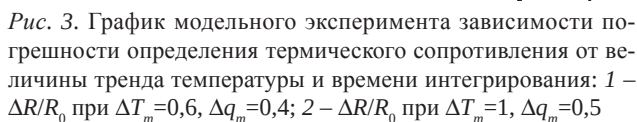
Здесь $\sigma(x(t))$ – функция случайной величины, влияющая на температуру; x – параметр, определяемый доверительной вероятностью.

Результаты теоретического моделирования погрешности определения термического сопротивления с учетом всех указанных выше факторов приведены на рис. 4.

Анализ результатов, приведенных на рис. 4, позволяет сделать следующие выводы.

1. Погрешность определения термического сопротивления по разработанной методике не превышает 10 %, что вполне приемлемо для практики.

где коэффициенты a и b определяют величину тренда.



Время, сут	Порозность, %
0.5	18.5
1.0	12.0
2.0	8.0
3.0	6.0
4.0	6.0
5.0	7.0
6.0	9.0

Рис. 4. Зависимость погрешности определения термического сопротивления от времени интегрирования при совокупном действии факторов: шумов и величины тренда ($\Delta R/R[\%]$)

$$q = -\Delta q_m(t/T_{\text{CVT}}) + q_0.$$

Рис. 4. Зависимость погрешности определения термического сопротивления от времени интегрирования при совокупном действии факторов: шумов и величины тренда ($\Delta R/R[\%]$)

Из рисунка видно, что величина тренда 2 град/сут приводит к погрешности определения термического сопротивления не более 6 %, что вполне приемлемо для практики.

Рис. 4. Зависимость погрешности определения термического сопротивления от времени интегрирования при совокупном действии факторов: шумов и величины тренда ($\Delta R/R[\%]$)



2. Существует оптимальное время регистрации температурных историй (время проведения контроля) при проведении контроля по разработанной методике. Это время по результатам теоретического моделирования лежит в диапазоне 2,5...4 сут. Оптимальность определяли по условию минимума погрешности определения термического сопротивления.

Проведена экспериментальная отработка разработанной методики измерения сопротивления теплопередачи многослойной конструкции. Она включает два этапа.

Этап 1. Метрологическая аттестация методики контроля в реальных условиях эксплуатации.

Этап 2. Экспериментальное определение погрешности измерения в реальных условиях контроля на реальных объектах.

Первым этапом экспериментальной отработки разработанной методики является ее метрологическая аттестация, с помощью которой решаются две основные задачи:

- определение систематической ошибки результатов контроля по разработанной методике;
- определение случайной погрешности результатов контроля по разработанной методике.

Систематическую ошибку определяли по формулам [4]:

абсолютное значение систематической ошибки

$$\Delta_{\text{сист}} = R_0 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{\text{э}}, \quad (10)$$

относительное значение систематической ошибки

$$\gamma_{\text{сист}} = \frac{\Delta_{\text{сист}}}{R_0}. \quad (11)$$

Определение случайной ошибки результатов контроля осуществлялось по формуле:

$$\sigma_{\text{сл}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{i=N} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{\text{э}i} - R_{\text{э}i} \right)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{\text{э}i}}. \quad (12)$$

В приведенных формулах использованы следующие обозначения: R_0 – истинное значение сопротивления теплопередаче исследуемой ограждающей конструкции (определяется либо по проектным данным, либо экспериментально); N – количество измерений (не связанных между собой); $R_{\text{э}i}$ – определенные значения сопротивления теплопередаче при i -м измерении.

Экспериментальное обеспечение метрологической аттестации осуществлялось следующим образом.

Проводился контроль в соответствии с разработанной методикой шестью ($N=6$) независимыми операторами. Время регистрации температурных историй – трое суток. Ограждающая конструкция для проведения исследований была выбрана с известными теплотехническими характеристиками слоев, постоянными по всей площади расположения преобразователей, а следовательно, и известным термическим сопротивлением $R_0 = 0,7$.

На рис. 5 точками показано расположение температурных преобразователей на наружной поверхности ограждающей конструкции.

В табл. 1 приведены значения сопротивлений теплопередаче, полученные каждым из шести операторов.

После проведения обработки каждым оператором в соответствии с формулами (10)–(12) получены следующие значения погрешности, %: систематическая погрешность – 2,8; случайная – 6.

Таким образом, с помощью метрологической аттестации получены погрешности определения



Рис. 5. Расположение температурных датчиков

Таблица 1. Значения сопротивлений теплопередаче в разных точках ограждающей конструкции

Номер точки расположения датчиков	Приведенный тепловой поток q , Вт/м ²	Приведенная температура на внутренней поверхности $T_{\text{в}}$, °С	Приведенная температура на наружной поверхности $T_{\text{н}}$, °С	Сопротивление теплопередаче
1	18,9	26,76	13,9	0,68
2	16,27	26,61	14,54	0,74
3	17,2	26,12	14,05	0,7
4	16,5	26,41	14,62	0,715
5	15,4	26	14,23	0,76
6	17,0	26,57	13,96	0,74



сопротивления теплопередаче в пределах 8,8 %, что является вполне приемлемым для практического использования.

При этом нужно учитывать, что это максимальная погрешность, так как в нее входит субъективная ошибка операторов (качество приклея датчиков к поверхности и т.п.).

Второй этап экспериментальной отработки осуществлялся на одном из высотных зданий Москвы.

На рис. 6 приведены экспериментальные, полученные с реальной многослойной конструкции, временные истории (значения в различные последовательные моменты времени) температуры и теплового потока, замеренные на поверхности.

На рис. 7 приведен состав многослойной конструкции, на которой проводились экспериментальные исследования с теплотехническими и геометрическими характеристиками слоев.

Далее осуществляется регистрация температурного поля $T(x,y)$ с поверхности контролируемого объекта (рис. 8).

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики величины сопротивления теплопередаче в реперной зоне, определенные в соответствии с заявляемым способом, определенные в соответствии с существующей методикой, описанной в работе [2], и рассчитанные на основании характеристик конструкций стены (см. рис. 8) по формуле:

$$R = \sum_{i=1}^{i=P} \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (13)$$

где i – номер слоя многослойной конструкции; δ – толщина i -го слоя; λ – теплопроводность материала i -го слоя; P – количество слоев.

Приведенное сопротивление теплопередаче определялось по общеизвестным формулам.

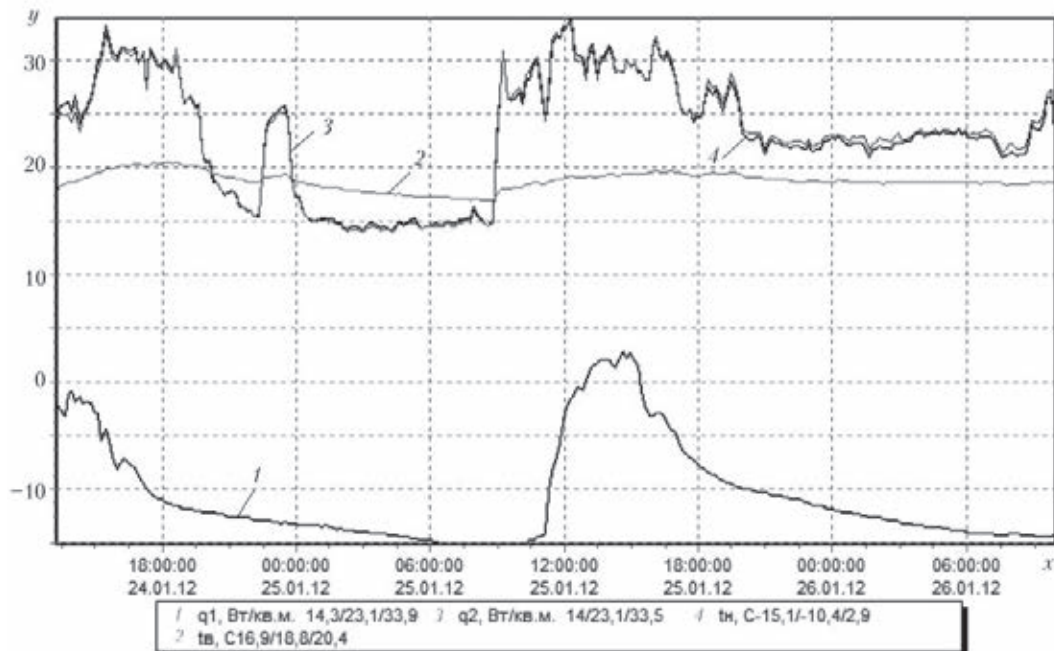


Рис. 6. Графики изменения плотности теплового потока и температуры наружной и внутренней поверхностей стен: y – значения теплового потока и температуры; x – время

Наружная поверхность	Номер слоя	Наименование материала	Плотность, кг/м³	Теплоемкость, Дж/кг	Теплопроводность, Вт/м²·град
1	1, 3	Железобетон	2400	840	1,86
2	2	Керамзитобетон	500	880	0,19
3					
Внутренняя поверхность					

Рис. 7. Схематическое изображение и состав многослойной конструкции

Таблица 2. Сравнительные характеристики величин сопротивления теплопередаче

Способ определения величины сопротивления теплопередаче	Сопротивление теплопередаче	Погрешность, %, относительно величины сопротивления теплопередаче
Разработанная технология	0,76	7
Существующая технология	0,84	18
Способ прямого расчета по известным теплотехническим и геометрическим характеристикам конструкции	0,71	–

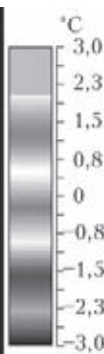


Рис. 8. Регистрация температурного поля с поверхности контролируемого объекта

Рис. 9. Прибор «ИТС-03-ПОТОК»

Из таблицы видно, что разработанная методика кроме исключения названных выше недостатков существующих технологий обеспечивает 2,5-кратное снижение погрешности результатов контроля.

Результаты исследования реализованы в приборе «Измеритель термического сопротивления ИТС-03-ПОТОК» (рис. 9).

Технические характеристики прибора

Время измерения термического сопротивления, ч	72
Погрешность измерения, %,	не более 8
Пределы измерения, Вт/град	0,3...5,0
Питание (аккумулятор или блок питания), В.....	12
Габаритные размеры, мм.....	160×80×30
Масса, г.	300

Выводы

Разработан объективный метод теплового (тепловизионного) контроля сопротивления теплопередаче многослойных строительных конструкций, позволяющий осуществлять обработку данных без участия оператора.

Оптимизированы режимы контроля по разработанной методике. Показано, что наименьшая погрешность результатов контроля достигается

при регистрации температурных историй в интервале 2,5–4 сут.

Проведена метрологическая аттестация методики контроля. Показано, что погрешность получаемых результатов (систематическая и случайная) не превышает 8,8.

Экспериментальные исследования методики в реальных условиях эксплуатации подтвердили результаты метрологической аттестации.

Разработан прибор, обеспечивающий в автономном режиме измерение термического сопротивления светопрозрачных и нестепрозрачных ограждающих конструкций без участия оператора-расчетчика.

1. ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. – Введ. 2.08.1984 г.
2. Будадин О. Н., Потапов А. И. и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М.: Наука, 2002. – С. 139–145.
3. Тепловой неразрушающий контроль зданий и строительных сооружений / О.Н.Будадин, Е.В.Абрамова, М.А.Родин, О.В.Лебедев // Дефектоскопия. – 2003. – № 5. – С. 77–94.
4. Сиденко В. Н., Грушко И. М. Основы научных исследований. – Харьков: Высш. шк., 1983. – 223 с.

An objective method of heat (thermal vision) monitoring of thermal resistance of multilayer building structures under real conditions of their service was developed for an objective assessment of rational use of energy resources and ensuring the validity of energy audit results. The method allows data processing without having to solve the inverse problems and practically without operator's participation. Modes of monitoring by the developed procedure were optimized. It is shown that the least error of testing results is achieved at recording the temperature histories over the period of 2.5 – 4 days. Metrological certification of testing procedure was performed. It is shown that the error of the obtained results (systematic and accidental) is not higher than 8.8%. ITS-03-POTOK instrument was developed, ensuring off-line automatic measurement of thermal resistance of translucent and non-translucent filling structures, This instrument was certified as measuring means. 4 References, 2 Tables, 9 Figures.

Key words: heat (thermal vision) monitoring, thermal resistance, heat transfer resistance, instrumented energy audit

Поступила в редакцию
26.06.2013

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АЭ ДИАГНОСТИКИ ЕМА-3.9

А.Я. НЕДОСЕКА¹, С.А. НЕДОСЕКА¹, М.А.ЯРЕМЕНКО¹, М.А.ОВСИЕНКО¹, Л.Ф.ХАРЧЕНКО¹,
Ю.А.СМОГОЛЬ¹, С.А.КУШНИРЕНКО²

¹ИЭС им Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Одесский припортовый завод. 65000, Одесса, а/я 304. E-mail: nktd@opz.odessa.ua

Рассмотрены наиболее важные характеристики программы ЕМА версии 3.9 и сопутствующих дополнительных программ, используемых при периодическом контроле и непрерывном мониторинге промышленных объектов. Описан усовершенствованный алгоритм обработки АЭ информации, позволяющий повысить ее достоверность. Представлены алгоритмы определения координат источников АЭ при произвольном расположении датчиков на линейных объектах, в том числе с применением матричной локации. Проанализирован алгоритм кластеризации, позволяющий проводить ее по любым параметрам с применением критериев фильтрации данных, что обеспечивает более эффективную отбраковку технологических шумов и детальный анализ информации. Реализована возможность автоматической коррекции установленных порогов амплитудной дискриминации через заданное время, что особенно важно при проведении постоянного АЭ мониторинга действующих конструкций. Реализована возможность трехмерного отображения цилиндрических объектов с указанием, в частности, уровня заполнения резервуаров. Реализованы графическое и табличное отображение распределений параметров АЭ по каналам и корреляции между каналами. Описана встроенная система программирования. Представленные новые возможности и особенности программного обеспечения ЕМА-3.9 позволяют расширить сферу использования систем семейства ЕМА при проведении АЭ диагностики самых различных промышленных изделий. Библиогр. 4, рис. 9.

Ключевые слова: система АЭ диагностики, формирование событий АЭ, кластеризация и фильтрация информации, локация событий АЭ, амплитудная дискриминация, встроенная система программирования

Обзорные материалы по программному обеспечению (ПО) систем акустико-эмиссионной (АЭ) диагностики ЕМА впервые были опубликованы в 2005 г. [1]. За это время на базе опыта практического применения систем, взаимодействия с пользователями и учета мирового опыта последовательно выполнялись модернизация и расширение возможностей ПО. При создании новых программ, расширении возможностей существующей версии программы изменяется номер версии при кардинальной смене базовых возможностей и их визуального представления в программе. В данной публикации рассмотрим наиболее важные особенности программы ЕМА версии 3.9 и сопутствующих дополнительных программ, используемых при периодическом контроле и непрерывном мониторинге промышленных объектов.

Отметим, что программа ЕМА-3.9, как и предыдущие версии, разработана в среде Microsoft Visual Studio 6 по требованиям Windows SDK, что обеспечивает ее работоспособность на базе всех существующих 32-разрядных операционных систем Microsoft для ПК, начиная с Windows 95 и заканчивая Windows 8, а также на 64-разрядных. Хотя программа и создавалась для работы с конкретным оборудованием [2], она является аппаратно незави-

симой и позволяет использовать измерительные АЭ системы различных производителей. Также предусмотрен так называемый пакетный режим обработки данных. Программа может быть вызвана из командной строки с именем обрабатываемого файла, при этом выполняется его фоновая обработка, что позволяет анализировать любые совместимые по формату данные, полученные с применением данного или стороннего ПО на АЭ системах различных типов.

Нумерация версии 3.9 выбрана, исходя из соображения, что оборудование АЭ диагностики четвертого поколения в данный момент находится в стадии окончательных доработок и тестирования. После полной интеграции ПО с указанным оборудованием модернизированная программа получит новый индекс. Выполненные после представления ЕМА-3.5 в 2005 г. усовершенствования и доработки позволяют говорить о принципиально новом программном продукте, поскольку изменились многие наиболее важные внутренние алгоритмы обработки данных и внешнее визуальное представление их.

Прежде всего за прошедший период проведено детальное исследование влияния методов обработки акустико-эмиссионной информации



на формирование АЭ событий и определение их координат [3]. В частности, показано, что существуют два основных подхода к формированию событий АЭ на основе пришедших на датчики и вызвавших их срабатывания сигналов:

- включать в событие все срабатывания датчиков АЭ, зарегистрированные в установленный достаточно малый, промежуток времени;
- включать в событие фиксированное число срабатываний датчиков АЭ на основании заранее заданного признака.

Рекомендуется использовать в системах АЭ контроля оба варианта формирования событий [3]. Для этого в программе создан усовершенствованный алгоритм, обеспечивший управляемый набор АЭ данных в события с регулируемым пользователем признаками. Временной период, за который происходит объединение срабатываний в событие, задается так называемым стробом (также используется название «мертвое время») – интервалом времени, в течение которого все срабатывания датчиков АЭ,

зарегистрированные данной локационной антенной, считаются относящимися к одному и тому же физическому событию. Использование измененного способа формирования событий в режиме реального времени позволило, в частности, повысить точность локации источников АЭ при неравномерном расположении датчиков на поверхности контролируемых объектов при линейной локации. Алгоритм прошел опытное тестирование в лабораторных условиях на Одесском припортовом заводе при контроле трубопроводов Киевской теплосети и др. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1. Следует отметить, что при зонной локации события формируются из единичных срабатываний отдельных датчиков, что и нашло отражение в приведенной блок-схеме.

В программе ЕМА-3.9 объединены интерфейсы настройки процессов кластеризации и фильтрации АЭ данных с одновременным расширением их возможностей. До настоящего времени основным алгоритмом кластеризации предусма-

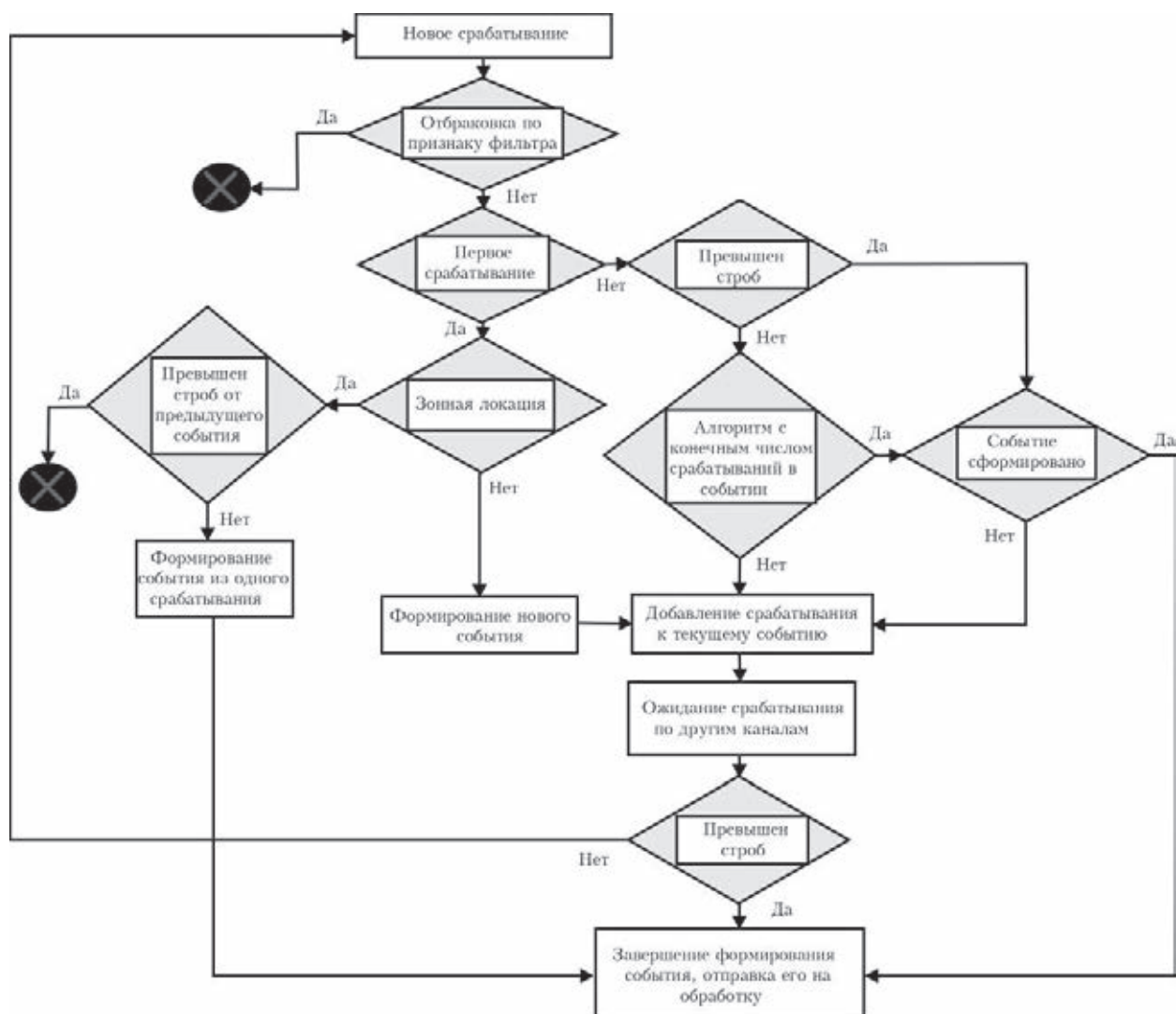


Рис. 1. Блок-схема формирования событий в программе ЕМА-3.9

травалось создание кластеров, в которые события объединяли по координатному признаку.

Созданный новый алгоритм кластеризации позволяет выбрать любую комбинацию следующих признаков, характеризующих сигнал АЭ: координата, амплитуда, время нарастания, длительность, число осцилляций, скорость, частота, энергия, уровень шума. Это дало возможность более детального проведения классификации обнаруженных дефектов и анализа АЭ информации в целом. Полученные события АЭ можно фильтровать по тем же признакам, по которым проводится их кластеризация.

Критерии фильтрации параметров задаются минимальным и максимальным значениями. Совместное использование нескольких полос фильтрации и объединения по требуемым параметрам в кластеры обеспечивает более эффективную отбраковку технологических шумов и детальный анализ информации. Программа обеспечивает выбор между фильтрацией параметров на входе, с отсечением ненужной информации, и фильтрацией, выполняемой после формирования событий. Применение этих алгоритмов на практике показало, что полезными являются обе возможности, но первой следует отдать предпочтение, поскольку сокращается, иногда весьма существенно, объем сохраняемых и обрабатываемых данных.

Использование нового алгоритма формирования событий АЭ позволило создавать матрицу задержек сигналов АЭ при линейной локации. Ранее линейная локация всегда выполнялась по расчетному алгоритму. Локация на основе матрицы задержек позволяет минимизировать ошибки и исключить попадание координат событий в недопустимую область. Алгоритм реализован для всех используемых в программе типов линейных локационных антенн. Создание матрицы происходит на основе заранее определенной скорости распространения звука в материале, при изменении заданной скорости происходит автоматический пересчет матрицы, на основе которой затем определяются координаты событий АЭ.

Проведенная модернизация потребовала изменения формата файлов настроек ЕМА-3.9 с сохранением совместимости (старые файлы могут быть прочитаны и использованы новыми версиями программы). Учитывая, что настройки сохраняются также и в файлах результатов испытаний, данное изменение относится и к ним. Окна настройки программы ЕМА-3.9 содержат новый интерфейс с общей таблицей ввода параметров для кластеризации и фильтрации (рис. 2). Изменения можно выполнять в реальном времени как при настройке, так и при проведении реальных испытаний или непрерывного АЭ мониторинга.



Рис. 2. Задание свойств антенны в окне точной настройки программы ЕМА-3.9 (в центральной части окна – таблица с задаваемыми параметрами фильтрации и кластеризации)

Вкладка «Свойства антенны» позволяет установить полосовые цифровые фильтры для таких параметров событий АЭ, как длительность, число осцилляций, время нарастания сигнала до максимума, амплитуда АЭ, средняя частота сигнала и др. Устанавливают верхнюю и нижнюю границы полосы. Для включения и выключения фильтра выделяют мышью соответствующие поля в левой колонке таблицы. Если локационная антенна АЭ поддерживает режим матричной локации (для линейных, плоскостных и цилиндрических антенн), в окне можно изменять параметры матрицы в реальном времени. Это отражается на обработке событий АЭ и расчете их координат.

Выбор одного из трех флажков в правой части окна определяет способ формирования событий:

- ограничивает формирование неполных событий по заданному признаку. Обычно для линейных локационных антенн таким признаком является срабатывание не менее двух датчиков АЭ, для плоскостных – не менее трех. Увеличение значения данного признака уменьшает число регистрируемых событий, но повышает достоверность их формирования;

- позволяет задействовать алгоритм формирования событий по фиксированному числу срабатываний. При этом срабатывания по большему числу каналов, пришедшие в течение времени строка, к событию не добавляются;

- отслеживает порядок срабатываний с точки зрения их логической последовательности. При большом числе событий позволяет отбраковать многие из них, при малом – снятие данного флажка позволит увеличить их число.

Одной из особенностей ПО систем ЕМА является работа не только с акустической, но и технологической информацией, которая вводится в систему в виде так называемых низкочастотных (НЧ) параметров: нагрузки, давления, деформации, температуры и т.д.

Тарировка низкочастотных параметров для правильной интерпретации их числовых значений имела уже в ранних версиях ЕМА-3. К настоящему времени добавлена возможность настройки



коэффициентов и тарировочных функций непосредственно в процессе проведения измерений. Изменения отображаются на графиках реального времени, что позволяет быстро подобрать необходимый вид тарировки. Кроме того, в случае невозможности введения в систему какого-то из НЧ параметров электрическим или программным способом, предусмотрен ручной ввод и экстраполяция НЧ. Добавлена возможность ввода текущего значения низкочастотных параметров и обратной их экстраполяции в процессе проведения измерений. Это позволяет получить ступенчатую или представленную наклонными отрезками кривую изменения низкочастотного параметра, например, текущего давления.

Расширены возможности обработки данных АЭ, в частности:

- расчет активности АЭ и времени отсутствия активности – «тишины»;
- расчет распределения параметров сигналов по отдельным АЭ каналам;
- расчет корреляции непрерывной АЭ по отдельным каналам;
- расчет локальной скорости звука для каждого зарегистрированного события АЭ.

Реализована возможность автоматической коррекции установленных порогов амплитудной дискриминации через заданное время. Указанная доработка очень важна для автономной работы системы во время мониторинга, так как позволяет вовремя реагировать на изменения акустического фона без вмешательства оператора.

Существенно переработан общий интерфейс программы.

Изменена цветовая гамма основных окон и панели инструментов. Менее яркие цвета обеспечивают лучшую эргономику. Более крупные надписи облегчают читаемость информации. Вместо манипуляторов для изменений размеров частей экрана используются стандартные разделители по аналогии с Проводником Windows.

Для окон анализа данных, точной настройки и графиков реального времени введен режим регулируемой прозрачности, что позволяет при работе просматривать информацию за ними.

В верхней части основного окна программы расположена программируемая информационная строка с возможностью анимации текста. Новый интерфейс основного окна содержит область с закладками, доступ к которым имеется постоянно. Выбор закладки обеспечивает переход в одно из наиболее часто используемых окон программы – информации, испытаний, графического редактора. Это обеспечивает также возможность просмотра информации и построения графиков с заданными параметрами непосредственно в процессе проведения испытаний.

Окно информации содержит новую область – график, который отображает табличные данные из списка окна информации. При выборе другого содержания списка график автоматически обновляется. Каждый из представленных в списке параметров может быть представлен на графике или отключен. Имеется выбор типа графика – точечный, столбчатый, линейный, ступенчатый. Положение графика и его размер являются настраиваемыми. Возможно также отключение графика, в этом случае окно информации выглядит как в предыдущих версиях программы.

Расширена отображаемая информация о событиях АЭ. Каждое срабатывание датчика (рис. 3) при табличном анализе содержит информацию о событиях АЭ, к которым оно было отнесено (если срабатывание не было отнесено ни к одному событию, то указываются признаки, по которым произошла отбраковка). В случае отбраковки событий в соответствующей таблице указываются критерии, по которым она проводилась. Добавлены также сведения о частоте, энергии события и расчетной локальной скорости звука в материале.

Рассмотренные доработки вместе с возможностью графического отображения, сортировки и фильтрации списка позволяют существенно расширить информативность системы и проводить сложный комплексный анализ полученных данных. Кроме того, допущенные оператором при настройке системы ошибки могут быть легко обнаружены и исправлены.

Существенно повышена информативность окна испытаний. В левой области экрана изменено представление данных. Теперь данные по текущим значениям НЧ и АЭ параметров сведены в таблицу, обновляемую в режиме реального времени при испытаниях и компьютерном повторе. Таблица АЭ параметров показывает, сколько событий АЭ зарегистрировано по каждой антенне, сколько создано кластеров и сколько событий отнесено к имеющимся кластерам.



Рис. 3. Окно информации программы ЕМА-3.9 с данными о срабатываниях датчиков (в нижней части окна – график, где в качестве отображаемых параметров выбраны длительность срабатывания и средняя частота)

Экран локации в новой версии обеспечивает вывод как всех используемых при проведении АЭ контроля локационных антенн одновременно, так и, по желанию пользователя, нужной антенны (рис. 4). Для повышения наглядности в местах формирования АЭ событий появляется вспышка. Данная опция может быть, как и мигание датчиков при индикации события, отключена пользователем.

Реализована возможность отображать, по желанию, цилиндрические объекты контроля в трехмерном отображении, с настройкой сетки, цветов и других визуальных параметров (рис. 5). Отдельно отметим возможность автоматического поворота цилиндра к месту с наибольшей АЭ активностью и отображение линии уровня заполнения резервуара жидкостью.

Добавлена возможность отображения в реальном времени текущей активности АЭ, представляющей собой отношение количества событий к временному интервалу их поступления, и времени, в течение которого информация не поступала.

Оптимизирована работа и расширены возможности настройки графиков реального времени. При построении столбчатых и точечных графиков данные добавляются только при появлении новых событий. Имеется возможность выноса графиков реального времени из окна испытаний в отдельное окно и обратно. Для графиков также предусмотрена настройка цвета, шрифта, сетки, наименований отображаемых параметров и интервала обновления.

Полностью изменен интерфейс построения пользовательских графиков.

В окне графического редактора создана специальная область для управления графиками (рис. 6). Это позволяет выполнять функции, ранее выполняемые при помощи мастера графиков, непосредственно в окне редактора, что упрощает и ускоряет процесс создания и изменения графиков. Если тип графика изменять не требуется, его построение выполняется про-

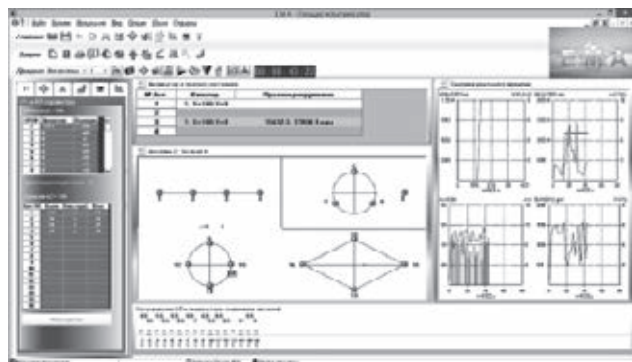


Рис. 4. Окно испытаний программы ЕМА-3.9 с отображением четырех локационных антенн (над экраном локации – область прогноза разрушения; слева – таблицы АЭ и НЧ данных, справа – графики реального времени; под экраном локации – значение непрерывной эмиссии)

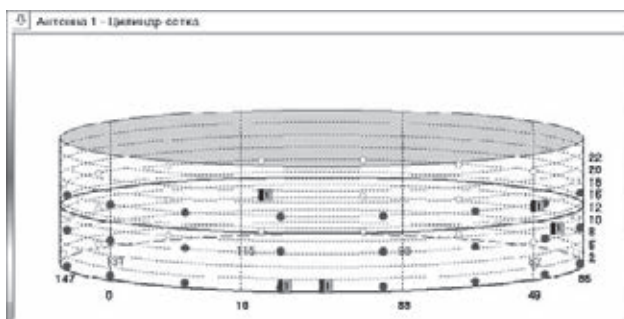


Рис. 5. Экран отображения трехмерного цилиндра в окне испытаний при контроле резервуара. Показаны три ряда установленных датчиков АЭ, кластеры с координатами источников АЭ и линия уровня налива жидкости

стым нажатием кнопки, что существенно сокращает время выполнения данной операции. Добавлена возможность выбора пользовательского цвета по шкале RGB. Установка цвета выполняется ползунковыми регуляторами, выбор цвета – щелчком мыши в специальной области.

В программе добавлены ранее не использовавшиеся возможности анализа данных – распределение значений параметров АЭ по каналам и корреляция между каналами. Созданное для этого новое окно анализа данных содержит вкладки для просмотра и настройки анализа в графическом виде. В реальном времени доступно автообновление текущего экрана с заданным интервалом.

Окно анализа данных предназначено для просмотра и дополнительного анализа получаемых АЭ данных, в том числе с возможностью автоматического обновления в реальном времени. Оно состоит из трех основных экранов. Переключение экранов выполняется при помощи кнопок панели инструментов. Экран 1 (см. рис. 6) содержит данные по кластерам, во многом аналогичен данным в окне информации, позволяет просмотреть по кластерам выбранной антенны данные событий АЭ и относящихся к ним срабатываний датчиков. Экран 2 (рис. 7) позволяет выбирать и сравнивать данные по отдельным каналам АЭ в виде распределения параметров.

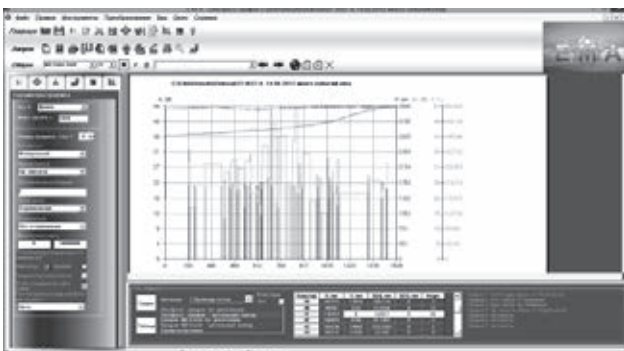


Рис. 6. Окно построения графиков программы ЕМА-3.9, совмещенное с графическим редактором (в левой части окна – выбор числа и типа графиков, в нижней – выбор отображаемых на графике данных)

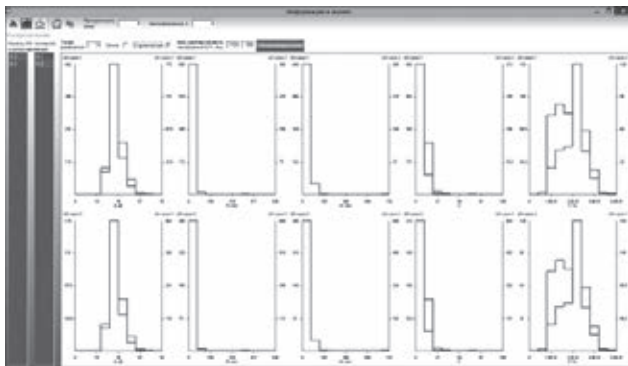


Рис. 7. Окно анализа данных программы ЕМА-3.9 с графиками распределений данных АЭ по каналам

На каждом графике могут быть представлены данные двух каналов АЭ. В ряду графиков для канала представлены результаты распределения для пяти параметров: амплитуда A , райс тайм R , длительность W , число осцилляций C , частота F .

Принцип построения графиков следующий:

- каналы АЭ № 1 и № 2 для каждой серии графиков горизонтального ряда можно выбрать в списке слева;
- весь диапазон значений отображаемого параметра, зарегистрированных в процессе измерения, разбивается на полосы в соответствии со значением текстового поля «число точек разбиения»;
- по оси ординат откладывается значение параметра в данной полосе (максимум), по оси абсцисс – число вхождений параметра.

Для графиков предусмотрен выбор типа графика (столбчатый или ступенчатый), отображение–скрытие сетки. При большом числе рядов графиков отображение может быть слишком мелким, поэтому предусмотрено изменение размеров рабочей области заданием высоты и ширины.

Экран 3 отображает столбчатый график корреляции заданного числа данных непрерывной АЭ для выбранного канала с остальными каналами (рис. 8).

Выбор данных осуществляется вводом в текстовое поле «Точек», а также при помощи флажков «Все», «Последние» и ползункового регулятора «Начать с».

Под каждым столбиком отображается номер канала, для которого рассчитывалась корреляция с выбранным в списке, над столбиком показан коэффициент корреляции.

При установке ненулевого значения в поле «Автообновление» текущий экран окна анализа данных будет обновляться в реальном времени с указанным в поле интервалом.

Опыт эксплуатации систем ЕМА на производстве, в том числе в режиме непрерывного мониторинга, показал, что одной из наиболее важных задач является автоматизация повторяющихся и трудоемких операций. Ряд представленных выше программных средств решает некоторые частные вопросы автоматизации. К сожалению, далеко не

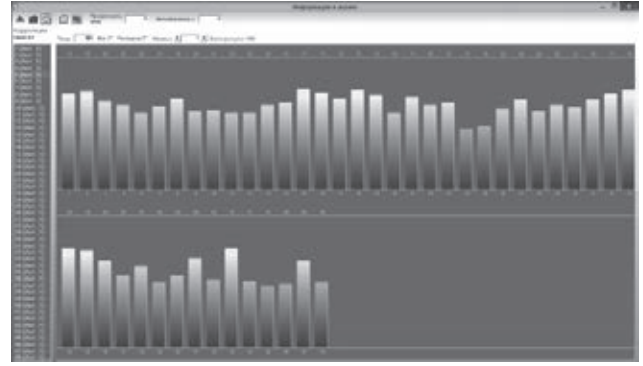


Рис. 8. Окно анализа данных программы ЕМА-3.9 с графиками корреляции шумов по каналам

всегда очевидно заранее, какие именно операции придется автоматизировать, исходя из разнообразия объектов контроля, условий их эксплуатации и возникающих пожеланий персонала, эксплуатирующего системы.

В связи с этим было принято решение создать наиболее универсальное средство автоматизации – расширение возможностей программы без изменения внутренней ее структуры за счет добавляемых динамически программных модулей. Такая система расширения функциональности используется, в частности, в программном пакете MSOffice (рис. 9).

Программа ЕМА версии 3.9 оснащена встроенной системой программирования. Программы могут выполняться непосредственно в окне программирования с выводом в окно отладки. Также они могут быть встроены в основной алгоритм программы, изменяя стандартные процедуры ЕМА-3.9 тремя способами:

- в начале предопределенного события;
- вместо предопределенного события;
- по завершении предопределенного события.

Задание обработчиков событий создается в окне конфигурации, на вкладке «Программиро-



Рис. 9. Окно конфигурации программы ЕМА-3.9 с настройкой событий, обрабатываемых пользовательскими программами



вание». Программы пишутся на языке VBScript и хранятся в файлах с расширением «.bas».

Язык VBScript соответствует спецификации, созданной компанией Microsoft, справка по языку доступна на сайте компании. Окно программирования содержит в верхней области информацию об объектах и их свойствах, доступных программе. В качестве таких объектов, в частности, выступают результаты измерений, настройки программы и ряд ее компонентов, включая основные рабочие окна.

Справа от браузера объектов расположена область их свойств, методов и событий, ниже перечисляются, если они имеются, параметры процедур. Далее находится область редактора программного кода, справа от нее окно вывода, куда можно направить выходные строковые данные командой «Output». Кнопка «Очистить окно» стирает выведенные данные. Кнопка «Поиск» позволяет найти в редакторе кода необходимый набор символов. Поиск выполняется от текущей позиции до конца текста, циклический возврат в начало не предусмотрен. В окне отладки отображаются ошибки программного кода с указанием строки, номера и описания ошибки.

Командная строка позволяет вызывать команды на языке VBScript и процедуры, написанные в окне кода. Для запуска команды или процедуры необходимо ввести в командной строке ее имя и нажать клавишу «Enter».

Если в окне конфигурации был задан пользовательский обработчик события, основной код соответствующей программы ЕМА-3.9 будет заменен на пользовательский, который будет выполняться при каждом возникновении соответствующего события. Таким образом, создана возможность дополнительного анализа обрабатываемых данных или же полностью альтернативной их обработки. В частности, можно полностью изменить механизм формирования событий, расчета их координат, особенности вывода на экран, табличного и

графического представления и т.д. Это не только расширяет функциональность программы, но и дает возможность экспериментировать с обработкой данных, расширяя накопленный научный и практический опыт [4], который, несомненно, пригодится при создании последующих версий программного обеспечения.

Отметим, что ряд выполненных перечисленных выше разработок и модернизаций является результатом тесного взаимодействия разработчиков систем АЭ контроля и мониторинга различных модификаций с их пользователями, выполнения совместных исследований и анализа возникших при этом замечаний и предложений.

Выводы

Представлены новые возможности и особенности программного обеспечения ЕМА-3.9 для систем АЭ диагностики.

Выполненные разработки и модификации, включая изменения в обработке данных, интерфейсе, информативности и средствах автоматизации выполняемых задач, позволяют повысить эффективность применения систем АЭ диагностики с программным обеспечением ЕМА-3.9, расширить сферу перспективных лабораторных исследований, развить потенциал их промышленного применения.

1. Недосека С. А., Недосека А. Я. Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2005. – № 3. – С. 20–26.
2. Приборы для акустико-эмиссионного контроля и диагностирования сварных конструкций / А.Я.Недосека, С.А.Недосека, А.А.Грузд и др. // Автомат. сварка. – № 8. – 2010. – С. 58–61.
3. Недосека С. А., Недосека А. Я., Овсиенко М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 2. – С. 5–14.
4. Опыт ИЭС им. Е.О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека и др. // Там же. – 2012. – № 1. – С. 7–22.

The paper deals with the most important characteristics of EMA program, version 3.9, and associated additional programs used in periodical testing and continuous monitoring of industrial facilities. An improved algorithm of AE data processing, allowing improvement of data validity, is described. Algorithms of determination of AE source coordinates at random arrangement of transducers on linear objects, in particular those with application of matrix location, are presented. Clusterization algorithm is analyzed, which allows conducting it by any parameters with application of data filtration criteria that ensures a more efficient elimination of technological noise and detailed analysis of data. Capability of automatic correction of set thresholds of amplitude discrimination after the preset time is realized that is particularly important during performance of continuous AE monitoring of structures in service. Capability of 3d representation of cylindrical objects is realized, with indication, in particular, of the level of tank filling. Graphic and table representation of AE parameters distribution along the channels and interchannels correlation are realized. Built-in programming system is described. The presented new capabilities and features of EMA-3.9 software will allow widening the sphere of application of EMA family systems during performance of AE diagnostics of the most diverse industrial items.

Key words: AE diagnostic system, AE event formation, data clusterization and filtration, AE event location, amplitude discrimination

Поступила в редакцию
03.04.2013



МЕТОДОЛОГІЯ БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

М.О.КАРПАШ

Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу. 76019, вул. Карпатська, 15. E-mail: public@nund.edu.ua

Завдання забезпечення промислової безпеки в умовах зростаючого фізичного та морального зношення обладнання на небезпечних виробничих об'єктах України зумовлює підвищення ролі методів і засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики. Використання обладнання нафтохімічних, нафтопереробних промислів, об'єктів теплової та ядерної енергетики, яке працює із вибухо- та пожежонебезпечними і токсичними середовищами при надлишкових тисках та температурах, строк експлуатації якого значно перевищує нормативний, є потенційно небезпечне і збільшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Ресурс безпечної експлуатації металоконструкцій визначається в тому числі фізико-механічними характеристиками металу. Враховуючи сказане вище, визначення механічних характеристик конструкційних сталей та ступеню їх зміни, є важливою та актуальною науково-практичною задачею. В статті подано підхід до вирішення задач визначення параметрів, що характеризують технічний стан металоконструкцій довготривалої експлуатації на прикладі газопроводів. Запропоновано підхід до розроблення методів контролю цих характеристик, що полягає у врахуванні кількох інформативних параметрів за допомогою штучних нейронних мереж, а також визначено напрямки застосування методології для контролю технічного стану трубопроводів (товщина стінки, наявність дефектів типу порушення суцільності, фізико-механічні характеристики та тип мікроструктури). Бібліогр. 22, рис. 6.

Ключові слова: технічна діагностика, трубопроводи, багатопараметровий підхід, нейронні мережі, нелінійна апроксимація

Нарощування обсягів видобування як традиційних (нафти та природного газу) та нетрадиційних вуглеводневих енергоносіїв (сланцевий газ, шахтний метан тощо), що є одним з пріоритетів Енергетичної стратегії України до 2030 р. неможливе без розвитку та підтримання у належному технічному стані розгалуженої мережі трубопровідного транспорту.

На фоні незадовільного фінансового стану нафтогазової галузі загрозливою залишається ситуація з основним устаткуванням – до 29 % газопроводів відпрацювали свій амортизаційний термін, майже 60 % експлуатуються від 10 до 33 років, майже третина із 703 газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій виробила свій моторесурс, або близька до цього і потребує реконструкції.

Розподіл причин відмов газопроводів, %

Зовнішній вплив	48,4
Дефекти будівництва/дефекти матеріалу	16,7
Корозія	16,1
Рухи ґрунту	7,4
Помилкові врізки	4,8
Інше та невідоме	6,6

На жаль, відомості про технічний стан вітчизняних газопроводів в останні роки, їх аварійність та статистику надзвичайних ситуацій відсутні у широкому доступі, тому скористаємось

європейським досвідом тривалого й безпечного експлуатування газопроводів за даними Європейської групи щодо надзвичайних ситуацій на газових трубопроводах (EGIG) [1].

EGIG підтримує та постійно розширює базу даних щодо надзвичайних ситуацій на газовому транспорті в Європі. Газотранспортні компанії з п'ятнадцяти Європейських країн збирають відомості про надзвичайні ситуації на трубопроводах із загальною довжиною понад 135 тис. км щороку. Загальна середня частота надзвичайних ситуацій складає 0,35 надзвичайних ситуацій за 1 рік на 1000 км в межах періоду часу з 1970 по 2010 роки, а середнє значення надзвичайних ситуацій за 5 останніх років в 2010 р. склало 0,16 за 1 рік на 1000 км.

На рис. 1 зображено розподіл зовнішніх впливів за товщинами стінок та характерними дефектами трубопроводів – очевидно, найбільш чутливими до зовнішніх впливів є труби з меншою товщиною стінки, а саме 5 мм.

На рис. 2 зображено сукупний розподіл дефектів спорудження/матеріалів за роками будівництва газових трубопроводів.

Аналіз узагальнених даних щодо статистики відмов нафтогазопроводів дає змогу встановити наступні істотні чинники:

– найбільша інтенсивність відмов спостерігається для тонкостінних та трубопроводів довготривалої експлуатації;

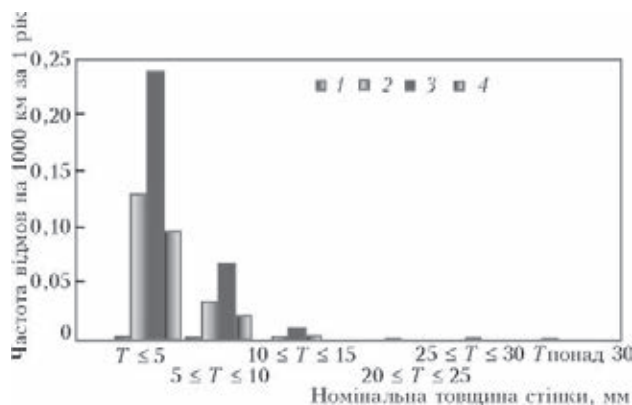


Рис. 1. Розподіл зовнішніх впливів за розмірами витоків і товщиною стінки (T) трубопроводів: 1 – невідомо; 2 – точковий отвір/тріщина; 3 – отвір; 4 – руйнування

– корозійні пошкодження є причиною значної кількості відмов на трубопровідному транспорті;
– існують проблеми із визначенням фактичних розмірів дефектів, їх типів з метою оцінки ступеня їх небезпечності для експлуатації трубопроводів.

Підсумовуючи наведені статистичні відомості можна також стверджувати, що невідповідність фактичних фізико-механічних характеристик матеріалу трубопроводів є серед причин механічних пошкоджень, руйнувань тощо.

Світовою практикою доведено, що одним із найефективніших методів забезпечення експлуатаційної надійності обладнання, конструкцій та матеріалів є широке впровадження нових науково-містких технічних засобів і технологій оцінки їх фактичного технічного стану методами неруйнівного контролю (НК) і технічної діагностики (ТД).

Проблеми ТД систем трубопровідного транспорту, зокрема прогнозування залишкового ресурсу, навіть за значного поширення різних технічних засобів НК та низку нормативних документів, що регламентують порядок робіт в цій сфері, не можуть бути вирішені ефективно без застосування сучасних і, в той же час, доступних технологій та інструментів урахування окремих інформативних параметрів для визначення цільових (шуканих) характеристик.

У даному випадку інформативними параметрами є параметри, що можуть бути визначені методами НК (швидкість поширення ультразвукових коливань, акустичний імпеданс, питомий електричний опір тощо), а типовими цільовими параметрами технічного стану трубопроводів є дійсні фізико-механічні характеристики, наявність (відсутність) чи розмір дефектів типу порушення суцільності, залишкова товщина стінки металоконструкцій. Додатково, також за можливості визначення цих цільових параметрів з достатньою точністю та достовірністю, можливо перейти до визначення ступеня їх змі-

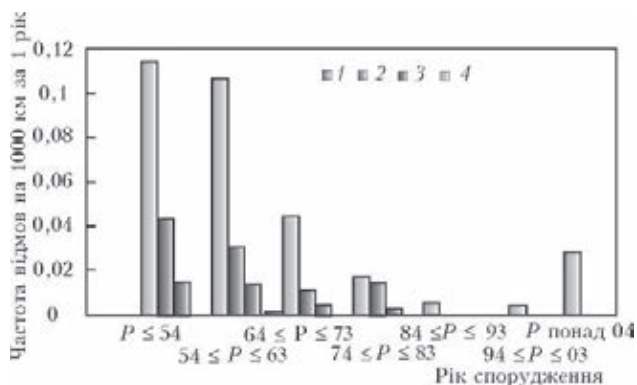


Рис. 2. Розподіл дефектів матеріалу/спорудження за розмірами витоків та роками будівництва (P) газопроводів (позначення ті самі, що і на рис. 1)

ни (деградації) з метою оцінки залишкового ресурсу, оцінки ризиків тощо. Схематично цю проблему зображено на рис. 3.

Окрім того, у багатьох випадках було показано наскільки недосконалими є методи контролю технічного стану трубопроводів за окремими параметрами. У роботах [2, 3] показано, що найбільш прийнятним вирішенням цієї ситуації є застосування багатопараметрового (комплексного) контролю технічного стану.

Зазначена вище проблема у сфері ТД характеризується наступними особливостями, які необхідно врахувати під час її вирішення:

- переважна нелінійність зв'язків між інформативними параметрами та цільовими характеристиками;
- значення інформативних параметрів і цільових характеристик можуть різнитись за точністю, достовірністю та ступенями довіри;

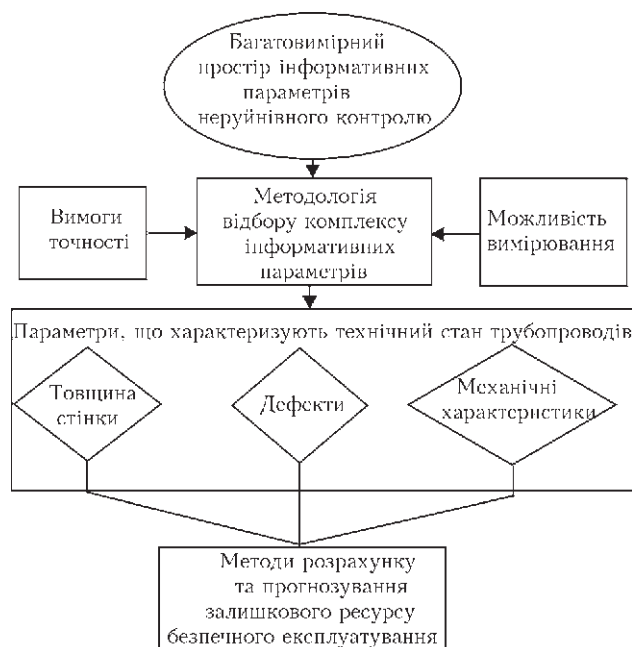


Рис. 3. Проблема методології підбору комплексу інформативних параметрів контролю технічного стану трубопроводів



- можливі комплекси інформативних параметрів можуть бути взаємнокорельованими;
- точність визначення цільових параметрів технічного стану об'єктів є критичною щодо розрахунку та прогнозування ресурсу їх безпечної експлуатації і вибору оптимальних режимів експлуатування.

Істотними чинниками, які необхідно врахувати для вирішення зазначеної проблеми, є відсутність аналітичного (формульного) зв'язку між інформативними параметрами, що можуть бути визначені сучасними засобами контролю та цільовими характеристиками, що визначають безпечність експлуатації металоконструкції; складність оцінки сукупного та індивідуального впливу інформативних параметрів на характеристики технічного стану досліджуваних об'єктів; відсутність методології підбору комплексу інформативних параметрів, у тому числі нових, використовуваних для вирішення конкретних завдань ТД та НК.

Найбільшу складність вирішення цієї проблеми становить сам вибір інформативних параметрів. Зазначимо, що методи кластеризації та методи вибору інформативних параметрів із сукупності вихідних в останні роки широко використовуються для інтелектуального аналізу даних [4, 5], що характеризуються складністю застосування на практиці та відсутністю доведеного досвіду використання в нафтогазовій промисловості.

Вибір ознак (інформативних параметрів) є у загальному випадку багатоекстремальним. Більшість відомих алгоритмів не дають можливості досягнути глобального екстремуму – найбільш оптимального комплексу інформативних параметрів, які б дали змогу визначати цільовий параметр із задовільною точністю.

Залежно від способу побудови алгоритму, що задає послідовність проходження вершин у багатовимірному просторі інформативних параметрів, методи вибору можна розділити на наступні групи: послідовне перебирання варіантів [6], випадковий пошук та його модифікації [7], комбіновані методи [8], генетичні методи, що є узгодженою сукупністю методів комбінаторики та випадкового пошуку [9].

Раніше [10] автором запропоновано використовувати новітні генетичні методи для вирішення зазначеної вище проблеми в галузі ТД та НК – алгоритми штучних нейронних мереж [11].

Крім того, вибір штучних нейронних мереж було зроблено на підставі глибокого аналізу їх переваг.

1. Нелінійність. Нейронні мережі, побудовані зі з'єднань нелінійних нейронів, самі є нелінійними. Більше того, ця нелінійність особливою виду, оскільки вона розподілена по мережі. Нелінійність є надзвичайно важливою властиві-

стю, особливо, якщо фізичне явище, що відповідає за формування вхідного сигналу, також є нелінійним.

2. Перетворення вхідної інформації на вихідну. Однією з популярних парадигм навчання є навчання «з учителем»: передбачається зміна синаптичних вагових коефіцієнтів на основі набору навчальних прикладів. Кожен приклад складається зі вхідного сигналу та відповідної йому бажаної відповіді. Із цієї множини випадково вибирається приклад, а нейронна мережа модифікує синаптичні вагові коефіцієнти для мінімізації розходжень бажаного вихідного сигналу та сформованого мережею відповідно вибраного статистичного критерію – навчання проводиться до тих пір, поки зміни синаптичних ваг не стануть незначними. Таким чином, нейронна мережа навчається на прикладах, складаючи таблицю відповідностей вхід-вихід для конкретного завдання [12].

3. Адаптивність. Нейронні мережі володіють здатністю адаптувати свої синаптичні ваги до змін середовища. Зокрема, нейронні мережі, навчені діяти в певному середовищі, можна легко перевчити для роботи за незначних коливань параметрів середовища. Відомо, що чим вищі адаптивні здібності системи, тим стійкішою буде її робота в нестаціонарному середовищі, що цілком ймовірно в разі вимірювання параметрів НК. Для того, щоб використовувати усі переваги адаптивності, основні параметри системи повинні бути досить стабільними, щоб можна було не враховувати зовнішні перешкоди, і достатньо гнучкими для забезпечення реакції на істотні зміни середовища – ця проблема називається дилемою стабільності-пластичності [13].

4. Очевидність відповіді. У контексті завдання класифікації образів можна розробити нейронну мережу, що збирає інформацію не тільки для визначення конкретного класу, але і для збільшення достовірності рішення, що приймається. Згодом ця інформація може використовуватися для відхилення сумнівних рішень, що підвищить продуктивність нейронної мережі.

5. Контекстна інформація. Знання представляються в самій структурі нейронної мережі за допомогою її стану активації. Кожен нейрон мережі потенційно може зазнавати впливу всіх інших її нейронів. Як наслідок, існування нейронної мережі безпосередньо пов'язано з контекстною інформацією.

6. Відмовостійкість. Нейронні мережі, відтворені у формі електроніки, потенційно є відмовостійкими. Це означає, що за несприятливих умов їх продуктивність знижується не значно – тільки серйозні пошкодження структури нейронної мережі істотно вплинуть на її працездатність,

а зниження якості роботи нейронної мережі відбувається повільно [14].

8. *Однаковість аналізу та проектування.* Нейронні мережі є універсальним механізмом опрацювання інформації. Це означає, що одне і те ж проектне рішення нейронної мережі може використовуватися в багатьох предметних областях – в тому числі для вирішення різних завдань НК та ТД.

9. *Аналогія з нейробиологією.* Будова нейронних мереж визначається аналогією з людським мозком, який є живим доказом того, що відмовистійкі паралельні обчислення не тільки фізично реалізовані, але і є швидким і потужним інструментом вирішення завдань.

На підставі виконаного аналізу досвіду та можливостей алгоритмів штучних нейронних мереж було розроблено методологію відбору оптимального комплексу інформативних параметрів, що характеризують технічний стан трубопроводів і полягає у послідовному виконанні наступних кроків (рис. 4). Розглянемо порядок та особливості реалізації описаних кроків у загальному випадку.

Крок 1. Відбір множини інформативних параметрів, керуючись цільовими параметрами. Основний вплив на відбір множини інформативних

параметрів контролю має досвід дослідника, а також нормативні документи, що регламентують вимоги до матеріалів, процесу виробництва сировини та готових виробів, їх експлуатування й технічного діагностування. При цьому важливо враховувати фізичну сутність цільового параметра і вимоги щодо точності, достовірності та можливості вимірювання інформативних параметрів у польових умовах та упродовж тривалого терміну.

На цьому етапі необхідно також забезпечити достатній статистичний розкид інформативних та цільових параметрів. Для цього можливо скористатись доступними базами даних, математичними моделями, результатами, одержаними іншими дослідниками чи нормативними документами.

За випадків, коли кількість інформативних параметрів не є достатньою для забезпечення відповідності встановленим вимогам до точності чи достовірності, варто розглянути доцільність пошуку нових параметрів за допомогою цієї методології шляхом включення їх до відібраної множини. Кількість цільових параметрів, що характеризують технічний стан об'єктів, рекомендовано обирати рівну 1, а запропоновану методологію застосовувати для кожного іншого цільового параметра згідно з нижче наведеними

кроками.

Наприклад, для труб нафтогазопроводів цільовими параметрами є товщина стінки труби, дефекти порушення суцільності (тріщини), фізико-механічні характеристики (межа плинності/міцності, ударна в'язкість) тощо.

Крок 2. Кореляційно-регресійний аналіз використовується для визначення необхідності введення тих чи інших чинників до рівнянь регресії, а також для оцінки одержаних рівнянь регресії.

При цьому розраховують таблицю коефіцієнтів кореляції, а за ними визначають наявність та ступінь зв'язку між елементами відібраної множини інформативних параметрів та цільовим параметром. Додатні значення коефіцієнтів кореляції вказують на прямопропорційний зв'язок, тоді як від'ємні – на обернений. Слід зазначити, що в більшості випадків на практиці коефіцієнти кореляції не досягають значень близьких до 1. Як правило, значення, що перебувають в межах від 0,4 до 0,8, вказують не на відсутність зв'язку між досліджуваними



Рис. 4. Послідовність реалізації методології відбору оптимального комплексу інформативних параметрів



характеристиками, а на його нелінійний характер. Рекомендується у таких випадках або поділити чи звузити діапазон значень інформативних параметрів, або виконати графоаналітичний аналіз.

Крім того, рекомендується враховувати наступні обмеження кореляційного аналізу:

- необхідність застосування якнайбільшої кількості спостережень для дослідження. Вважається, що кількість спостережень повинна не менше, ніж в 5-6 разів перевищувати кількість чинників впливу. Якщо кількість спостережень перевищує кількість чинників у десятки разів, в дію може вступити закон великих чисел, який забезпечує взаємну компенсацію випадкових коливань [15];

- необхідно, щоб сукупність значень усіх інформативних та цільових параметрів підпорядковувалась багатовимірному нормальному розподілу [16];

- сам факт кореляційної залежності не надає підстав стверджувати, що одна зі змінних переважає чи є причиною змін, або те, щоб змінні взагалі причинно пов'язані між собою, а не спостерігається вплив третього чинника [17].

Таким чином, результати кореляційного аналізу можуть допомогти відкинути відразу інформативні параметри, що ніяким чином не пов'язані з цільовим і вказати на можливий нелінійний характер залежності.

Крок 3. Формування та підготовка наборів комплексів інформативних параметрів. Як було зазначено вище, на цьому етапі особливу увагу необхідно звернути на формування наборів даних якнайбільшої розмірності, забезпечивши при цьому дотримання наступних обмежень:

- розмірності груп інформативних і цільових параметрів повинні бути рівними;

- статистичний розкид значень всіх параметрів повинен бути максимальним;

- розподіл значень параметрів, особливо цільових, повинен бути максимально наближеним до однорідного.

Кожна окрема сукупність значень комплексу інформативних параметрів та відповідного їм цільового параметра називається навчальною парою.

З метою полегшення виконання наступного кроку доцільно привести значення інформативних та цільових параметрів до значень у межах від 0 до 1. Для цього найкраще скористатись функціями нормалізації згідно з наступною формулою (1):

$$\alpha\alpha = \frac{(AA - \min AA)}{\max AA}, \quad (1)$$

де AA – дійсне значення параметра; aa – приведення до діапазону $[0; 1]$ значення параметра; $\min AA$ – мінімальне значення, яке слід обирати як найменше значення з набору значень параметра мінус 5...7 % цього значення; $\max AA$ – максимальне значення, яке слід обирати як найбільше значення

з набору значень параметра плюс 5...7 % цього значення.

Додаток, рівний 5...7 % конкретного значення, вводиться, виходячи з наступних міркувань [18]:

- похибка більшості значень параметрів, визначених експериментально чи математично не перевищує 5 %. Крім того, неможливо уникати ситуації, коли значення інформативних параметрів, виміряні в процесі досліджень у майбутньому, будуть виходити за вибрані межі;

- не рекомендується «заводити» нейронні мережі в процесі тренування в крайні значення 0 чи 1;

- області багатовимірного простору значень параметрів поза визначеними межами є формально невідомими для нейронних мереж, тому ймовірність достовірного прогнозування значень цільових параметрів в цих областях неможливо оцінити.

Під час формування комплексних наборів даних потрібно керуватись правилом перебору всіх можливих варіантів, тобто в разі наявності трьох інформативних параметрів треба сформувати чотири набори даних (три набори з двох параметрів та один набір з трьох параметрів), у випадку 4 параметрів – 11 наборів (6 наборів з 2 параметрів, 4 набори з 3 параметрів та 1 набір з 4 параметрів) і т. д.

На цьому кроці та в усіх наступних для їх найбільш якісного виконання рекомендується використовувати пакет прикладного програмного забезпечення для обчислень *Matlab R2006* і вище. Характерною позитивною особливістю цього програмного забезпечення є матрична форма виконання обчислень.

Далі підготовлені набори даних потрібно розділити на дві частини:

- тренувальний набір – набори інформативних і цільових параметрів, що використовуватимуться для тренування нейронних мереж;

- тестовий набір – використовуватиметься для перевірки правильності тренування нейронних мереж. Розмірність цього набору повинна становити від 10 до 30 % розмірності початкового набору. Крім того, з метою забезпечення достовірності результатів тестування особливу увагу необхідно звернути на те, щоб навчальні пари, які входять до тестового набору, ні в якому разі не використовувались для тренування.

Крок 4. Моделювання за допомогою штучних нейронних мереж. На базі досвіду низки дослідників [19] встановлено, що найбільш прийнятним для переважної більшості завдань підбору комплексів параметрів для НК та оцінки технічного стану є багатоваріантні нейронні мережі, що тренуються за алгоритмом зворотнього поширення помилок Левенберга–Марквардта.

Основною парадигмою навчання у цьому випадку є навчання «з учителем». На рис. 5 зобра-

жено блок-діаграму, яка ілюструє дану форму навчання.

Описана форма навчання з учителем є нічим іншим, як навчанням на основі корекції помилок – зворотнього поширення помилки. Це замкнута система зворотнього зв'язку, яка не включає в себе навколишнє середовище. Продуктивність такої системи можна оцінювати в термінах середньоквадратичної помилки або суми квадратів помилок на навчальній вибірці, представлений у вигляді функції від вільних параметрів системи. Алгоритм зворотнього поширення є найпопулярнішим серед алгоритмів навчання багатошарових нейронних мереж. Тобто він є градієнтним методом, а не методом оптимізації.

Для реалізації описаної послідовності операцій з тренування штучних нейронних мереж рекомендується використовувати спеціалізований програмний додаток *Neural Network Toolbox* в середовищі *Matlab R14*.

Похибку тренування під час встановлення налаштувань у додатку *Neural Network Toolbox* слід вибрати 5 %. Це пояснюється тим, що як правило, сумарний рівень похибок вимірювань цільових та інформативних параметрів, а також стохастичних складових не перевищує 5 %.

Рекомендується для кожного випадку обраних комплексів інформативних параметрів виконати тренування 5–7 мереж однакової архітектури. Така кількість мереж є довільною, проте вона дає змогу уникнути випадків сходження алгоритму тренуван-

ня в локальний мінімум та ефекту «перенавчання», що супроводжуватиметься запам'ятовуванням цільових значень, що відповідають інформативним, а не встановленню залежності між ними [20].

Для більшості випадків найбільш прийнятною є класична архітектура багатошарової нейронної мережі [21] зі зворотним поширенням помилки (рис. 6).

Математичний вираз для розрахунку вихідного значення нейронної мережі наступний [21]:

$$y = f_3(LW_{3,2}f_2(LW_{2,1}f_1(IW_{1,1}p + b_1) + b_2) + b_3). \quad (2)$$

Як функцію перетворення у вихідному (останньому) шарі рекомендується використовувати сігмоїдальну функцію *logsig*, а у всіх прихованих шарах – тангенційно-сігмоїдальну *tansig*.

Математичний вираз функції *logsig* є наступним (3):

$$\text{logsig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}, \quad (3)$$

Математичний вираз функції *tansig* (4):

$$\text{tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1. \quad (4)$$

Функція *tansig* математично еквівалентна гіперболічному тангенсу. Її відмінністю є те, що для більшості програм розрахунок її значень виконується швидше, ніж для гіперболічного тангенса, а результати відрізняються дуже незначно.

Вибір функцій *logsig* та *tansig* як функцій перетворення зумовлений наступними міркуваннями:

- ці функції є нелінійними, а отже їх сукупність у структурі нейронної мережі дасть можливість апроксимувати нелінійні багатопараметрові залежності цільових параметрів від інформативних;

- *logsig* рекомендовано використовувати у вихідному шарі нейронної мережі, оскільки значення всіх параметрів (включно із цільовими) попередньо зведені до діапазону [0; 1], що відповідає ділянці значень цієї функції. *tansig* доцільно використовувати у прихованих шарах мережі, оскільки

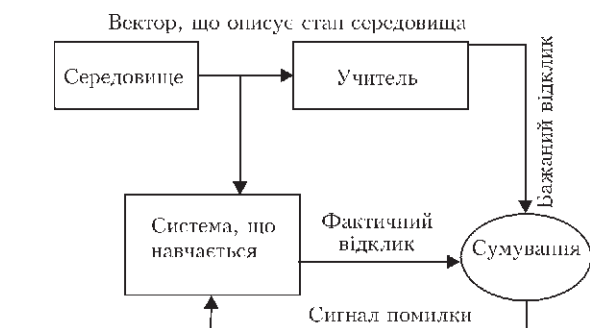


Рис. 5. Блок-діаграма навчання з учителем

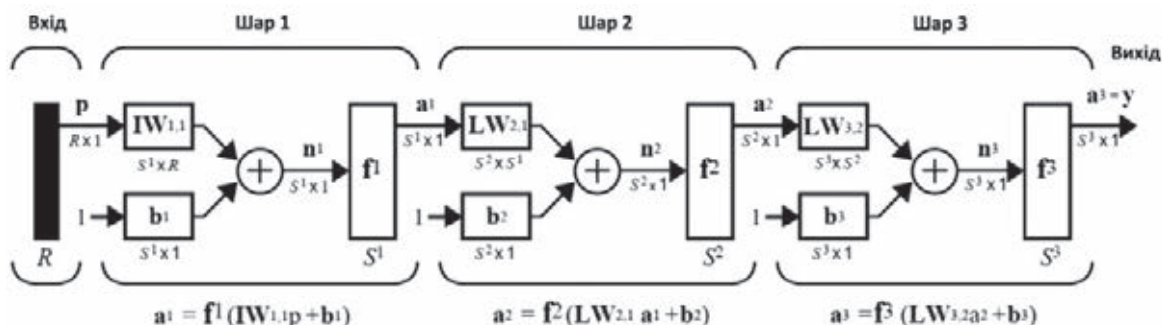


Рис. 6. Рекомендований тип багатошарової нейронної мережі: R – розмірність матриці вхідних (інформативних) параметрів; IW – матриця вагових коефіцієнтів вхідного шару нейронів; p – елементи вхідного набору параметрів; b – матриці затримок в нейронах; n – позначення нейронів; LW – матриця вагових коефіцієнтів прихованих шарів; S – розмірність матриці вагових коефіцієнтів та затримок нейрона; f – функція перетворення; a – матриці виходів шарів нейронів; y – вихід останнього шару нейронів



вони володіють вищою чутливістю до незначних змін входів нейронів порівняно із logsig [22].

Крок 5. Визначення комплексу параметрів, що є оптимальними з точки зору точності їх визначення і цільових параметрів, а також можливості вимірювання.

Після завершення процесу тренування усіх нейронних мереж для всіх можливих комбінацій потрібно провести тестування за допомогою попередньо підібраних тестових наборів даних, що не використовувались під час тренування.

Одержані результати розрахунку значень цільових параметрів порівнюються з еталонними (з тестового набору) шляхом розрахунку абсолютної та, за потреби, відносної похибки і розрахунку їх середнього значення.

Серед одержаних результатів виходів нейронних мереж обирається найменший. Надзвичайно низькі (близькі до нуля) значення похибок для всіх значень відкидаються як такі, що свідчать про явище «перенавчання».

Далі такий же вибір слід виконати для кожного набору комплексу інформативних параметрів.

Як критерії оптимальності, в даному випадку, обрано наступні:

- мінімально можливий комплекс інформативних параметрів;
- найвища точність визначення цільового параметра (у абсолютному чи відсотковому вираженні).

Вибраний за вказаними вище критеріями комплекс інформативних параметрів можна вважати оптимальним та прийнятним.

Крок 6. Графоаналітичні дослідження. Графоаналітичний метод допомагає проаналізувати фізичну суть одержаної моделі, що міститься в структурі нейронної мережі, і дає змогу працювати з найбільш оптимальним набором інформативних параметрів. Він здатний допомогти наглядно відстежити і проаналізувати всі ті взаємні зв'язки між цільовими та інформативними параметрами, а також допомагає уникнути помилок під час побудови алгоритмів розрахунку за допомогою ПК та мікропроцесорних засобів.

Для цього необхідно сформулювати «модельні» набори входних (інформативних параметрів) з тими самими діапазонами значень, що були обрані для початкових наборів даних на Кроці 3 та розрахувати значення цільового параметра на них. Кількість значень у цих наборах повинна бути задовільною для забезпечення нормального візуального відтворення дво- та тривимірних зображень залежностей.

Оскільки розмірність «модельних» наборів входних (інформативних) параметрів і одержаних шляхом розрахунку штучною нейронною мережею цільових параметрів однакові, постає мож-

ливість побудови дво- і тривимірних залежностей цільового параметра від одного чи двох входних.

Отримані таким чином набори даних можуть бути використані для табуляції залежності вихідного параметра від обраного комплексу інформативних параметрів з метою програмування мікропроцесорів та побудови відповідного програмного забезпечення.

Крок 7. Побудова аналітичних залежностей. Основним недоліком використання штучних нейронних мереж більшість дослідників вважає відсутність встановлених аналітичних залежностей, що містяться в структурі мережі. Додатково ці залежності можна використовувати для проведення подальших досліджень, спрощення використання одержаних результатів досліджень. Використовуючи формули (2)–(4) та набори вагових коефіцієнтів і затримок усіх шарів використовуваної нейронної мережі можна побудувати аналітичну залежність у матричній формі.

Крок 8. Формулювання методу. Одержана таким чином штучна нейронна мережа може використовуватись для виконання операцій з визначення цільових параметрів у вигляді спеціалізованого програмного забезпечення або інформаційно-вимірювальної системи.

Після виконання усіх кроків запропонованої методології рекомендується сформулювати їх виконання у конкретну послідовність операцій, що в подальшому можуть бути повторені з метою одержання задовільних результатів визначення цільових параметрів, які характеризують технічний стан металоконструкцій.

Одним із найбільш прийнятних способів формалізації розробленого методу є нормативний документ чи його проект, який регламентував би наступне:

- методи та засоби вимірювання інформативних параметрів;
- спосіб розрахунку цільового параметра, що характеризує технічний стан трубопроводів;
- метрологічні характеристики методу;
- бракувальні критерії;
- способи представлення результатів досліджень;
- напрямки використання результатів досліджень для розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів.

Висновки

Таким чином, існують підстави стверджувати, що застосування нейромережових технологій в НК містить значний потенціал для підвищення достовірності результатів обстежень та поглиблення наукових досліджень за даним напрямком.

З огляду на зазначені завдання контролю технічного стану матеріалів і виробів у нафтогазовій галузі



розроблена методологія може застосовуватись для:

– встановлення взаємозв'язків між фізико-механічними характеристиками металоконструкцій та мікроструктурним станом;

– розроблення методів контролю параметрів, що характеризують технічний стан металоконструкцій в нафтогазовій промисловості – товщини стінки, механічних характеристик і дефектів типу порушення суцільності.

1. Gas Pipeline Incidents, 8th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group, Dec. 2011. – Режим доступу: www.egig.eu
2. Bida G. V., Nichipuruk A. P. Multiparameter Methods in Magnetic Structuroscopy and Nondestructive Testing of Mechanical Properties of Steels // Defektoskopiya. – 2007. – 43, № 8. – P. 3–24.
3. Multiparameter analysis of the Barkhausen noise signal and its application for the assessment of plastic deformation level in 13HMF grade steel / L.Piotowski, B.Augistyniak, M.Chmielewski, Z.Kowalewski // Measurement Sci. and Technology. – 2010. – 21, №11.
4. Bida G. V., Nichipuruk A. P. Multiparameter Methods in Magnetic Structuroscopy and Nondestructive Testing of Mechanical Properties of Steels // Defektoskopiya. – 2007. – 43, № 8. – P. 3–24.
5. Multiparameter analysis of the Barkhausen noise signal and its application for the assessment of plastic deformation level in 13HMF grade steel / L.Piotowski, B.Augistyniak, M.Chmielewski, Z.Kowalewski // Measurement Sci. and Technology. – 2010. – 22, № 12.
6. Мирошніченко Л. В. Сравнение алгоритмов выбора признаков в распознавании образов. Статистические проблемы управления. – Вильнюс: ИМК АН Литвы, 1990. – Вып.93. – С.78–91.
7. Методы, критерии и алгоритмы, используемые при преобразовании, выделении и выборе признаков в анализе данных / К.А.Чепонис., Д.А.Жвиренайте, Л.В.Мирошніченко, Б.С. Бусыгин. – Вильнюс: Изд-во ИМК АН ЛитССР, 1988. – 149 с.
8. Siedelcki W., Sklansky J. On automatic feature selection // IEEE Pattern Recognition and Art. Int. – 1988. – 2, № 2. – P. 197–220.
9. Күрейчик В. М. Генетические алгоритмы. – Таганрог: ТРТУ, 1998. – 242 с.
10. Карпаш М. О., Котурбаши Т. Т. Перспективы застосування штучних нейронних мереж в дефектоскопії // Матер. XV Міжнарод. наук.-техн. конф. «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» ЛЕОТЕСТ-2010 (15–20 лютого 2010 р.). – Славське Львівської обл., 2010. – С.55–56.
11. Industrial application of neural networks – an investigation / B. Lennox, G.A.Montague, A.M.Frith et al. // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2002. – Vol. 16. – Issue 4. – P. 487–546.
12. Geman S. E. Bienenstock and R.Doursat. Neural networks and the bias/variance dilemma // Neural Computation. – 1992. – 4. – P.1–58.
13. Grossberg S. Z. Neural Networks and Natural Intelligence. – Cambridge, MA: MIT Press, 1988.
14. Kerlirzin P. and F.Vallet. Robustness in multilayer perceptrons // Neural Computation. – 1993. – 5. – P. 473–482.
15. Елисеева И. И., Юзбашев М. М. Общая теория статистики: Учебник / Под ред. И.И.Елисеевой. – 4-е изд., перераб. и дополн. – М.: Финансы и Статистика, 2002. – 480 с.
16. Общая теория статистики: Учебник / Под ред. Р.А. Шмойловой. – 3-е изд., перераб. – М.: Финансы и Статистика, 2002. – 560 с.
17. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. – М.: Наука, 1964. – 567 с.
18. Карпаш О. М. Новітні методи прикладної фізики і математики в інженерних дослідженнях: Навч.посібник / О.М. Карпаш, А.О. Снарський, П.М. Райтер, М.О. Карпаш. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. – 320 с.
19. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. – М.: Мир, 1992. – 185 с.
20. Карпаш М. О. Підвищення чутливості акустичного методу неруйнівного контролю матеріалів // Техн. діагностика і неспромож. контроль. – 2011. – № 4. – С.39–43.
21. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд: Пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2006. – 1104 с.
22. Карпаш М. О., Рибіцький І. В., Котурбаши Т. Т. Перспективи застосування штучних нейронних мереж в дефектоскопії // Мат. XVI Міжнар. наук.-техн. конф. «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» ЛЕОТЕСТ-2011 (21–26 лютого 2011 року). – Славське Львівської області. – 2011. – С.10–11.

The safe operating life of metal structures is determined by physico-mechanical characteristic of metal. Determination of mechanical characteristics and degree of their variation in structural steels, which are applied as material in a wide range of structures in industry, is an important and urgent scientific-practical task. The paper presents an approach to solution of the problems of determination of parameters, which characterize technical condition of metal structures in long-term service, for the case of gas pipelines. An approach to development of the method of monitoring these characteristics is proposed that consists in allowing for several informative parameters using artificial neural networks, and directions of application of the methodology for monitoring technical condition of pipelines (wall thickness, presence of defects of the type of discontinuities, physico-mechanical characteristics and type of microstructure) are outlined. 22 References, 6 Figures.

Key words: technical diagnostics, pipelines, multiparametral approach, neural networks, nonlinear approximation

Надійшла до редакції
04.04.2013



ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.А. СТОРОЖЕНКО¹, А.В. МЯГКИЙ¹, С.Б. МАЛИК¹, В.Г. ТИХИЙ²

¹Харьковский нац. ун-т радиоэлектроники. Харьков, 61166, пр-т Ленина, 14. E-mail: Fizika@kture.kharkov.ua

²ГП «Конструкторское бюро «Южное». 49008, Днепропетровск, ул. Криворожская. E-mail: info@yuzhnoye.com

Построена теоретическая модель теплофизических процессов в многослойной сотовой конструкции, заполненных полимерным сотовым пластом. Рассчитаны режимы оптимального контроля сотовых конструкций на наличие дефектов типа непрочности по критерию оптимизации сигнал/помеха. Предложен ряд способов борьбы с высокими помехами, вызванными неоднородностью излучательной способности и клеевого слоя, основанных на дифференциальной фильтрации термограмм, полученных в оптимальном режиме контроля. Проведен ряд экспериментов по выявлению указанных дефектов с применением разработанных подходов. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: тепловая дефектотометрия, сотовая конструкция, дефект типа непрочности, оптимальный режим контроля

Сотовые конструкции являются одним из наиболее распространенных конструктивных материалов в авиации, космической технике и других отраслях, где к надежности комплектующих предъявляются повышенные требования. Особое внимание уделяется недопущению таких дефектов как места непрочности (отслоения) между обшивкой и сотовым наполнителем.

Для выявления дефектов типа непрочности перспективно применение активного метода теплового контроля [1,2] (при использовании тепловизора в качестве регистрирующего устройства), который имеет высокую чувствительность к обнаружению подобных дефектов и большую производительность контроля.

Однако реализовать потенциальные возможности этого метода на практике не всегда удается вследствие значительных помех, обусловленных неоднородностью излучательной способности поверхности сотовой структуры и разнотолщиной клеевого слоя. Кроме того, для создания избыточного температурного поля необходим одновременный нагрев определенной площади объекта контроля (ОК) площадочным нагревателем, для которого характерна неравномерность температурного поля, создаваемого на поверхности ОК (в частности, имеет место так называемый «краевой эффект»), что представляет собой дополнительную помеху.

Целью настоящих исследований являлся поиск путей подавления указанных помех как путем оптимизации режима тепловой дефектоскопии (ТДС), так и путем создания алгоритмов обработки ее результатов (термограмм).

Для достижения цели использовали теоретико-экспериментальный подход, сочетающий по-

строение и анализ теплофизической модели сотовой структуры и проведение эксперимента на реальных образцах с дефектами.

Теоретические исследования. В качестве геометрической модели ОК выбрана трехслойная пластина (что адекватно отражает реальную конструкцию сотовой структуры), состоящая из углепластиковой обшивки, между двумя слоями которой помещен сотовый пласт (рис.1), с неоднородностью. Дефект типа непрочности между обшивкой и сотовым пластом моделируется воздушной прослойкой, приведенной на рис. 1.

Используется цилиндрическая система координат, где r – радиальная координата; z – вертикальная координата. Угловая координата из расчетов исключена ввиду того, что в представленной модели ОК абсолютно симметричен по этой координате.

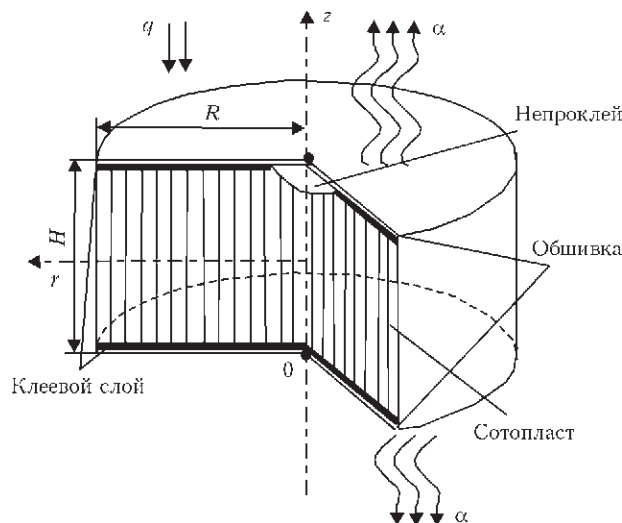


Рис. 1. Объект контроля: R – радиус; H – толщина; q – мощность нагрева; α – коэффициент теплоотдачи поверхности



В предложенной теплофизической модели неоднородный по структуре слой сотовпласта (рис. 2) был заменен однородным эквивалентным слоем с усредненными теплофизическими характеристиками (ТФХ): удельной теплоемкостью c' , плотностью ρ' и коэффициентом теплопроводности λ' . Для определения усредненных значений использовали следующие соотношения:

$$c' = \langle c \rangle = \frac{V_1 C_1 + V_2 C_2}{V_1 + V_2}, \quad (1)$$

$$\rho' = \langle \rho \rangle = \frac{V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2}{V_1 + V_2}, \quad (2)$$

$$\lambda' = \langle \lambda \rangle = \frac{V_1 \lambda_1 + V_2 \lambda_2}{V_1 + V_2}, \quad (3)$$

где V_1 – объем полимера; V_2 – объем воздуха; c_1, ρ_1, λ_1 – ТФХ полимера; c_2, ρ_2, λ_2 – ТФХ воздуха.

Теплофизическая модель, основанная на геометрической модели (см. рис. 1), описывается граничными условиями (4)–(6), отражающими реальные условия проведения ТДС [1], т.е. нагрев ОК внешним источником тепла q и теплообмен с окружающей средой с коэффициентом α .

На внешних поверхностях ОК выполняются граничные условия 2-го и 3-го рода:

для $z = H$

$$\left(\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial z} \right) = \alpha (T(\vec{r}, t) - T_{\text{среды}}) - q(\vec{r}, t), \quad (4)$$

для $z = 0$

$$-\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial z} = -\alpha (T(\vec{r}, t) - T_{\text{среды}}), \quad (5)$$

для $z = h$

$$-\lambda_1(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_1(\vec{r}, t)}{\partial z} \right) = -\lambda_2(\vec{r}, T, t) \left(\frac{\partial T_2(\vec{r}, t)}{\partial z} \right), \quad (6)$$

где $T(\vec{r}, t)$ – координатно-временная функция температуры; $\lambda(\vec{r}, t)$ – коэффициент теплопроводности материалов ОК; $q(\vec{r}, t)$ – плотность потока тепла от внешнего источника (нагревателя).

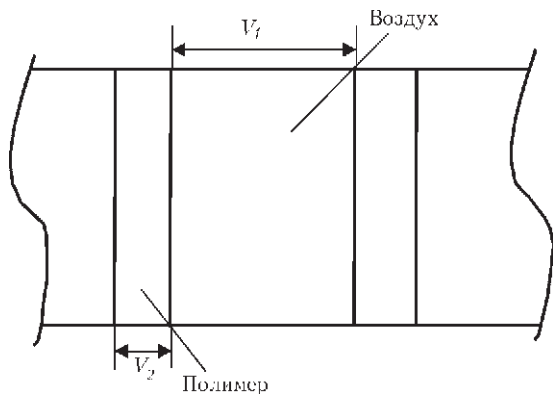


Рис. 2. Схема слоя сотовпласта, состоящего из ячеек с полимерными стенками, заполненных воздухом

Особенностью данной модели, в отличие от ряда известных [1,3], является одновременный учет и теплоотдачи с нагреваемой поверхности, и теплопроводности через дефект (воздух).

Анализ построенной теплофизической модели проводится путем решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности [4], записанного для выбранной цилиндрической системы координат:

$$\text{div}(\lambda(\vec{r}, t) \nabla T(\vec{r}, t)) + q(\vec{r}, t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}. \quad (7)$$

Для решения уравнения (7) применяли численный (сеточный) метод конечных разностей, для реализации которого использовали ранее разработанный авторами программный пакет «TermoPro_2009S» [5]. В качестве числового материала использовали справочные данные по одной из разновидностей сотовых структур (таблица).

Численные параметры моделируемого дефекта (воздушная прослойка) были выбраны следующими: глубина залегания $h=0,8$ мм (что соответствует толщине обшивки), раскрытие (толщина) $\delta=0,2$ мм (соответствует толщине клеевого слоя), поперечный размер $l=5$ мм (соответствует размеру двух ячеек).

Анализ разработанной теплофизической модели осуществлялся по методике, заложенной в указанном выше программном пакете, а именно: проводилось решение уравнения (7) с граничными условиями (4)–(6) относительно искомой величины в виде температурного контраста ΔT на поверхности ОК над местом залегания дефекта [1]. При этом варьировались параметры режима проведения ТДС: плотность потока тепла q , продолжительность нагрева поверхности ОК τ_n , время запаздывания τ_3 (промежуток времени между окончанием нагрева и регистрацией температурного поля). Максимальная температура нагрева поверхности ОК ограничивалась значением 100°C (во избежание деструкции материала).

Из полученного массива значений q, τ_n, τ_3 определялся оптимальный режим ТДС по критерию $\Delta T \rightarrow \Delta T_{\text{max}}$: $q = 28 \text{ кВт/м}^2$; $\tau_n = 15 \text{ с}$; $\tau_3 = 4.4 \text{ с}$; $\Delta T_{\text{max}} = 1,61^\circ\text{C}$.

Экспериментальные исследования. Для проверки результатов, полученных теоретическим путем, провели экспериментальные исследования на

Характеристики материалов ОК

Характеристики материалов	Углепластик обшивки	Полимерный сотовый наполнитель
Теплопроводность, Вт/м·К	0,3...0,9	0,065
Степень черноты	0,8...0,82	–
Толщина, мм	0,8	28
Размер ячейки, мм	–	2,5



Рис. 3. Исследуемая пластина с обозначенными местами расположения дефектов

образце сотовой структуры, параметры которой приведены в таблице (рис. 3). Образец содержал два искусственных дефекта типа «непроклей» с размерами, мм: 40×70; 20×80.

Остальные параметры дефектов соответствовали расчетным: глубина $h=0,8$ мм, раскрытие $\delta=0,2$ мм.

Для проведения экспериментов использовался тепловизор IRTIS-200 в сочетании с созданным авторами площадочным нагревателем излучательного типа с неравномерностью нагрева по полю кадра 12 %. Время нагрева τ_n регулировалось таймером.

На рис. 4 приведены две из множества полученных термограмм, иллюстрирующие влияние режима контроля на сигнал от дефекта, т.е. ΔT .

Из термограмм видно, что в оптимальном режиме тепловой контраст, вызванный дефектом ($\Delta T=1,53$ °C), существенно выше, чем в неоптимальном ($\Delta T=0,54$ °C).

Однако наряду с полезным сигналом на термограммах присутствуют и температурные контрасты, вызванные помехами (шумовой сигнал), сопоставимые по величине с полезным сигналом: $\Delta T_{\text{ш}}=2,6$ °C. что не позволяет

однозначно идентифицировать дефекты по амплитудному принципу, т.е. по ΔT .

Подавление помех путем обработки результатов ТДС. Подавление помехи, вызванной неоднородностью нагрева. Для компенсации неоднородности нагрева предложено использовать нормировку обратной функции распределения мощности нагрева $q(x, y)$ по площади кадра. Прямая функция была получена экспериментальным путем с помощью измерителя мощности ИМО-2. Дальнейшую компьютерную обработку термограмм проводили по следующему алгоритму: значение температуры в каждом пикселе термограммы (в виде матрицы) компенсировалось по уравнению:

$$F' = \frac{q_{\max}}{q} F, \quad (8)$$

где F – матрица значений температур термограммы; F' – матрица скорректированных значений T ; q – матрица значений мощности нагрева; $q_{\max}$ – максимальный элемент q .

В результате такой обработки неоднородность температурного поля, вызванная неравномерностью нагрева, была снижена в два раза (рис. 5).

Снижение влияния неоднородности излучательной способности поверхности образца. Известно, что для оценки влияния неоднородности излучательной способности $\Delta \epsilon$ принято использовать эквивалентный ей температурный перепад ΔT_{ϵ} [3]. С помощью описанной выше теплофизической модели было проведено исследование временной зависимости $\Delta T_{\epsilon}(t)$, т.е. помехи, в сравнении с аналогичной временной зависимостью температурного перепада от дефекта $\Delta T_{\text{деф}}(t)$, т.е. полезного сигнала.

Оказалось, что характер этих временных зависимостей принципиально отличается (рис. 6): моменты времени, соответствующие максимальным значениям помехи ΔT_{ϵ} и полезного сигнала $\Delta T_{\text{деф}}$ не совпадают: сигнал от помехи

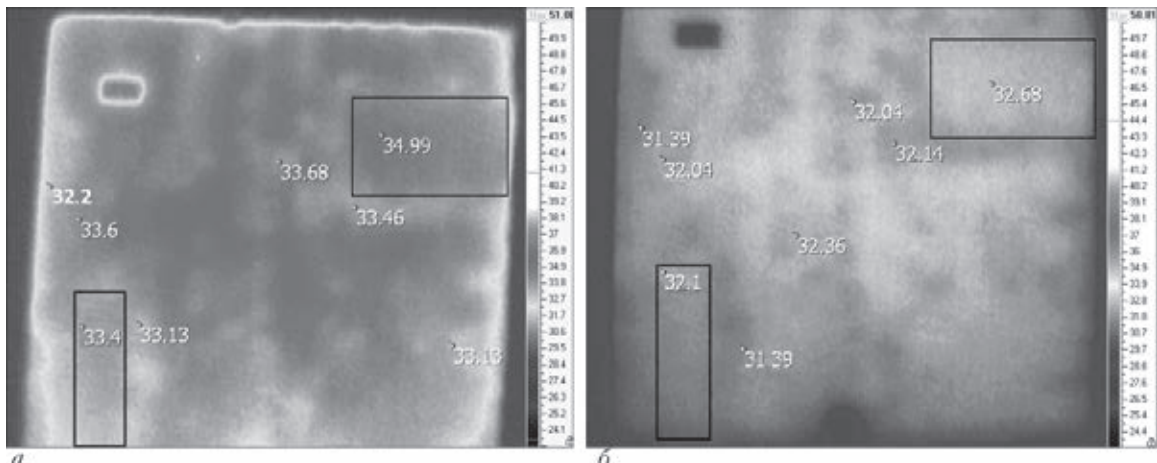


Рис. 4. Термограммы ОК: а – в оптимальном режиме (средняя температура по поверхности $T_{\text{ср}}=33,36$ °C); б – в неоптимальном режиме ($T_{\text{ср}}=32,01$ °C)



достигает максимума сразу по окончании нагрева, т.е. в момент времени τ_n , а полезный сигнал – с определенным временем запаздывания τ_3 .

Это открывает возможность максимизировать отношение сигнал/шум (т.е. $\Delta T_{\text{деф}}/\Delta T_{\text{г}}$) путем выбора соответствующего момента регистрации температурного поля на поверхности объекта контроля.

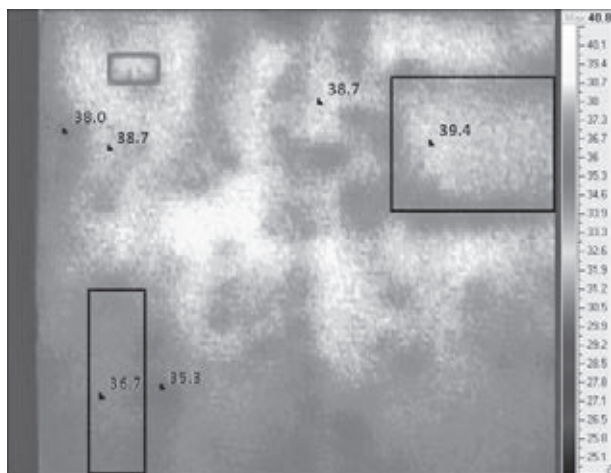


Рис. 5. Термограмма после корректировки помехи, вызванной неоднородностью нагрева

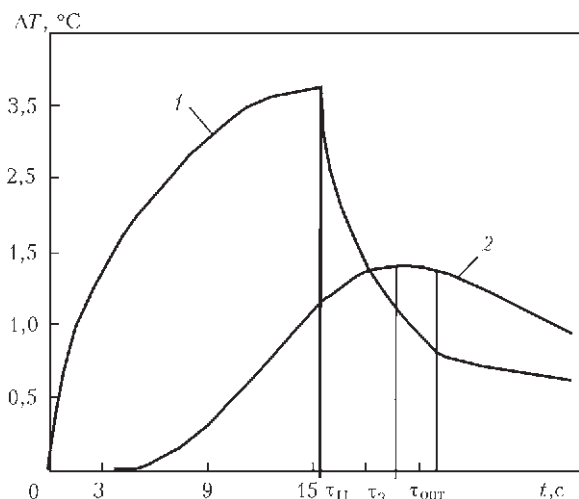


Рис. 6. Развитие во времени помехи $\Delta T_{\text{г}}$ (1) и сигнала от дефекта $\Delta T_{\text{деф}}$ (2)

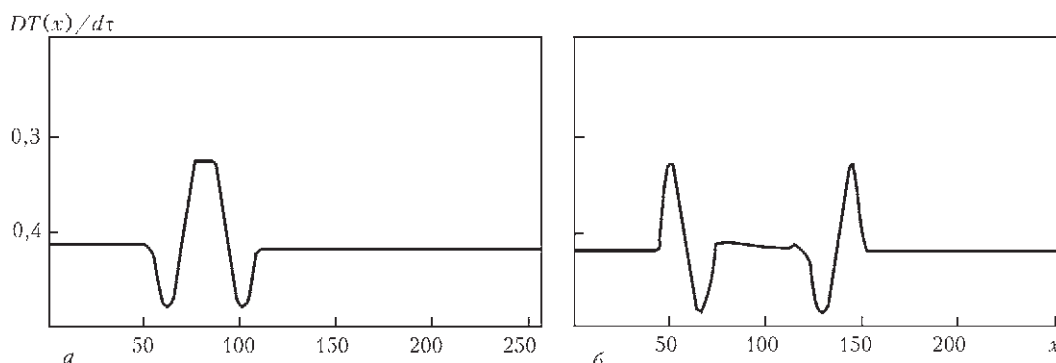


Рис. 7. Частная производная от температуры поверхности по времени в зависимости от координаты для участка с помехой (а) и для области над дефектом (б)

В частности, согласно данным рис. 6 при выборе времени контроля $\tau_3 = 4,4$ с соотношение сигнал/шум равно 1,2, а при $\tau_{\text{опт}} = 6,2$ с это отношение составляет 1,6, т.е. на 26 % больше.

Данный вывод относительно выбора момента регистрации $\tau_{\text{опт}}$ справедлив и для рассмотренной выше помехи, вызванной неравномерностью нагрева поверхности ОК.

Оптимизация режима контроля по критерию максимума отношения сигнал/помеха (вместо максимума полезного сигнала) позволяет оценить порог чувствительности метода в зависимости от неравномерности излучательной способности $\Delta\epsilon/\epsilon$: можно определить минимальный поперечный размер r дефекта или его максимальную глубину залегания h [5].

Устранение помехи, вызванной разнотолщинностью клеевого слоя. Разнотолщинность клеевого слоя можно представить как эквивалентное изменение термического сопротивления ОК, которое приводит к появлению температурных контрастов на его поверхности, достигающих значений (как показывает эксперимент) $4,2^\circ\text{C}$, что сопоставимо с полезным сигналом (ΔT , вызванное дефектом).

Однако анализ полученных экспериментальных данных показал, что эти контрасты отличаются от полезного сигнала пространственно-временной зависимостью $\Delta T(\tau, x)$. Этот факт лег в основу предложенного метода подавления этой помехи путем компьютерной обработки термограмм с использованием зависимости $\frac{\partial T(x)}{\partial \tau}$ (рис.7).

Суть метода заключается в вычислении двумерной матрицы, элементами которой являются соответствующие частные производные по времени:

$$F_{i,j} = \frac{\partial F'_{i,j}(x,y)}{\partial t}, \quad (5)$$

где $F'_{i,j}$ – элемент матрицы скорректированных температур; i, j – целые числа, номера соответствующие

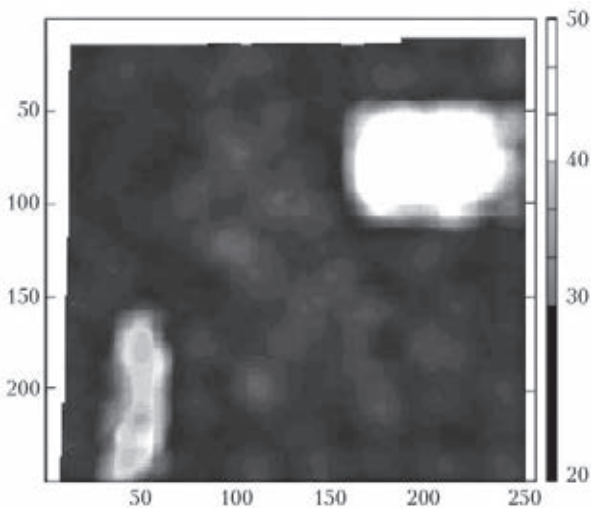


Рис. 8. Термограмма после обработки

ющих пикселей по x и y ; $F_{i,j}$ – характеристическая матрица.

Расшифровав $F_{i,j}$, используя зависимости, приведенные на рис. 7, получаем конечный вид термограммы после обработки (рис. 8). Сравнение этой термограммы с исходной (рис. 4, а) подтверждает тот факт, что достоверность обнаружения дефектов (даже визуальным путем) существенно возросла после обработки. Количественная же оценка показывает уменьшение сигнала помехи данного вида более, чем в 1,5 раза.

Это создает предпосылки для перехода (в условиях производства) от визуальной идентификации дефектов к автоматизированной.

Выводы

Разработана теплофизическая модель ОК, более полно (по сравнению с аналогами) отражающая реальные условия проведения тепловой дефектоскопии сотовых конструкций и, благо-

даря этому, позволяющая оценивать ожидаемую величину сигнала от дефекта с достаточной точностью (погрешность порядка 10 %).

Предложена методика оптимизации режима проведения тепловой дефектоскопии, основанная на критерии максимизации не самого полезного сигнала, а соотношения сигнал/шум, что позволяет расширить границы применимости метода на ОК, поверхность которых имеет неравномерность излучательной способности ϵ .

Предложены методы для борьбы с помехами, вызванными неоднородностью нагрева, неоднородностью излучательной способности поверхности образца и разнотолщинностью клеевого слоя как за счет оптимизации метода контроля, так и за счет обработки полученных результатов.

В результате применения предложенных методов было достигнуто снижение уровня помех, связанных с неоднородностью нагрева до $0,7^\circ\text{C}$ (вместо $1,4^\circ\text{C}$), снизить помеху, вызванную неоднородностью излучательной способности ϵ , удалось до $0,6^\circ\text{C}$ (вместо 2°C), а температурный контраст, вызванный разнотолщинностью клеевого слоя, снизить до $0,2^\circ\text{C}$ (вместо $1,2^\circ\text{C}$).

1. *Стороженко В. А., Маслова В. А.* Термография в диагностике и неразрушающем контроле. – Харьков.: Смит, 2004. – 160 с.
2. *Xavier P. V. Maldague.* Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. – John Wiley & Sons, Inc., 2001. – P. 684.
3. *Вавилов В. П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
4. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 602 с.
5. *Стороженко В. А., Малик С. Б., Мякий А. В.* Оптимизация режимов тепловой дефектоскопии на основе теплофизического моделирования // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Прилади і методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПІ» – № 48. – 2008. – С. 84–91.

A theoretical model of thermophysical processes in a multilayer honeycomb structure, filled with polymer honeycomb plastic, was constructed. Modes of optimum testing of honeycomb structures for defects of the type of lacks-of-adhesion by the criterion of signal/noise optimization were calculated. Methods for eliminating high noise caused by nonuniformity of the emittance and of adhesive layer are proposed, which are based on differential filtering of thermograms derived in the optimum testing mode. A number of experiments have been conducted to detect the above defects with application of the developed approaches. 5 References, 1 Table, 8 Figures.

Key words: thermal flaw detection, honeycomb structure, lack-of-adhesion type defect, optimum testing mode

Поступила в редакцию
07.11.2011



РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РАСКРЕПЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНИХ БЛОКОВ ЭНЕРГООБЛОКОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ОТ ВНЕШНИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В. М. ТОРОП¹, Б. О. ЯХНО², С. В. КОЗЛОВ³

¹ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТТУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: mmientu@kpi.kiev.ua

³ООО «Ютем-инжиниринг». 08202, г. Буча, Киевская обл., ул. Чкалова, 3. E-mail: kozlovsv@ukr.net

Основной целью данной работы является выполнение комплекса мероприятий по управлению старением верхних блоков (ВБ) энергоблоков № 1, 2 ОП «Ривненская АЭС» с учетом современных требований, предъявляемых международными и отечественными регулирующими органами, к повышению надежной и безопасной эксплуатации АЭС. Одной из составляющих этого направления исследований является выполнение поверочных расчетов на прочность металлоконструкций (МК) ВБ от действия внешних динамических нагрузок, которые могут вызываться сейсмическими воздействиями с учетом событий, происшедших 11 марта 2011 г. на АЭС «Фукусима-1». В работе представлены результаты расчетов на прочность МК ВБ энергоблоков № 1, 2 ОП «Ривненская АЭС» при действии внешних динамических воздействий в случае проектного решения и с учетом дополнительного раскрепления МК ВБ. Практической реализацией данной работы является разработка технического проекта дополнительного раскрепления МК ВБ с учетом модернизации как тепломеханического оборудования, так и строительных конструкций. Библиогр. 6, рис. 8.

Ключевые слова: верхний блок, ВВЭР-440, металлоконструкция, прочность, сейсмостойкость

Верхний блок предназначен для уплотнения реактора, размещения приводов автоматических регулирующих компенсирующих (АРК), выводов системы ВРК, удержания от всплытия блока защитных труб (БЗТ) и шахты реактора.

Верхний блок устанавливается на фланец корпуса реактора и состоит из следующих основных узлов: крышки, чехлов АРК, коллекторов и трубопроводов охлаждения приводов АРК, коллектора и трубопроводов воздухоудаления, траверсы, металлоконструкции, теплоизоляции крышки.

Металлоконструкция является несущей частью верхнего блока (ВБ). Она предназначена для транспортировки ВБ и для удержания приводов АРК в вертикальном положении.

Металлоконструкция состоит из:

- шести бобышек, приваренных к крышке реактора;
- шести штанг М90 и шести надставок М90 (штанги ввернуты в бобышки);
- трех поясов, через которые проходят штанги (пояса закреплены сваркой на штангах с помощью втулок);
- раскосов в виде труб, установленных между нижним и средним поясами, закрепленных при помощи сварки к поясам и штангам М90 через втулки;
- решетки дистанционирующей, приваренной к верхнему поясу;
- шести гаек для опоры под установку надставок;

– шести гаек для закрепления траверсы.

Для дополнительного восприятия возможных динамических воздействий при модернизации металлоконструкции в шахте ВБ устанавливаются распорные устройства на уровне среднего пояса и раскосы между верхним поясом и штангами. Проектное решение по дополнительному раскреплению верхнего блока от внешних динамических воздействий схематически показано на рис. 1, 2. Распорное устройство выполнено в виде коробчатого профиля сечением 140×200 мм. Концевые детали распорного устройства имеют поверхность для установки съемных клиньев и закрепляются к ложементу сваркой при помощи ребер. Раскрепление штанг М90 осуществляется при помощи восьми раскосов трубчатого сечения, которые крепятся сваркой к штангам и к дистанционирующей решетке.

Элементы металлоконструкции ВБ в процессе эксплуатации нагружены собственным весом и весом технологического оборудования, расположенного на ВБ. В рабочем режиме реакторной установки (РУ) для металлоконструкции ВБ также учитываются температурные расширения крышки реактора в зоне соединения штанг металлоконструкции с бобышкой в виде радиальных перемещений и углов поворота штанг.

При сейсмических воздействиях и проектных авариях элементы металлоконструкции дополнительно нагружены инерционными усилиями от колебаний верхнего блока и корпуса реактора.

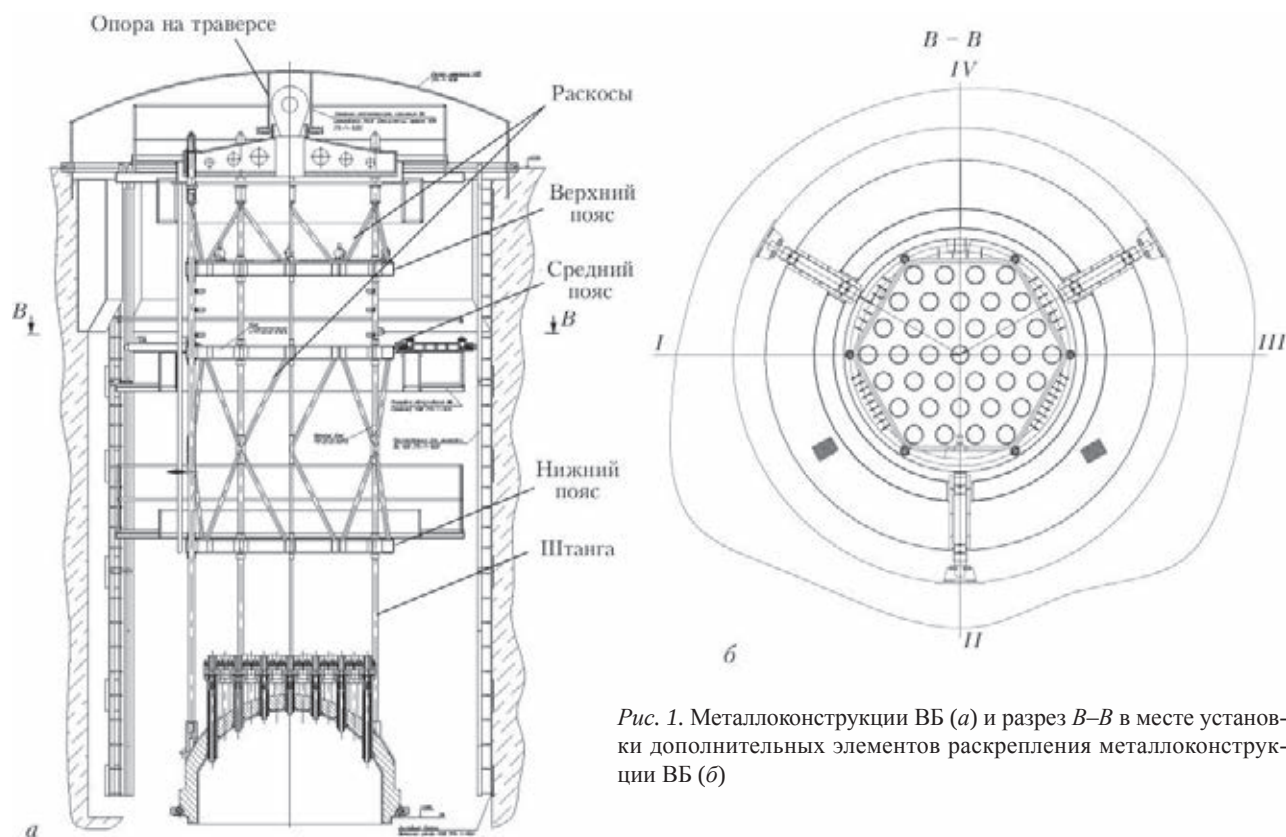


Рис. 1. Металлоконструкции ВБ (а) и разрез В-В в месте установки дополнительных элементов раскрепления металлоконструкции ВБ (б)

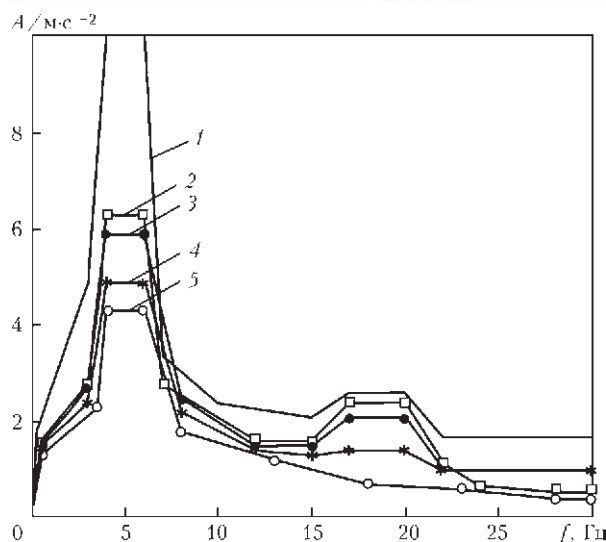


Рис. 2. Исходные горизонтальные спектры отклика при МРЗ 6 баллов: 1 – отметка +32,700 м; 2 – +22,500; 3 – +16,400; 4 – +12,700; 5 – +6000

В качестве исходных данных внешних динамических воздействий использовали значения спектра отклика для возможных землетрясений мощностью 6 баллов ($0,05g$) и 7 баллов ($0,1g$). Для землетрясения мощностью 6 баллов ($0,05g$) при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) значения спектра отклика принимались из данных, приведенных в отчете [1] (рис. 2). Учитывая повышенные требования к сейсмостойкости и увеличение динамических воздействий до уровня МРЗ = 7 баллов с ускорением на грунте не менее $0,1g$, использовали горизонтальные и вертикальные по-

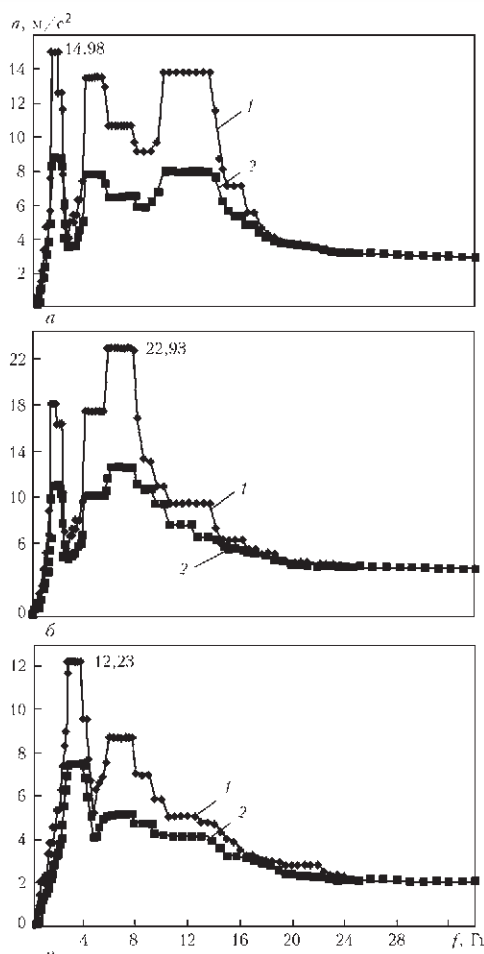


Рис. 3. Спектры отклика по оси X (а), Y (б) и Z (в) для стальной конструкции здания реактора: 1 – демпфирование 2 %; 2 – 5

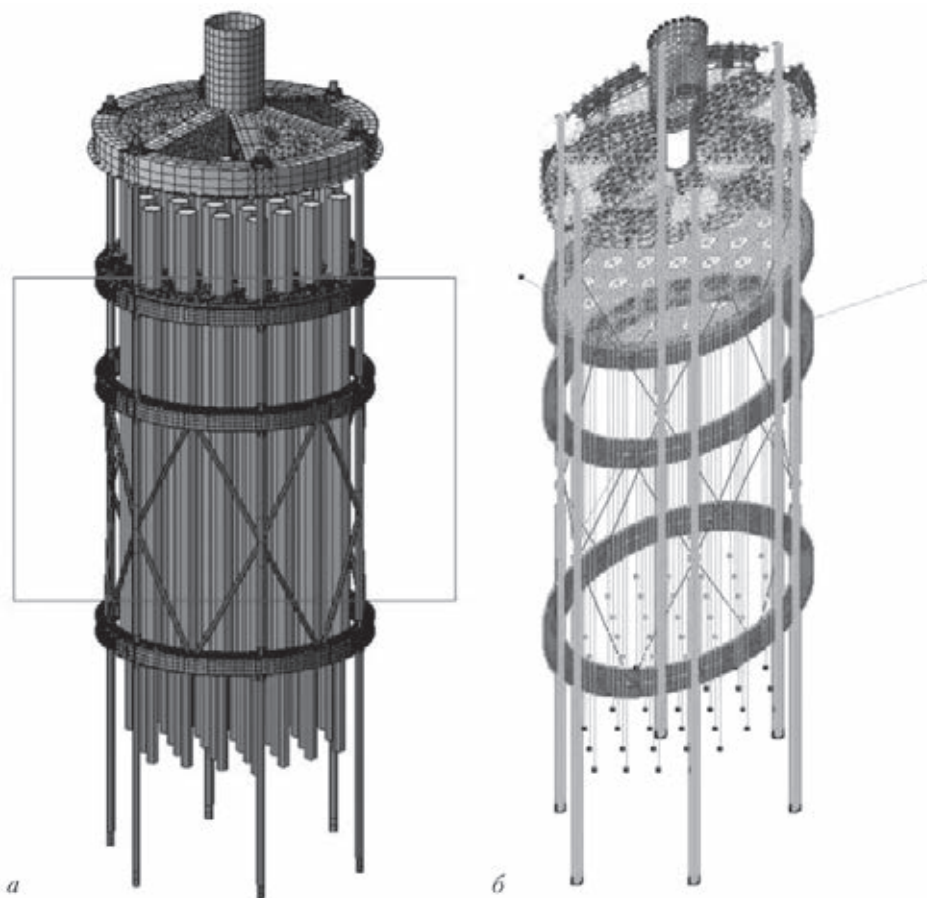


Рис. 4. Конечно-элементная модель ВБ, построенная в ПК «ЛИРА-САПР 2011»: а – без дополнительных конструкций раскрепления; б – с дополнительными элементами раскрепления

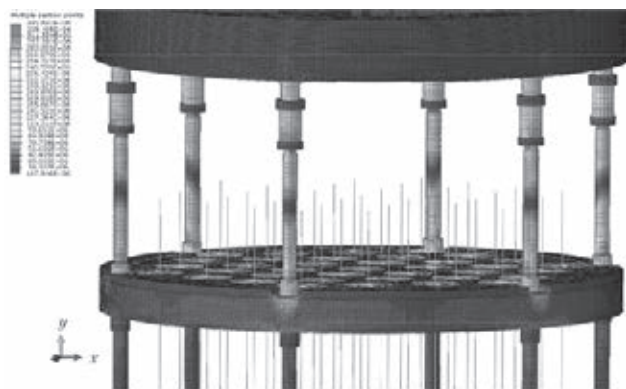


Рис. 5. Напряжения в штангах верхнего пояса
тажные спектры ответа на отметках реакторного отделения, принятые на основании документа [2].

Для стальных конструкций здания реактора использовали значения спектра ответа, приведенные на рис. 3 [2]. В документе [2] значения новых спектров ответа для стальных конструкций здания реактора приведены только для отметки 29,1 и 40,06 м. Поскольку максимальная высотная отметка закрепления ВБ расположена ниже отметки 29,1 м (7 баллов), то из условий консервативного подхода учитывали спектры ответа для отметки 29,1 м.

В расчетах использовали данные [3] по ВБ с приведенными механическими характеристиками стали штанг М90, изготовленных из стали



Рис. 6. Сейсмические напряжения в МК ВБ при учете двух распорок для МРЗ 7 баллов (0,1g) в зоне штанг М90 верхнего пояса и присоединения к надставке (максимальные сейсмические напряжения 171 МПа)

$R_y = 195$ МПа, $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона = 0,3. Марка стали для конструкции раскрепления принималась в соответствии с п. 1.2.1.3, п.1.2.1.5, п. 1.2.1.10 ДБН В.2.6-163:2010 [4] с использованием табл. Е.1, Е.5.

Расчеты выполняли различными программными комплексами (ПК) с различными подходами к моделированию для проверки и подтверждения адекватности полученных результатов и принятых конструктивных решений: ПК «АВАQUS» и ПК «ЛИРА-САПР 2011». В используемых ПК модель металлоконструкций ВБ представляла со-

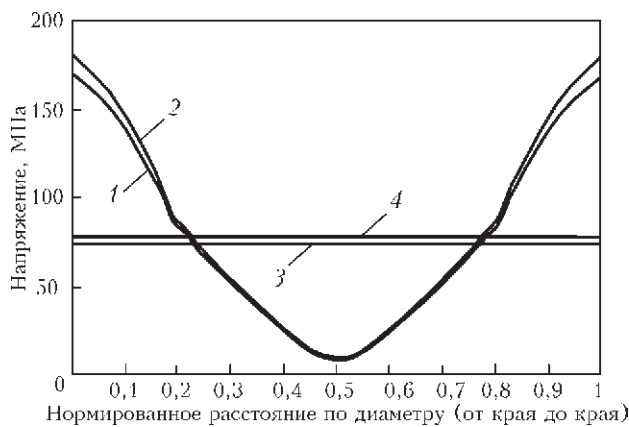


Рис. 7. Распределение сейсмических напряжений в зоне максимума по диаметру (поперечному сечению) при МРЗ 7 баллов (0,1 g): 1 – по 4-й теории прочности; 2 – по 3-й теории прочности; 3 – среднее по сечению по 4-й теории; 4 – среднее по сечению по 3-й теории

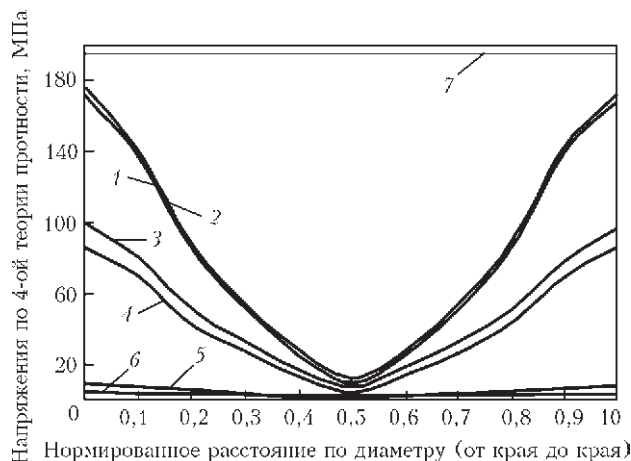


Рис. 8. Распределение напряжений по диаметру (поперечному сечению) в зоне максимальных сейсмических напряжений по 4-й теории прочности для различных эксплуатационных режимов при МРЗ 7 баллов (1 – МРЗ; 2 – НУЭ+МРЗ; 3 – НУЭ+ПА+ПЗ; 4 – ПЗ; 5 – ПА; 6 – НУЗ; 7 – расчетное сопротивление)

бой единую пространственную систему. Расчеты выполняли в два этапа – на первом определялись внутренние напряжения в элементах металлоконструкции ВБ реактора без дополнительного раскрепления, а на втором – выполнялся анализ напряженного состояния элементов ВБ с учетом дополнительного раскрепления. При расчете учитывали действительные условия эксплуатации металлоконструкций ВБ, а также возможные динамические воздействия для сочетаний нагрузок: нормальные условия эксплуатации + максимальное расчетное землетрясение (НУЭ+МРЗ), нормальные условия эксплуатации + проектная авария + проектное землетрясение (НУЭ+ПА+ПЗ), нормальные условия эксплуатации + проектное землетрясение (НУЭ+ПЗ).

Для решения поставленной задачи были построены геометрические модели металлоконструкций ВБ без дополнительных конструкций

раскрепления и с их наличием (рис.4). При этом в построении расчетных моделей учитывались особенности конструкции дополнительных горизонтальных распорок, разработанных с учетом возможных температурных перемещений металлоконструкций ВБ в процессе эксплуатации. Для этого предусматривались зазоры по 2 мм в торцах с каждой стороны распорок. При динамических колебаниях ВБ распорки работают только на сжатие, и только те, в сторону которых происходит колебание ВБ. Распорки, которые в этот момент находятся с противоположной стороны, выключаются из работы и вступают в работу только в случае колебания ВБ в их сторону.

На рис. 5 показана зона максимальных сейсмических нагрузок для исходной модели (без установок распорок и раскосов) – зона штанг верхнего пояса. Максимальные напряжения составляют порядка 340 МПа при МРЗ магнитудой 6 баллов. Установка раскосов и распорок позволяет снизить напряжения до приемлемого уровня. Так, на рис. 6 показана зона штанг верхнего пояса модернизированной модели при МРЗ магнитудой 7 баллов – максимальные напряжения по 4-й теории прочности составляют 172 МПа. При этом из рис. 7 видно, что напряжения возникают в основном в результате изгиба и максимум достигается только на поверхности штанг, центральная (внутренняя) часть штанг является менее нагруженной. На рис. 8 представлены уровни напряжений в наиболее опасном с сейсмической точки зрения зоне штанг в различных эксплуатационных режимах. При этом видно, что максимум не доходит до уровня расчетного сопротивления.

Выводы

Выполненные прочностные расчеты двумя независимыми программными комплексами ПК «ABAQUS» и ПК «ЛИРА САПР 2011», показали, что прочность элементов металлоконструкции верхних блоков энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» без учета дополнительного раскрепления от внешних динамических воздействий не обеспечена, так как требования [4, 5] не выполняются.

Предложенная в техническом проекте установка дополнительных элементов раскрепления металлоконструкций верхнего блока снижает приведенные (действующие) напряжения в режиме НУЭ+МРЗ до уровня ниже допускаемых. При этом наблюдается снижение напряжений в наиболее нагруженных конструктивных элементах металлоконструкций верхних блоков энергоблоков №1 и №2 ОП «Ривненская АЭС» – несущих штангах с 278,3 до 185,0 МПа (172 МПа по 4-й теории прочности) в сравнении с вариантом без раскрепления. Максимальные продольные усилия в



горизонтальных дополнительных элементах раскрепления составляют $N_{\max} = -116,0$ кН. Таким образом, установка элементов усиления при наиболее неблагоприятном сочетании нагрузок НУЭ + МРЗ способствует снижению напряжений в среднем на 36 %. При этом нет превышения расчетного сопротивления согласно ДБН В.2.6-163:2010 [6], которое равно 195 МПа. Таким образом, прочность элементов металлоконструкции верхних блоков энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» с учетом дополнительного раскрепления от внешних динамических воздействий обеспечена, так как требования [4, 5] выполняются.

При нагреве конструкций на 50 °С линейные перемещения раскрепленного распорками среднего пояса происходят в пределах имеющихся температурных зазоров – 2 мм. Продольные усилия в распорках в пределах рассматриваемого температурного перепада (до 50 °С) составят не более 0,014 кН. Фактически в рассмотренном нагружении происходит выборка предусматриваемых температурных зазоров и включение в работу распорок без создания дополнительных усилий в поясе.

The main purpose of this work is taking a number of measures to control the ageing of head packages (HP) of reactors #1, 2 of SC "Rivnenskaya NPP" allowing for current requirements made by the international and local regulatory bodies to improvement of NPP reliable and safe operation. One of the components in this research area is performance of confirmatory strength analysis of HP metal structures (MS) at exposure to external dynamic loads, which may be caused by seismic impact, considering the events of March 11, 2011 at Fukushima-1 NPP. The paper presents the results of strength analysis of MS of HP in reactors # 1, 2 of SP "Rivnenskaya NPP" at exposure to external dynamic impact in the case of design solution and in the case of additional fastening of HP MS. A practical realization of this work is development of preliminary design for additional fastening of HP MS, allowing for upgrading of both the thermomechanical equipment, and building structures.

Key words: head package, WWER-440, metal structure, strength, seismic stability

При режиме НУЭ+ПА+ПЗ максимальные напряжения составляют 106 МПа, что значительно меньше расчетного сопротивления 195 МПа. Сейсмическая прочность обеспечивается. Также следует отметить, что режим НУЭ+МРЗ при землетрясении магнитудой 7 баллов является огибающим для режима НУЭ+ПА+ПЗ.

1. У213-Р-1964. Корпус реактора. Расчет на прочность. Определение нагрузок на элементы корпуса реактора и верхнего блока от сейсмических воздействий и разрывов трубопроводов. – ОКБ «Гидропресс», 2009.
2. 191-02-ПЕ-12. Перечень исходных событий, в результате которых возникают «жесткие» условия окружения. Квалификация оборудования. Энергоблок № 1, 2. – ОП РАЭС, 2012.
3. У213-ТИ-1770. Отчет ОКБ «Гидропресс». Верхний блок. Заключение о техническом состоянии и остаточном ресурсе. Блок №1 Ровенской АЭС.
4. ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – Київ: Мінбуд України, 2010. – 209 с.
5. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

Поступила в редакцию
06.05.2013

НОВАЯ КНИГА

Сидорец В. Н., Пентегов И. В.

Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.



Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»



ФОКУСИРУЕМЫЕ ПЬЕЗОПРИЕМНИКИ ДЛЯ АКУСТОТЕРМОМЕТРИИ

С.А. НАЙДА, Е.С. ДРОЗДЕНКО

НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Рассмотрено новое направление в ранней медицинской диагностике – диагностика по пассивному функциональному изображению тела человека, полученному методом акустотермометрии. Метод состоит в регистрации собственного теплового акустического излучения тела с помощью пьезоприемников. Акустотермометр позволяет измерять не только поверхностную, но и глубинную температуру, что принципиально невыполнимо средствами радиометрии, инфракрасной техники и др. Метод акустотермометрии, кроме медицины, может применяться в таких областях как геофизика, океанология, техника. В настоящей работе на основе обоснованных моделей получены соотношения, позволяющие рассчитать оптимальные параметры акустотермометра. Использование в пьезоприемнике фокусировки теплового акустического излучения с помощью эллиптической линзы дает возможность измерять внутреннюю абсолютную температуру тела одноканальным и одночастотным акустотермометром, с пороговым значением точности измерения. Библиогр. 16, рис. 2.

Ключевые слова: акустотермометрия, тепловое акустическое излучение, пьезоэлектрический преобразователь, глубинная температура

Акустотермометрия – это метод, позволяющий неинвазивно измерять внутреннюю температуру объекта, в частности, человеческого организма, посредством приема и регистрации теплового акустического излучения.

Внутренняя температура тела является важным параметром для диагностики и контроля. Согласно существующим представлениям, изменение температуры тканей обычно предшествует изменениям на структурном уровне, которые могут быть обнаружены при общепринятых методах исследования – УЗИ, рентгене, пальпации [1]. Поэтому измерение внутренней температуры представляет интерес для ранней диагностики заболеваний, позволяет делать выводы о состоянии и функционировании органов и систем, выявлять воспалительные процессы и контролировать реакцию организма на различные воздействия, в частности, локальную гипертермию – способ лечения онкологических заболеваний, который заключается в нагреве опухолевой ткани до определенной температуры [2].

Исследования в области акустотермометрии ведутся уже около 30 лет, однако на сегодня эффективное решение задачи построения акустотермометра (АТ), имеющего требуемые характеристики по пространственному разрешению, чувствительности и глубине зондирования, отсутствует [3]. Перспективы создания акустотермометров, предлагаемых ведущими научными группами из ИРЭ РАН, МГУ и ИПФ РАН, связывали с использованием большого количества антенн, осуществляющих электронное или механическое сканирование объекта вдоль различных направлений либо

на различных частотах. Результаты измерений предлагалось записывать в память компьютера, который осуществлял бы восстановление неизвестной температуры посредством решения обратной реконструктивной задачи акустотермометрии с использованием известной теоретической зависимости восстанавливаемой температуры от фактически измеряемых физических параметров [4]. Однако при проведении теоретических исследований и построении экспериментальных макетов авторами был допущен ряд неточностей, подробно рассмотренных в работах [5, 6]. Также следует отметить, что при установлении связи между термодинамической температурой и измеряемой мощностью теплового акустического шума использовали предположения о параметрах регистрирующих устройств, некоторые из которых были недостаточно обоснованными [4].

Отсутствие АТ как завершеного прибора с требуемой для целей пассивной диагностики точностью определения глубинной температуры послужило стимулом для научных исследований на кафедре акустики и акустоэлектроники НТУУ «КПИ».

В результате был разработан нулевой модуляционный метод регистрации слабых шумовых сигналов, проанализирована электрическая схема, с помощью которой он реализовался, сформулированы требования к отдельным ее блокам, позволяющие повысить точность измерений [7], была создана теория АТ для определения локальной температуры в улитке внутреннего уха и головном мозге новорожденных с пространственным разрешением 1 мм, точностью не хуже 0,2 °С, постоянной времени 4 с и глубиной зондирования



4 см [8]. Также в несколько этапов модифицировалась схема модуляционного АТ: было предложено использовать фокусируемую двояковогнутую эллиптическую линзу и пьезопреобразователь с четвертьволновыми согласующими слоями [5, 6], двухполупериодный амплитудный детектор [9], проведено теоретическое обоснование схемы фокусируемого АТ в сочетании с электронной коммутацией, позволяющей обойтись односпектральным и однолучевым зондированием [10].

Целью настоящей работы является выбор оптимальной с точки зрения соотношения между коэффициентом передачи и входным электрическим импедансом конструкции фокусируемого пьезоприемника (ПП) для измерения внутренней температуры одноканальным одночастотным методом на основании сравнения нормированных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) вышеуказанных параметров.

Расчетные соотношения метода акустотермометрии. В качестве модели биологической ткани используем воду, которая имеет близкое значение акустического импеданса. Поскольку физической причиной как электромагнитного (радиочастотного), так и акустического тепловых излучений любой среды является хаотическое движение его атомов и молекул, выражение для спектральной плотности акустического излучения безграничной среды аналогично выражению закона излучения Рэлея–Джинса, являющегося частным случаем закона излучения абсолютного черного тела Планка при $hf \ll k_0 T$, а именно:

$$\varepsilon(f, T) = \frac{dI}{df} = \frac{2\pi f^2 k_0 T}{v^2}, \quad (1)$$

где $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка; $k_0=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; f, v – частота и скорость акустических колебаний в среде; T – термодинамическая температура среды.

Учитывая, что интенсивность акустических волн $I = p^2 / (\rho v) = \overline{p^2} / (z_2)$, для квадрата акустического давления $\overline{p^2}$ тепловых акустических колебаний в интервале $\Delta f \ll f$ безграничной среды с температурой T из (1) получаем:

$$\overline{p^2} = \frac{4\pi f^2 \rho k_0 T \Delta f}{v}, \quad (2)$$

где ρ – плотность; $z_2 = 1,54 \cdot 10^6$ Па·с/м – удельный акустический импеданс воды.

Пусть датчиком давления, как и в работе [11], является круглая пьезоэлектрическая пластина с диаметром $D \gg \lambda$ (λ – длина волны в воде) и с удельным импедансом z_0 , нагруженная с тыльной стороны демпфером с удельным импедансом z_1 , а с передней – имеющая один или два четвертьволновых слоя с удельными импедансами $(z_3/z_2)^2 = z_0/z_2$ или $(z_3/z_4)^2 = z_0/z_2$ соответ-

ственно, причем, электрической нагрузкой ПП является индуктивность $L \approx 1 / (\omega_0^2 C_0)$, ω_0 – частота его механического резонанса, а C_0 – статическая емкость пьезопластины.

Воспользовавшись представлением этой системы в виде сложного электромеханического четырехполюсника, описываемого цепочечной А матрицей, для коэффициента преобразования давления p в плоской волне, падающей нормально к поверхности ПП, получим выражение:

$$K_{п0} \equiv U / p = (z_0 / z_2)^{1/2} (l_0 e_{33}), \quad (3)$$

где $l_0 = v^D / (2f_0)$ – толщина пьезопластины; v^D – скорость звука при постоянной индукции D ; e_{33} – пьезоэлектрическая постоянная.

Для наиболее распространенной пьезокерамики и воды $(z_0/z_2)^{1/2} \approx 4,5$. Видно, что слои действуют как трансформаторы давления, увеличивая $K_{п0}$. Кроме того, они расширяют полосу пропускания Δf даже в отсутствии демпфера ($z_1 = 0$), так что в случае двух слоев $\Delta f / f_0 \approx 0,6$. При этом можно считать, что $K_{п}(f) \approx K_{п0}$ внутри полосы Δf и $K_{п}(f) = 0$ вне этой полосы.

Учтем то принципиальное обстоятельство, что поле тепловых акустических колебаний является полем некогерентных источников: имеет равновероятную направленность и случайный характер фаз в пространстве. Наиболее распространенной моделью такого поля в гидроакустике является поле, в котором статистически независимые источники равной производительности равномерно распределены по поверхности сферы в дальнем поле антенны (ПП) [12]. В рамках этой модели коэффициент преобразования давления тепловых колебаний [13]:

$$K_{ш} = \frac{K_{п0}}{\sqrt{K}}, \quad (4)$$

где $K = 4\pi A_0 / \lambda^2 = (\pi D / \lambda)^2$ – коэффициент концентрации антенны; A_0 – площадь ПП.

Для использованного в работе [14] ПП с $D = 20$ мм, $f_0 = 2$ МГц ($\lambda = 0,7$ мм): $K_{ш} = K_{п0} / 90$, т.е. почти на два порядка меньше $K_{п0}$.

С учетом (2) и (4) выражение для квадрата напряжения на электродах ПП, соответствующего тепловым акустическим колебаниям среды (объекта), имеет вид:

$$\overline{U_o^2} = K_{ш}^2 \overline{p^2} = \frac{z_2}{A_0} k_0 T_0 K_{п0}^2 \Delta f, \quad (5)$$

т.е. представляет собой «белый» шум. Здесь Δf может быть порядка f_0 . На выходе ПП оно квадратично суммируется с напряжением его собственных



тепловых шумов, которое, согласно теореме Найквиста, равно:

$$\overline{U_{\text{ш}}^2} = 4Rk_0 T_{\text{ш}} \Delta f, \quad (6)$$

где $R = \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} R(f) df / \Delta f$ – эквивалентное сопротивление шумов; $R(f)$ – действительная часть электрического импеданса ПП с электрической нагрузкой; $T_{\text{ш}}$ – температура ПП, $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$.

Можно показать, что следствием комплексной теоремы взаимности ПП является соотношение:

$$K_{\text{п}}(f) \approx 2 \sqrt{\frac{RA_0}{Gz_1 + z_2}}, \quad (7)$$

где $G=1$, $G=(z_2/z_3)^2=z_2/z_0$, $G=(z_4/z_3)^2=z_2/z_0$ для случаев отсутствия, наличия одного или двух слоев соответственно; точное равенство выполняется на частоте f_0 . С учетом (7) отношение шумов среды и ПП равно:

$$\frac{\overline{U_o^2}}{\overline{U_{\text{ш}}^2}} = \frac{T_o / T_{\text{ш}}}{1 + Gz_1 / z_2}. \quad (8)$$

Из этого выражения видно, что при $T_{\text{ср}} \approx T_{\text{ш}}$, отсутствии согласующих слоев ($z_3=z_4=z_2$) и $z_1/z_2 \gg 1$ для получения широкой полосы пропускания ПП необходимо, чтобы отношение было значительно меньше единицы. Поэтому для использования в акустотермометре этот случай не представляет интереса. При наличии же слоев и $Gz_1/z_2=z_1/z_0 < 1$: $\overline{U_o^2} \approx \overline{U_{\text{ш}}^2} / 2$.

Из соотношения (5) можно определить температуру однородной среды. В случае однородной среды с известной температурой T_0 , в которой на глубине z имеется участок, нагретый относительно среды на температуру ΔT , измеряемая температура равна $T = T_0 + \Delta T \exp(-z/\delta)$, и для определения z и ΔT необходимо двухчастотное зондирование на частотах f_1 и f_2 , так что $T_1 = T_0 + \Delta T \exp(-z/\delta_1)$, $T_2 = T_0 + \Delta T \exp(-z/\delta_2)$, где δ_1 , δ_2 – длины затухания на этих частотах. Решая эту систему уравнений относительно ΔT и z , получим:

$$\Delta T = \left((T_1 - T_0)^{\delta_1} / (T_2 - T_0)^{\delta_2} \right)^{1/(\delta_2 - \delta_1)},$$

$$z = \ln \left[\frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} \right] \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 - \delta_2}. \quad (9)$$

Рассмотрим случай ПП с фокусирующей линзой, который в [14] использовался только для демонстрации большого поперечного пространственного разрешения, но ранее не рассматривался. Возьмем в качестве радиуса сферы, синфазно излучающей во всех направлениях и находящейся

в фокусе линзы, радиус пространственной корреляции $\rho = \lambda/2$. Учтя расхождение сферической волны и ее затухание с коэффициентом $\gamma = Af^n$ (для биологической ткани $n \approx 1$), в плоскости ПП получим сферическую волну с давлением:

$$\overline{p^2} = \frac{\pi \cdot z_2}{F^2} k_0 T_o(F) \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} \exp(-AfF) df, \quad (10)$$

где F , $T_o(F)$ – фокусное расстояние линзы и температура среды в фокусе.

Выражение для напряжения на электродах ПП имеет вид:

$$\overline{U_{\text{ф}}^2} = K_{\text{п0}}^2 \overline{p^2} =$$

$$= \overline{U_o^2} \left\{ \frac{\exp(-Af_{\text{н}}F) - \exp(-Af_{\text{в}}F)}{A\Delta f F} \frac{\pi D}{2F} \right\}^2, \quad (11)$$

где $\overline{U_o^2}$ определяется из (5) с заменой T_o на $T_o(F)$. Если $\gamma_{\text{в,н}} \ll 1$, выражение переходит в следующее:

$$\overline{U_{\text{ф}}^2} = \overline{U_o^2} \left\{ \frac{\pi D}{2F} \right\}^2. \quad (12)$$

Спектр напряжения представляет собой «белый» шум. Взяв $(D/F)_{\text{max}} = 2$, получим $\overline{U_{\text{ф}}^2} = \overline{U_o^2} \cdot \pi^2$, т.е. интенсивность, обусловленная сфокусированным сигналом, почти в 10 раз больше, чем несфокусированным. Поскольку интенсивность собственных шумов ПП (6) от фокусировки не зависит, то отношение $\overline{U_o^2} / \overline{U_{\text{п.п}}^2}$ во столько же раз увеличится. Этот случай можно реализовать, если для измерения поверхностной температуры тела ПП с линзой расположить на расстоянии F от тела, а пространство между ними в виде сходящегося конуса заполнить водой, закрыв вершину конуса акустически прозрачным окном.

В случае $\gamma F \approx 1$ коэффициент при $\overline{U_o^2}$ в (11) все еще гораздо больше 1, т.е. имеем выигрыш и при определении глубинной температуры. Вторым важным преимуществом при этом является то, что для этого достаточно одночастотного зондирования.

Что касается спектра напряжения в (11), то оно уже не является «белым» шумом. Однако определение из него температуры в фокусе $T_o(F)$ с учетом того, что $\gamma(f) = Af^n$ предполагается известным, не представляет труда.

Особенностью акустотермометра биологических объектов является требование чувствительности порядка 1К. Для измерения интенсивности шумовых сигналов с высокой чувствительностью в радиоастрономии используются цепи, состоящие из трех звеньев: полосового фильтра высокой частоты (ФВЧ); квадратичного детектора (КД) с нелинейной характеристикой $y = \beta x^2$ и фильтра



нижних частот (ФНЧ). Считается, что $x(t)$ является стационарным случайным процессом с нулевым средним значением, т.е. $x(t) = 0$. Тогда коэффициент сглаживания флуктуаций Q , равный отношению относительной флуктуации $\sigma_y/y = \sqrt{2}$ на выходе детектора к относительной флуктуации $\sigma_\xi/\xi = \theta/T_o$ (при $U_o^2 \gg U_{пп}^2$) на выходе ФНЧ будет:

$$Q \equiv \frac{\sigma_y/y}{\sigma_\xi/\xi} = \sqrt{\Delta\omega/\Delta\Omega}, \quad (13)$$

где $y = \beta x^2$, $\sigma_y^2 = 2\beta^2 x^2$, $\sigma_y, \sigma_\xi, \theta$ – среднеквадратичные отклонения величин y, ξ, T_o от их среднего значения.

Отсюда следует, что

$$\theta = T_o \sqrt{\frac{2\Delta\Omega}{\Delta\omega}}, \quad (14)$$

где $\Delta\omega$ – полоса ФВЧ, центрированная около ω_0 ; $\Delta\Omega \ll \Delta\omega$ – полоса ФНЧ.

Это предельное значение чувствительности, которое достигается только тогда, когда относительная чувствительность выходного прибора не хуже θ/T_o . Для этого на измерительный прибор можно подать встречное постоянное напряжение ξ_o . Однако стабильность показаний прибора нарушается медленными уходами усиления (дрейф нуля). От их влияния избавляет модуляционный метод измерения.

В работе [11] использовалась механическая модуляция для нефокусируемого ПП: периодическое с частотой 10 Гц переключение излучения от объекта на излучение из воды, находящейся между ПП и модулятором. При этом на вход ФВЧ (ПП и УВЧ) поступает случайный процесс:

$U_\Sigma(t) = U_{пп}(t) + U_o(t)$ в течение времени $0 < t < \pi/\Omega$;

$U_\Sigma(t) = U_{пп}(t) + U_b(t)$ в течение времени $\pi/\Omega < t < 2\pi/\Omega$.

Поскольку $U_{пп}(t), U_o(t), U_b(t)$ – независимые случайные процессы, они попарно квадратично суммируются, так, что среднеквадратичное напряжение можно представить в виде:

$$\overline{U_\Sigma^2} = \overline{U_{пп}^2} + \overline{U_b^2} + \mu(t) \cdot (\overline{U_o^2} - \overline{U_b^2}), \quad (15)$$

где $\mu(t) = 1$ при $0 < t < \pi/\Omega$ и $\mu(t) = 0$ при $\pi/\Omega < t < 2\pi/\Omega$, а изменяющаяся с частотой Ω часть $\overline{U_o^2} - \overline{U_b^2} \ll \overline{U_{пп}^2} + \overline{U_b^2}$.

Метод четырехполюсника для нахождения частотных характеристик основных параметров ПП. При анализе пьезопреобразователей во многих случаях удобным является использование эквивалентных схем, составленных на основе электромеханических аналогий (электрическое напряжение – сила и электрический ток – колебательная скорость). Полученные таким образом

схемы рассчитывают с помощью теории электрических цепей. Отметим, что метод электромеханических аналогий дает возможность на основе простых аналитических соотношений определить электрические и акустические параметры пьезопреобразователя вблизи его резонансных частот, но не позволяет построить их АЧХ, что часто необходимо при проведении инженерных расчетов.

Для получения АЧХ пьезопреобразователь, представляющий собой в общем случае систему, состоящую из пьезоэлемента, переходных слоев и демпфирующей среды, рассматривают как эквивалентный электромеханический четырехполюсник с акустическим входом (или выходом) и электрическим выходом (или входом). Также в качестве эквивалентных четырехполюсников рассматривают каждый из вышеуказанных элементов системы.

Известно, что для любого четырехполюсника справедливо следующее уравнение:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix},$$

где X_1, Y_1 – входные процессы (воздействия); A_{mn} – коэффициенты четырехполюсника, X_2, Y_2 – выходные процессы (отклики).

В записанном выражении наибольший интерес представляют коэффициенты четырехполюсника A_{mn} , поскольку с их помощью могут быть получены АЧХ основных параметров пьезопреобразователя, в частности, входного электрического импеданса и передаточной функции.

Рассмотрим ПП (рис. 1) с индуктивностью L в качестве электрической нагрузки. Как известно [15], индуктивность подключается параллельно пьезопреобразователю, компенсирует на частоте антирезонанса ω_0 электрическую емкость зажатой пьезопластины C_0 , применяется для расширения рабочего частотного диапазона и повышения чувствительности пьезоприемника на частотах ω , отличающихся от антирезонансной. ПП механи-

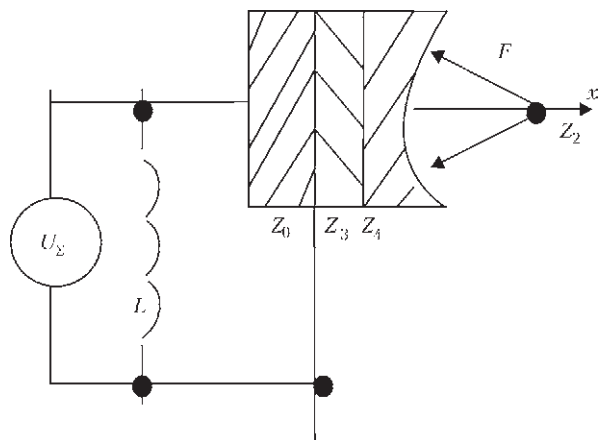


Рис. 1. ПП с согласующим слоем и акустической линзой, нагруженный индуктивностью



чески недемпфирован, акустический контакт пьезоэлемента с рабочей средой (удельное акустическое сопротивление которой z_2) осуществляется через два переходных слоя (удельные акустические сопротивления соответственно z_3 и z_4).

На основании соотношений, приведенных в [15, 16], получим расчетные соотношения и построим нормированные АЧХ активной составляющей входного электрического импеданса и передаточной функции с помощью метода четырехполюсников для различных конструкций фокусируемых ПП. Проанализировав полученные результаты, выберем конструкцию для измерения внутренней температуры одноканальным одночастотным методом.

Полный входной электрический импеданс ПП определяется выражением [15]:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{A_{11}^{(4)*} A_0 z_2 + A_{12}^{(4)*}}{A_{21}^{(4)*} A_0 z_2 + A_{22}^{(4)*}}, \quad (16)$$

где $A_{mn}^{(4)*}$, $m=1, 2$, $n=1, 2$ – коэффициенты эквивалентного четырехполюсника; A_0 – площадь активной поверхности пьезопластины.

В свою очередь

$$\|A_{mn}^{(4)*}\| = \begin{vmatrix} A_{11}^{(4)*} & A_{12}^{(4)*} \\ A_{21}^{(4)*} & A_{22}^{(4)*} \end{vmatrix} = \|A_{mn}^{Z_{\text{эл}}}\| \|A_{mn}^{(4)}\|, \quad (17)$$

где $\|A_{mn}^{Z_{\text{эл}}}\|$ – матрица преобразования для электрической нагрузки; $\|A_{mn}^{(4)}\|$ – матрица преобразования для системы пьезоэлемент–два согласующих слоя.

Следует отметить, что все последующие выкладки будут проведены в предположении, что амплитуды колебаний равномерно распределены по активной поверхности преобразователя. Такое допущение возможно тогда, когда геометрические размеры активной поверхности намного больше толщины пластины.

Если в качестве электрической нагрузки применяют катушку индуктивности, коэффициенты $A_{mn}^{Z_{\text{эл}}}$ будут равны [16]:

$$A_{11}^{Z_{\text{эл}}} = 1; A_{12}^{Z_{\text{эл}}} = 0; A_{21}^{Z_{\text{эл}}} = \omega_0^2 C_0 / j\omega; A_{22}^{Z_{\text{эл}}} = 1.$$

Матрица преобразования для системы пьезоэлемент–два согласующих слоя определяется следующим образом:

$$\|A_{mn}^{(4)}\| = \begin{vmatrix} A_{11}^{(4)} & A_{12}^{(4)} \\ A_{21}^{(4)} & A_{22}^{(4)} \end{vmatrix} = \|A_{mn}\| \|S_{mn}^{(4)}\|, \quad (18)$$

где $\|A_{mn}\|$ – матрица преобразования для пьезоэлемента; $\|S_{mn}^{(4)}\|$ – матрица преобразования для системы двух согласующих слоев.

Элементы матрицы $\|S_{mn}^{(4)}\|$ равны:

$$\begin{aligned} S_{11}^{(4)} &= \cos(2\pi n_3 x) \cos(2\pi n_4 x) - \\ &- (z_3 / z_4) \sin(2\pi n_3 x) \sin(2\pi n_4 x), \\ S_{12}^{(4)} &= jA_0 z_4 \left[\cos(2\pi n_3 x) \sin(2\pi n_4 x) + \right. \\ &\left. + (z_3 / z_4) \sin(2\pi n_3 x) \cos(2\pi n_4 x) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} S_{21}^{(4)} &= (j / A_0 z_4) \left[(z_4 / z_3) \sin(2\pi n_3 x) \cos(2\pi n_4 x) + \right. \\ &\left. + \sin(2\pi n_4 x) \cos(2\pi n_3 x) \right], \\ S_{22}^{(4)} &= \cos(2\pi n_3 x) \cos(2\pi n_4 x) - \\ &- (z_4 / z_3) \sin(2\pi n_3 x) \sin(2\pi n_4 x), \end{aligned}$$

где $x = \omega / \omega_0$ – относительная частота; $n_i = l_k / \lambda_{0k}$ ($i=3,4$; l_k – толщина k -го слоя; λ_{0k} – длина волны в k -м слое на частоте антирезонанса).

Для механически недемпфированного ПП с учетом того, что механические потери в пьезопластине намного меньше потерь в креплениях элементы матрицы $\|A_{mn}\|$ равны:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{e_{33}}{\omega \epsilon_{33} A_0 z_0 \operatorname{tg}(\pi x / 2)} - \frac{\operatorname{ctg}(\pi x) \epsilon_{33}}{C_0 e_{33} \operatorname{tg}(\pi x / 2)}, \\ A_{12} &= \frac{2j e_{33}}{\omega \epsilon_{33}} - \frac{j \epsilon_{33} A_0 z_0}{C_0 e_{33} \operatorname{tg}(\pi x / 2)}, \\ A_{21} &= \frac{\operatorname{ctg}(\pi x) \epsilon_{33} \omega}{j e_{33} \operatorname{tg}(\pi x / 2)}, \\ A_{22} &= \frac{\epsilon_{33} \omega A_0 z_0}{e_{33} \operatorname{tg}(\pi x / 2)}, \end{aligned} \quad (20)$$

где ϵ_{33} – относительная диэлектрическая проницаемость зажатой пьезопластины.

Подставив выражения (19) и (20) в (18), получим значения коэффициентов $A_{mn}^{(4)}$. Перемножив матрицы в (17), получим частотозависимые коэффициенты $A_{mn}^{(4)*}$, необходимые для нахождения $Z_{\text{вх}}$.

Нормированная частотная характеристика полного входного электрического импеданса носит комплексный характер и может быть представлена в виде [16]:

$$Z_{\text{вх}}(x) / X_{C_0} = R_a(x) / X_{C_0} + jX_e(x) / X_{C_0}, \quad (21)$$

где $X_{C_0} = 1 / \omega_0 C_0$; $R_a(x) / X_{C_0} = \operatorname{Re} [Z_{\text{вх}}(x) / X_{C_0}]$;
 $X_e(x) / X_{C_0} = \operatorname{Im} [Z_{\text{вх}}(x) / X_{C_0}]$.

Для более простых случаев с одним согласующим слоем или без слоев нормированная частотная характеристика может быть получена из выра-

жения (21) заменой z_4 на z_2 ($n_4 = 0$) и z_3 и z_4 на z_2 ($n_3 = 0$ и $n_4 = 0$) соответственно.

Передачная функция ПП определяется выражением [15]:

$$K_{\Pi} = \frac{2}{\frac{A_{22}^{(4)*}}{A_0} + z_2 A_{21}^{(4)*}}. \quad (22)$$

Для выбора наиболее подходящей конструкции ПП, позволяющего измерять внутреннюю температуру одноканальным одночастотным методом, были рассмотрены следующие варианты:

пьезопластина из пьезокерамики PZT-8, четвертьволновой согласующий слой из полистирола ($z_3 = 2,48 \cdot 10^6$ Па·с/м) и биоткань в качестве рабочей среды;

пьезопластина из пьезокерамики PZT-8, четвертьволновой согласующий слой из эпоксидного клея ($n_3 = 0,25$; $z_3 = 3 \cdot 10^6$ Па·с/м), четвертьволновой согласующий слой из полистирола ($n_4 = 0,25$; $z_4 = 2,48 \cdot 10^6$ Па·с/м) и биоткань в качестве рабочей среды;

пьезопластина из пьезокерамики PZT-8, четвертьволновой идеальный согласующий слой ($z_3 = \sqrt{z_0 z_4}$), четвертьволновой согласующий слой из полистирола и биоткань в качестве рабочей среды.

На основании выражений (16)–(22) для каждого случая были построены графики нормированных АЧХ активной составляющей входного электрического импеданса и передачной функции. Нормирование последней проводилось относительно коэффициента $K_{\Pi 0}$. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что оптимальной с точки зрения соотношения между коэффициентом передачи и входным электрическим импедансом является конструкция, приведенная на рис. 2, б, д, состоящая из пьезопластины – четвертьволнового согласующего слоя из эпоксидного клея – четвертьволнового согласующего слоя из полистирола (его функцию выполняет центральная часть акустической линзы) – биоткани.

Из рассмотрения различных способов фокусировки следует, что наибольшее значение $D/2F$ получается с двояковогнутой линзой, для которой:

$$\frac{D}{2F} = 2\sqrt{\frac{1-n}{1+n}}, \quad (23)$$

где $n = c_b/c_l$, $c_b = 1,5 \cdot 10^3$ м/с; c_l – скорость звука в воде и линзе соответственно; F – фокусное расстояние линзы.

В случае линзы из оргстекла ($c_l = 2,7 \cdot 10^3$ м/с, $n = 0,56$): $(\pi D/2F)^2 \leq 12$, а линзы из полистирола ($c_l = 2,37 \cdot 10^3$ м/с, $n = 0,63$): $(\pi D/2F)^2 \leq 9$, т.е. на 25% меньше, чем для линзы из оргстекла. Существенно также, чтобы линза была безаберрационной, т.е. эллиптической.

Из (23) видно, что с увеличением F необходимо пропорционально увеличивать D . Однако при этом, согласно (4) – (6), будет уменьшаться $\bar{U}_{\Pi}^2$ и условие $\bar{U}_{\Pi}^2 < \bar{U}_{\Sigma}^2$ может перестать выполняться. В этом случае необходимо, насколько возможно, увеличить отношение l_0/e_{33} . Поскольку $l_0 f_0 = N_t$ – частотному коэффициенту для колебаний по толщине, l_0 однозначно связано с частотой f_0 , которую из соображений проникновения УЗ в тело человека на глубину зондирования без заметного затухания целесообразно выбрать равной 1 МГц. Таким об-

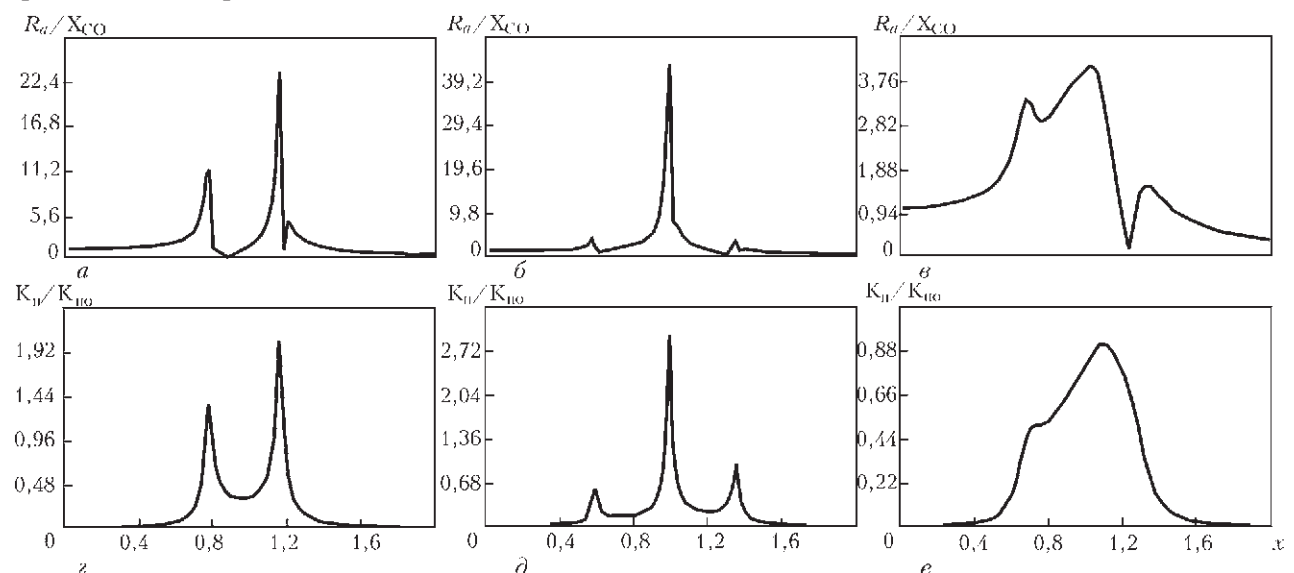


Рис. 2. Нормированные АЧХ активной составляющей входного электрического импеданса (а–е) и передачной функции пьезоприемника (з–е) для конструкций: а, з – пьезопластина–четвертьволновой согласующий слой–биоткань; б, д – пьезопластина–два четвертьволновых согласующих слоя–биоткань; в, е – пьезопластина–идеальный четвертьволновой согласующий слой–четвертьволновой согласующий слой–биоткань



разом, из имеющихся пьезокерамических материалов следует выбирать пьезокерамику с наименьшим значением e_{33} .

В работе использовался ПП с $D = 28$ мм, $F = 14$ мм, $l_0 = 2,6$ мм из пьезокерамики PZT-8 ($e_{33} = 13,2$ Кл/м², $z_0 = 35 \cdot 10^6$ Па·с/м), $R = 550$ Ом. Для $\Delta f = 0,5$ МГц: $(\bar{U}_\Sigma^2)^{1/2} \cong 8,1$ мкВ.

Выводы

На основе расчета частотных характеристик ПП установлено, что конструкция ПП акустотермометра должна содержать пластину из пьезокерамики с наименьшим значением e_{33} , четвертьволновой согласующий слой и акустическую линзу. При этом ПП должен иметь воздушную тыльную нагрузку и быть электрически нагруженным параллельно подключенной индуктивностью.

Применение фокусировки теплового акустического излучения с помощью акустической линзы позволяет:

- измерять и сканировать глубинную температуру тела человека одноканальным, одночастотным акустотермометром;
- в отличие от многочастотного метода, предлагаемого другими авторами, рабочую частоту акустотермометра можно выбирать низкую (около 1 МГц), что обеспечивает большую глубину проникновения в ткани;
- получить пороговое значение точности измерения глубинной температуры объекта;
- вместе с модифицированной схемой нулевого модуляционного метода [5] создать действующий макет акустотермометра.

1. Гусманов В. А., Переверзев Б. М., Никитин А. В. Основы диагностики заболеваний внутренних органов. – Ростов-на-Дону: МарТ, 2003. – 352 с.
2. Ставицкий Р. В., Лебедев Л. А., Паньшин Г. А. Неинвазивный динамический контроль в процессе лечения он-

кологических заболеваний // Медицинская техника. – 2009. – № 1. – С. 19–21.

3. Мансфельд А. Д. Акустотермометрия. Состояние и перспективы // Акустический журнал. – 2009. – 55, № 4–5. – С. 546–556.
4. Субочев П. В. Развитие методов пассивной акустической термомографии и акустотермометрии: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Нижний Новгород: Институт радиотехники и электроники РАН, 2009. – 18 с.
5. Найдя С. А. Акустотермометрия жидких объектов с помощью пьезоприемников мегатерцового диапазона // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2002. – № 3. – С. 41–48.
6. Найдя С. А. Пьезоприемники теплового акустического излучения для зондирования внутренней температуры объектов // Там же. – 2003. – № 1. – С. 25–29.
7. Дидковский В. С., Найдя С. А. Нулевой модуляционный метод измерения теплового акустического излучения биологических объектов // Электроника и связь. – 2000. – 2, № 8. – С. 253–256.
8. Найдя С. А. О возможности одноканальной динамической пассивной акустотермометрии головного мозга и улитки внутреннего уха новорожденных с помощью фокусированного ультразвука // Там же. – 2003. – № 18. – С. 9–10.
9. Дрозденко Е. С., Найдя С. А. О влиянии детектирования шума на точность измерения температуры акустотермометром // Там же. – 2009. – № 6. – С. 62–67.
10. Найдя С. А., Дрозденко Е. С. Теоретическое обоснование фокусируемого одночастотного динамического акустотермометра // Там же. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2010 – № 2. – С. 234–236.
11. Гуляев Ю. В., Годик Э. Э. Дементенко В. В., Пасечник В. И., Рубцов А. А. О возможностях акустической термографии биологических объектов // Доклады АН СССР. – 1985. – 183, № 6. – С. 1495–1499.
12. Смаришев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1973. – 278 с.
13. Справочник по гидроакустике / А.П.Евтютов, А.Е.Колесников, А.П.Ляликов и др. – Л.: Судостроение, 1982. – 344 с.
14. Пасечник В. И. Акустическая термография биологических объектов // Радиотехника. – 1991. – № 8. – С. 77–80.
15. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. – Вильнюс: Минтис, 1974. – 258с.
16. Дідовський В. С., Найдя С. А. П'єзоелектричні перетворювачі медичних ультразвукових сканерів: Навч. посібник. – Київ: НТУУ «КПІ», 1999. – 179 с.

The paper presents a new and urgent direction in early medical diagnostics – diagnostics by passive functional image of the human body, obtained by acoustic thermometry method. The method consists in recording the body thermal acoustic radiation by piezo receivers. Acoustic thermometer allows measurement not only of surface, but also in-depth temperature that cannot, in principle be performed by the means of radiometry, infrared engineering, etc. In addition to medicine, the acoustic thermometry method can be used in such fields as geophysics, oceanology and engineering. In this study substantiated models were used to derive relationships, allowing calculation of optimum parameters of acoustic thermometer. Application of focusing of thermal acoustic radiation in piezo receiver by an elliptical lens enables measurement of inner temperature of the body by single-channel and one-frequency acoustic thermometer with a threshold value of measurement accuracy.

Key words: acoustic thermometry, in-depth temperature, single-channel one-frequency method

Поступила в редакцию
02.04.2013



ПОРТАТИВНАЯ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА

В.А.ТРОИЦКИЙ

ИЭС им.Е.О.Патона НАНУ. 03680. г. Киев-150, ул.Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Описана портативная рентгентелевизионная система РТВ-03, состоящая из острофокусного рентгеновского аппарата, компактного электронно-оптического преобразователя, ноутбука с цифровой обработкой рентгеновских и оптических изображений объекта. Показаны новые технологические возможности неразрушающего контроля, основанные на использовании данной аппаратуры. Библиогр. 7, рис. 16.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, портативная рентгентелевизионная система

Институт электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины совместно с Киевским политехническим институтом разработал портативную цифровую телевизионную рентгеновскую аппаратуру с цифровой обработкой результатов контроля. С ее помощью можно получать как радиоскопические, так и радиографические изображения на бумажном или другом носителе [1–4].

На рис. 1 показана принципиальная структурная схема устройства, включающая портативный рентгеновский аппарат, пульт управления, монокристаллический экран, ноутбук и принтер, которые располагаются, в основном, в двух кейсах.

На рис. 2 показан процесс закрепления такой аппаратуры на четырехниточном трубопроводе кислородного завода. Видны четыре трубки диаметром 18 мм из нержавеющей стали, общая протяженность которых несколько километров. Другие методы НК в данном случае малоэффективны. Просматривались одновременно четыре параллельно идущих трубопровода. По сравнению с другими [5–7] техническими решениями, основные преимущества такой аппаратуры состоят в следующем:

- высокая производительность и мобильность;
- высокая разрешающая способность и стабильность изображения;
- цифровая обработка изображения;

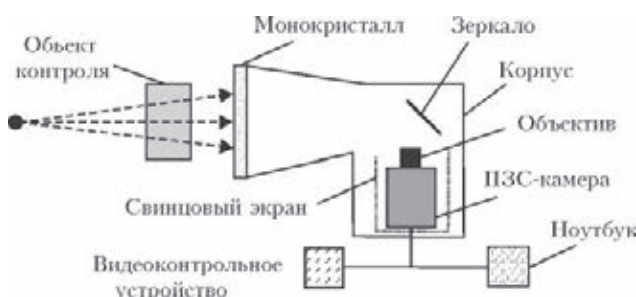


Рис. 1. Принципиальная схема рентгеновской телевидео-аппаратуры

- построение графиков распределения плотности изображения;
- возможность архивирования изображений;
- выполнение функции радиоскопии и радиографии;
- небольшие габариты;
- возможность контроля движущихся объектов.

Такая телевизионная система, условно названная РТВ-03, обеспечивает чувствительность радиационного контроля порядка 2,0 %, что соответствует чувствительности некоторых пленочных систем. Использование РТВ-03 снижает стоимость и повышает скорость рентгеновского контроля в несколько раз. Запоминать и архивировать теперь можно только нужную информацию о состоянии объекта контроля, вид и размер обнаруженных дефектов, заполнение объемов, утонение стенок и т.п.

Аппаратура РТВ-03 поставляется заказчику в течение трех месяцев после заключения договора и формулирования условий использования имеющихся у заказчика средств. Поставляемая портативная, легкая, полностью цифровая система формирования на мониторе видео- и рентгеновского изображений, выполненная на основе видео-контрольных систем, ПЗС-матриц и CsJ, Gd₂O₂S (Tb) экранов, изготавливается под конкретные



Рис. 2. Размещение РТВ-03 на четырехниточном трубопроводе

требования заказчика. Предлагаемый комплект оборудования типа РТВ-03 является результатом длительной исследовательской работы и производится по индивидуальному заданию заказчика. Оно позволяет проводить обследования самых разнообразных неразъемных конструкций и материалов (рис. 3–16).

На экране ноутбука можно получить одновременно рентгеновское и оптическое изображение объекта высокого качества, которые можно совмещать, анализировать, корректировать, выделять интересные фрагменты. Удобное для использования программное обеспечение позволяет проводить точные исследования деталей, их внутренние и внешние изображения. Время получения результата – мгновенное. Значительно повышается рентабельность и наглядность НК. Любые объекты из пластмасс, металла, бетона, композитов с эффективной толщиной по стали до 20 мм могут быть быстро обследованы и иметь оценку их реального качества. При необходимости диапазон эффективных толщин может быть увеличен в соответствии с возможностями излучателя заказчика и предоставляемыми флюоресцирующими экранами, типами ПЗС-матриц и пр.

Модульное построение комплекта РТВ-03 позволяет использовать его для медицинских, технических, таможенных задач. Эта аппаратура совместима с изотопами, портативными и промышленными, импульсными и непрерывными источниками рентгеновского излучения. Время экспонирования (продолжительность облучения) сохраняется для однотипных экспозиций, возможность отказа оборудования сведена к минимуму. Изображение можно проанализировать на месте и сохранить в базе данных для дальнейшего просмотра и учета. В аппаратуре РТВ-03 есть функция автоматического измерения толщины и внутренних поражений трубопроводов и т.п. Система соответствует основным промышленным стандартам для радиационного контроля.

Технические данные РТВ-03

Масса теле-видео-преобразователя.....	5,5 кг
Динамический диапазон качества изображения.....	12 бит (16 градаций серой зоны)
Разрешающая способность	3,5 пары линий/мм
Тип формирователя изображения.....	стандартный ноутбук

Для подачи питания от автомобиля можно использовать преобразователь переменного тока, цифровую фотокамеру для получения внешних оптических изображений, совмещаемых с рентгеновскими образами.

Оборудование оснащено современным цифровым программным обеспечением, библиотекой слайдов, базой данных и окном запроса. В отличие от других видов цифрового радиационного контроля:

- нет промежуточных носителей информации в виде рентгеновских пленок, полупроводниковых пластин и средств считывания с них информации;
- нет металлических экранов, кассет для пленок и пластин, химикатов;
- нет расхода времени на работу с промежуточными носителями информации (расположение на объекте, обработка на считывающем устройстве).

Обеспечена совместимость с международными стандартами НК, например, применяемых для Boeing BSS 7075/7074; ASTM E2422/05 (литье); ASTM E2959/07.

Аппаратура РТВ-03 обеспечивает изображения сразу на экране и, при необходимости, печатается на бумаге, имеется дружественное к пользователю программное обеспечение. Цифровая обработка с накоплением информации обеспечивает наилучшее качество снимков перед их архивированием.

Телевидеосистемы типа РТВ-03 предназначены для экспертов технадзора, таможенных служб и профессионалов, занимающихся мониторингом, сравнительными повторными испытаниями узлов, которые продолжают эксплуатироваться при наличии дефектов.

С цифровой телевидеосистемой РТВ-03 можно:

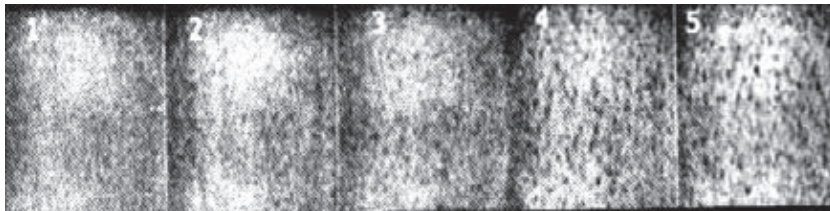
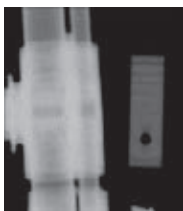


Рис. 3. Паяный узел турбины самолета

Рис. 4. Оценка пористости по пятибалльной шкале



Рис. 5. Сварной шов: пористость, трещины и непровар

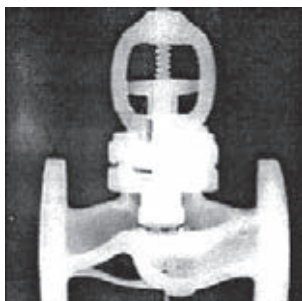


Рис. 6. Клапан вентиля

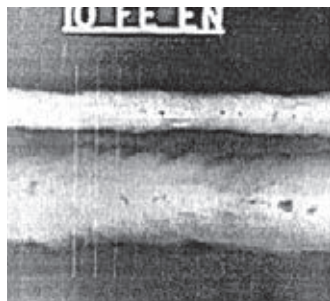


Рис. 7. Стык трубы через две стенки

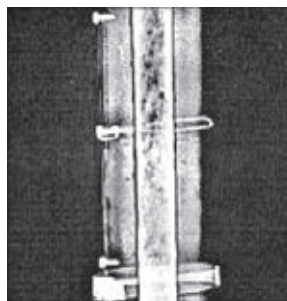


Рис. 8. Коррозия под изоляцией

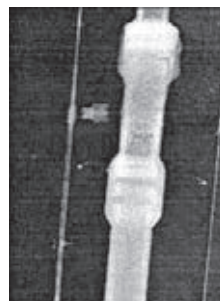


Рис. 9. Изолированная труба

- снизить время и стоимость НК неразъемных и трудно доступных объектов, особенно при взаимном перемещении объекта и аппаратуры;
- исключить повторное экспонирование и получить результат в реальном масштабе времени;
- избежать разборки или демонтажа объекта, удаления его изоляции перед НК;
- все результаты архивируются, протоколируются, подвергаются сравнительному анализу и могут быть воспроизведены через определенное время.

С системой «реального времени» можно получить неограниченное количество снимков непосредственно на объекте с мгновенным результатом – до получения желаемого снимка.

Приведем некоторые примеры (рис. 3–16) использования портативных рентгеновских телевидеосистем, подобных РТВ-03, взятые из литературных источников США, России, Японии, Украины, Китая и др. стран.

Аппаратура типа РТВ-03 фактически объединяет цифровые радиографию и радиоскопию. Со временем появится понятие цифровая телерадиография (печать на бумагу или на пленку), кроме более широкого распространения НК, должна сократить объемы применения радиоактивных источников (Ir-192, Se-75), дать новые технологические решения, которые невозможны при других видах НК. Например, сотрудники института ВИАМ [6] показали перспективность применения подобного контроля для отливок из сплавов силумина. Характерная для этих металлов пористость (рис. 4) оценивается по пятибалльной системе. При оценке балла пористости при необходимости

на экране изображается соответствующая шкала для определенной толщины силумина. Набор такой информации содержится в памяти устройства. Другими методами эта задача практически не решается.

На рис. 5 показан протяженный непровар в корне шва, газовые поры, поперечная трещина, имеющие достаточно большое раскрытие, на рис. 6 – неразборный сантехнический сифон после продолжительной его химической очистки.

Программное обеспечение РТВ-03 сочетает в себе интерфейс со средствами анализа снимков, сделанных различными аналогичными РТВ-03 системами, взятыми из разных литературных источников (см. рис. 3–16).

Запрос по библиотеке слайдов и встроенная база данных позволяют рассматривать снимки и рассылать по другим адресам. Фотографии объектов и видеозаписи хранятся вместе с соответствующими им рентгеновскими снимками. Функция запроса разработана для упрощения поиска по базе данных.

Имеется процедура масштабирования и автоматической калибровки:

- на цифровое увеличение до 500 %, которое показывает исследователю мельчайшие подробности объекта;

- измерение толщины стенки включает аннотацию подробностей о снимке и кривую плотности почернения.

Кроме того, выполняется коррекция яркости и контраста, усиление изменения краев, поляриности усиления, автоматическое осреднение данных, подавления шумов. Данные возможностей аппаратуры РТВ-03 адаптированы с американской системой Vidisco, которая получила большое распространение в мире. Аппаратура комплектуется по желанию заказчика из имеющихся у него элементов (рентгенаппарат, компьютер, кабели, вспомогательные элементы, крепления, штативы и пр.) по индивидуальному проекту, учитывая возможности заказчика.

Пример применения подобных систем приведен в японском журнале «Хиканай Кэнса», № 12, 2012, в статье «Системы контроля трубопроводов ...». Здесь описана самоходная установка, содержащая

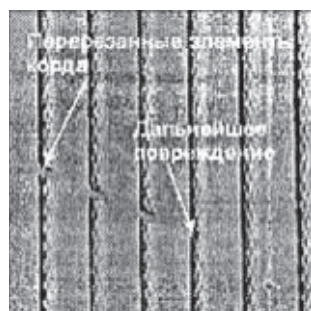


Рис. 10. Перерезанный корд конвейерной ленты

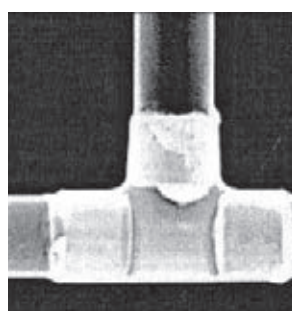


Рис. 11. Пайка медных труб

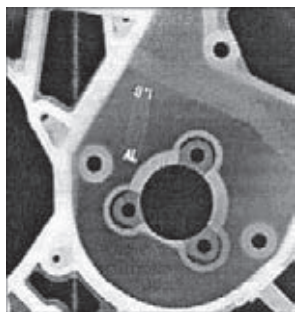


Рис. 12. Отливка

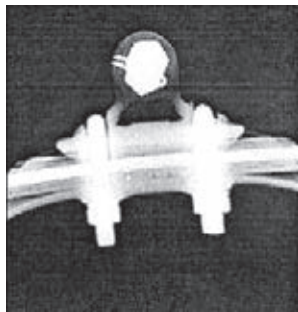


Рис. 13. Хомут электрокабеля



Рис. 14. Лопатка турбины

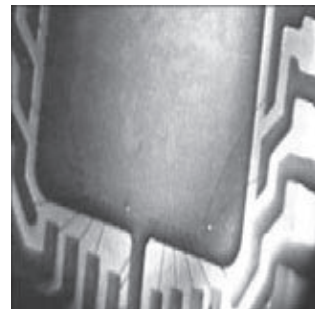


Рис. 15. Фрагмент микросхемы (X100)

источник излучения Ir-192 и перемещаемый синхронно преобразователь. В какой-то мере эта система является близким аналогом РТВ-03: имеет ту же систему цифровой обработки информации. Она не имеет только видеокамеры. Такие устройства в Японии применяют уже более 12 лет для диагностирования трубопроводов без снятия изоляции и для НК труднодоступных металлоконструкций. Анализ 384 аварий в Японии показал, что из изученных 19 причин аварий основными являются глубокие коррозионные поражения – 156 случаев, т.е. прежде всего это достаточно крупные дефекты, которых обычно много и за состоянием которых надо постоянно наблюдать. В этой работе приведены сравнительные результаты измерений остаточной толщины радиоскопической системой и ультразвуком. Отклонения в измерениях есть как в плюсовую, так и в минусовую стороны в пределах 5...20 %.

На рис. 16 показана радиограмма и построенный компьютером график распределения плотности почернения для изолированного кольцевого шва трубы диаметром 152,4 мм толщиной 4 мм. На трубе находится теплоизоляция, обшитая сталью 0,8 мм, которая стянута проволокой. Как видно из графика и рентгеновского снимка, стальная оболочка теплоизоляции положена внахлест (5, 7). График плотности почернения показывает наличие большого количества мелких коррозионных поражений и глубокую язву (1) диаметром 10 мм и глубиной 0,8 мм. На снимке видна проволока (4) и нахлесточное (5) соединение обшивки. Имеется

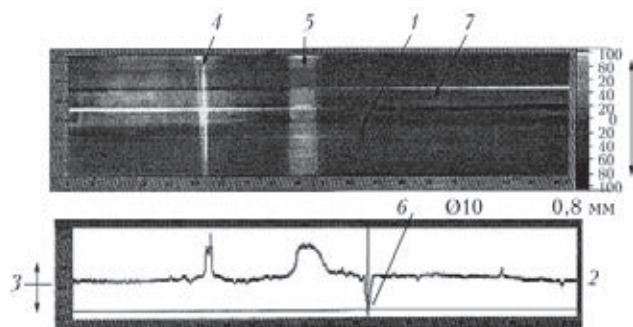


Рис. 16. Рентгенограмма и график распределения плотности почернения трубопровода с теплоизоляцией и обшивкой, выполненные с помощью Thru-VU

износ стенки трубы (3, 2), контроль велся со скоростью 1...5 м/мин.

Выводы

Совместно с другими организациями ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разрабатывает и поставляет портативные рентгенотелевизионные системы типа РТВ-03 по индивидуальным проектам с учетом технических возможностей заказчиков, которые часто имеют практически все необходимое вспомогательное оборудование для цифровой рентгено-видеотехнологии.

Портативное рентгеновидеооборудование должно существенно расширить области применения НК в самых разнообразных отраслях промышленности, инспекционном, медицинском, таможенном надзоре.

Применение аппаратуры типа РТВ-03 позволяет решать технологические задачи, которые ранее были под силу только стационарной рентгеновской многоакурсной томографии. Решаются задачи с подвижными, а также с недоступными объектами.

Наибольшее применение подобных систем ожидается от экспертов технического надзора, которые будут использовать их для обнаружения внутренних дефектов в малодоступных узлах сооружений, где не могут быть использованы традиционные средства НК, а также и при роботизации НК.

Описанная портативная цифровая видеотелерадиография сократит применение традиционной радиографии с промежуточными носителями информации (пластины, пленки и т.п.) и средствами съема с них информации, которая теперь обрабатывается и распространяется в электронном виде.

В реализации данного проекта принимают участие кандидаты техн. наук: С.Р. Михайлов, В. Шалав, М.Н.Карманов, Н.Г.Белый, инженеры: В.Н.Бухенский, Б.А.Онащенко, Б.Ф.Рогалев.

1. Дефектоскопические рентгенотелевизионные системы высокой чувствительности / В.А.Троицкий, С.В.Денбовецкий, Н.Г.Белый и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1997. – № 4. – 5 с.



2. *Повышение чувствительности рентгенотелевизионного контроля.* Материалы конф. НКТД-2000. / В.А.Троцкий, С.В.Денбовецкий, А.В.Лешишин и др. – С. 225–229.
3. *Пат. 19254 Україна.* Спосіб рентгенотелевізійної дефектоскопії / В.О.Троїцький, С.В.Денбовецький, М.Г.Білий, С.Р.Михайлов. – 15.12.2006.
4. *Высокочувствительные рентгенотелевизионные системы на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер с накоплением изображений* / В.А.Троцкий, В.Н.Бухенский, Н.Г.Белый и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2009. – № 3. – С. 41–46.
5. *Троїцький В. А.* Посібник по радіографії сварних з'єднань. – Київ: Фенікс, 2008. – 312 с.
6. *Степанов А. В., Косарина Е. И., Усачев В. Е.* Рентгено-скопический контроль отливок из сплавов силумина // Контроль. Диагностика. №5. – 2012. – С. 19–23.
7. *Неразрушающий контроль в Украине.* Справочник / Под ред. В.А.Троїцкого, Ю.Н.Посыпайко. – Київ: ІЭС ім.Е.О.Патона НАНУ, 2012. – 144 с.

A portable X-ray TV system RTV-03 is presented, which consists of a sharply-focused X-ray unit, compact electron-optical converter, and notebook with digital processing of X-ray and optical images of the object. New technological capabilities of non-destructive testing are demonstrated, which are based on application of this instrumentation. 7 References, 16 Figures.

Key words: X-ray TV system RTV-03, digital processing of images, NDT

Поступила в редакцию
27.06.2013

ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ !



20 июля 2013 гг. исполнилось 75 лет со дня рождения **Эдуарда Самойловича Крылова** - кандидата технических наук, ведущего научного сотрудника Государственного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и проектного института «УкрНИИпроект».

После окончания в 1960 г. Киевского политехнического института Э.С.Крылов работал на заводе «Большевик», а с 1965 г. и по настоящее время – в Институте угольной промышленности «УкрНИИпроект».

В 1972 г. он защитил кандидатскую диссертацию, а в 1974 г. получил ученое звание старшего научного сотрудника.

В сфере научных интересов Эдуарда Самойловича главенствующее место занимают методы НК. Именно благодаря высокому профессионализму, энергии и результативной работе Эдуарда Самойловича это возглавляемое им направление становится в институте и отрасли неотъемлемой частью программ и методик диагностики технического состояния горных машин и оборудования. Под его руководством и при непосредственном личном участии разработан и внедрен ряд нормативных документов и технических средств контроля и диагностики несущих металлоконструкций оборудования акустико-эмиссионным методом, создан ряд модификаций диагностической аппаратуры – УКОД, УАЭКМ, АКТ, КАРАТ и др. Эти разработки заслужили признание учёных и специалистов-эксплуатационщиков, отмечены медалями ВДНХ СССР, грамотами и

дипломами за лучшие научные и технологические разработки в области НКТД.

Под руководством и при непосредственном участии Крылова Э. С. на ряде горнорудных предприятий созданы службы НК и внедрены методики обследования оборудования.

Эдуард Самойлович стоял у истоков создания Украинского общества НКТД и принимает активное участие в его работе, являясь бессменным представителем Института «УкрНИИпроект» в Обществе, регулярно выступает с докладами на национальных конференциях. В составе делегации УО НКТД Э.С.Крылов принимал участие в Всемирных конференциях по НК в Италии, Испании, Израиле, демонстрировал свои разработки на Международной выставке угледобывающих и перерабатывающих технологий и оборудования «Уголь/Майнинг».

Э.С. Крылов является автором более 140 научных трудов и четырех изобретений.

Эдуард Самойлович применяет неразрушающие методы для контроля на объектов из железобетона и кирпичных конструкций, которые согласно действующей нормативной базы требуют обследования и паспортизации их технического состояния.

Плодотворная научная, инженерная и производственная деятельность Эдуарда Самойловича более 40 лет в угольной промышленности отмечена ведомственными наградами, он является кавалером «Шахтерской славы» всех трех степеней.

Уважаемый Эдуард Самойлович, желаем Вам реализации всех Ваших творческих планов, семейного счастья, крепкого здоровья и благополучия!

Правление Украинского общества НКТД

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНО-ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ

В. Ю. ГЛУХОВСКИЙ, О. С. БОРОДАЙ,

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проблема дистанционной диагностики состояния потенциально опасных и недоступных объектов, определение координатных и геометрических параметров дефектов является наиболее актуальной. Для этих целей был разработан лазерно-термографический прибор и соответствующее программное обеспечение, что позволяет вывести тепловизионный контроль на новый уровень, а именно перейти с количественной оценки дефектов к качественной. Разработанный лазерно-термографический комплекс позволяет проводить диагностику состояния удаленных объектов, определять координаты и геометрические параметры выявленных дефектов, таких как площадь. В данной работе представлены краткое описание лазерно-термографического прибора, экспериментальной установки на его базе, а также термограммы и полученные предварительные результаты расчета площади дефекта в зависимости от дистанции контроля. Библиогр. 4, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: тепловизионный контроль, термография, лазерно-термографическая дефектометрия, лазерно-термографический прибор

Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины проводятся работы по разработке и внедрению лазерно-термографических измерительных систем для определения дистанционных, координатных и геометрических параметров дефектов потенциально опасных объектов. С этой целью разработан экспериментальный измерительный лазерно-термографический прибор и соответствующее программное обеспечение, что в совокупности позволяет решать проблему определения дистанционных, координатных и геометрических параметров дефектов с высокой точностью [1].

Конструкция разработанного лазерно-термографического прибора представлена на рис. 1 и состоит из тепловизионной камеры 1; лазерного дальномера 2; платформы 3, на которую монтируется тепловизор и дальномер; устройства пространственной ориентации 4, с помощью которого происходит наведение лазерно-термографического блока на объект контроля (ОК); штатива 5, на который устанавливаются указанные устройства [2].

В данном приборе используется тепловизор марки Testo 876 производства фирмы «TESTO» (Германия) и лазерный дальномер Disto-D3a производства фирмы «Leica» (Австрия).

Для проведения исследований в области лазерно-тепловизионной дефектометрии с применением данного прибора спроектировали экспериментальную установку, схематическое изображение которой представлено на рис. 2. Установка состоит из инфракрасного нагревательного прибора 1 мощностью 1 кВт; пластины с искусственными дефектами сложной геометрической формы 2;

устройства для неподвижной фиксации пластины с дефектами 3; источника холодного воздуха 4; лазерно-термографического прибора 5; персонального компьютера 6.

Эксперимент проходил следующим образом. Пластины нагревали инфракрасным нагревателем со стороны открытых дефектов. С помощью источника холодного воздуха происходило охлаждение бездефектной поверхности пластины для создания условий контроля, приближенных к реальным. Съемка с помощью лазерно-термографического прибора осуществлялась на дистанциях 1, 2, 3, 5 м. Таким образом обеспечивалась возможность сравнить площадь дефекта, которая отображалась на термограммах, на разных дистанциях контроля.



Рис. 1. Общий вид лазерно-термографического прибора (обозначения см. в тексте)



Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной установки для проведения лазерно-тепловизионной дефектometрии (обозначения см. в тексте)

Процесс термографирования проходил при динамичном нагревании пластины от комнатной температуры до $T_{\max}$, а именно в условиях нестационарного температурного поля. Опираясь на предварительные экспериментальные данные, термографирование нестационарного температурного поля является наиболее оптимальным. При этом обеспечивается максимальная контрастность термограмм и соответственно, максимальное проявление дефектных участков на температурном фоне объекта контроля [3].

Информация с лазерного дальномера и тепловизионной камеры заносилась в персональный компьютер для дальнейшей обработки в соответствующих программах. С помощью графического редактора термограмм осуществлялось преобразование радиометрической информации непосредственно в термографические снимки и радиометрические таблицы. Радиометрические таблицы вместе с информацией о дистанции контроля вносили в программы подсчета площади дефектных участков [4].

С помощью данной установки были получены термограммы пластины с искусственными дефектами сложной геометрической формы на различ-

ных дистанциях термографирования (рис. 3).

Для каждой из приведенных на рис. 3 термограмм была рассчитана площадь дефектов, которые проступили в виде ярко желтого рисунка, геометрическая форма которых была предварительно рассчитана. Данные о рассчитанных площадях дефектов приведены в таблице.

Из таблицы видно, что при увеличении расстояния термографирования значение погрешности расчета площади дефекта увеличивается. При этом значение погрешности зависит от точности значения температуры дефектного участка, которое заносится в соответствующую расчетную программу.

Для определения дистанционных, координатных и геометрических параметров дефекта было разработано соответствующее программное обеспечение. На рис. 4 представлен общий вид программного интерфейса с построенными 2D и 3D координатными сетками дефекта, а также рассчитанными плоскостными параметрами дефекта.

С помощью разработанной программы можно рассчитывать и соответственно строить плоскостные величины дефекта, а также в ней заложен потенциальный механизм расчета и построения объемных величин, таких как глубина залегания

Площадь заложенного дефекта и значения погрешности расчета для различных дистанций визирования

Дистанция визирования, м	Площадь, см ²	Погрешность, %
1 (эталон)	154	—
1	150	2,6
2	129	16,23
3	126	18,18
5	130	15,58

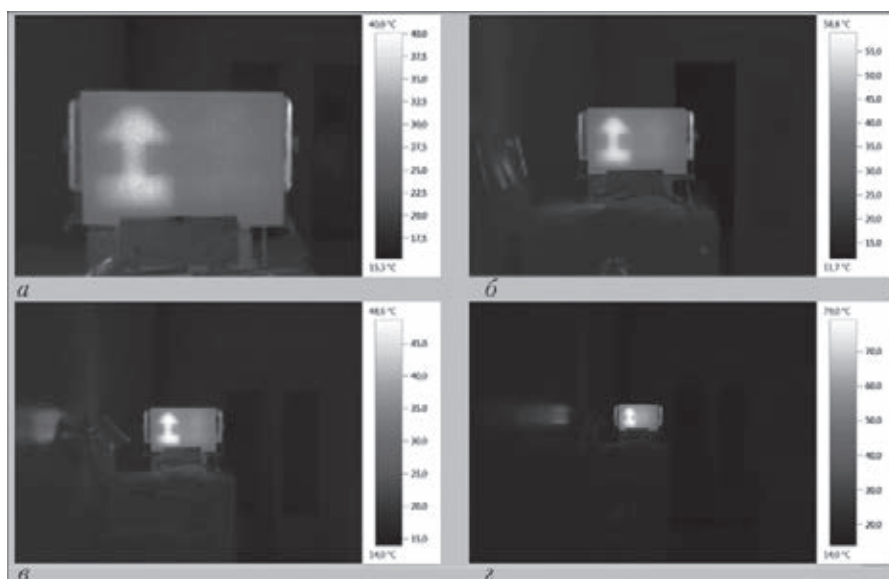


Рис. 3. Термограммы пластины с искусственными дефектами сложной геометрической формы на разных дистанциях термографирования: а - на расстоянии 1; б - 2; в - 3; г - 5 м

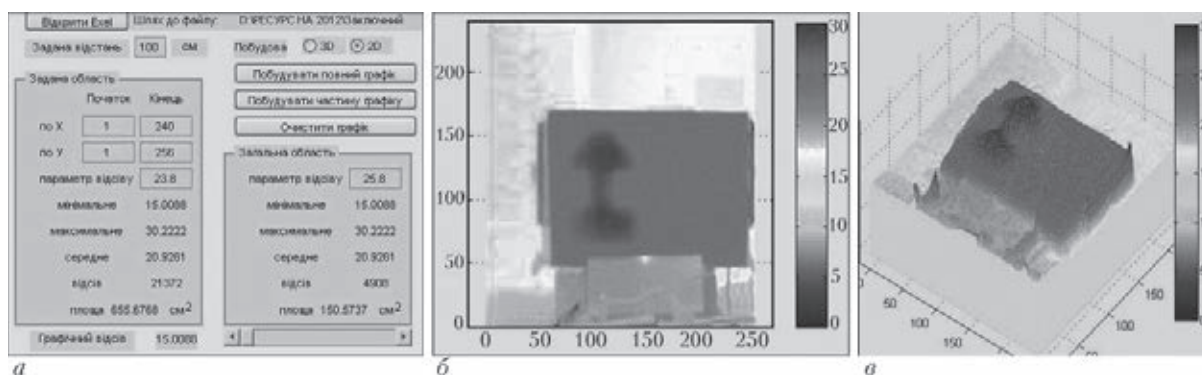


Рис. 4. Общий вид программного интерфейса (а) с рассчитанной площадью дефекта и построенными 2D (б) и 3D (в) координатными сетками

дефекта и объем дефектной полости. При построении 3D сетки (рис. 4, в) параметры третьей координаты были заданы условно. На данном этапе разработки программного продукта невозможно точно определить объемные параметры дефекта. Для расчета и построения объемных параметров необходимо провести ряд научно-исследовательских работ для определения и уточнения окончательной математической модели и соответствующих программных блоков.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования термографирования температурных полей поверхности с заложенными искусственными дефектами контрольных образцов с использованием активного теплового контроля показал, что разработанная конструкция лазерно-термографического прибора позволяет получать необходимые

входные данные для расчета геометрических параметров дефектов.

Полученные результаты расчета площади дефекта в зависимости от дистанции контроля позволяют сделать вывод, что разработанное лазерно-термографическое устройство может быть использовано для получения данных для последующей оценки размеров и координат дефектов потенциально опасных и недоступных объектов.

1. Стороженко В. О., Мельник С. И., Орел Р. П. Новый алгоритм тепловой томографии // Методи та прилади контролю якості. – 1999. – № 4. – С. 26–30.
2. Стороженко В. А., Мельник С. И. Метод передаточных функций в тепловой дефектометрии // Дефектоскопия. – 1991. – № 12. – С. 78–83.
3. Будадин О. Н., Рапопорт Д. А. Метод тепловой дефектометрии // Там же. – 1984. – № 10. – С. 37–42.
4. Вавилов В. П., Финкельштейн С.В. Два подхода к решению одномерной обратной задачи активного теплового контроля // Там же. – 1989. – № 4. – С. 59–62.

Remote diagnostics of the condition of potentially hazardous and inaccessible objects, determination of coordinate and geometrical parameters of defects is an urgent task. In order to solve it, a laser-thermographic instrument and respective software were developed that allow taking heat monitoring to a new level, namely moving over from quantitative to qualitative assessment of defects. Developed laser-thermographic complex allows performance of diagnostics of the condition of remote objects, and determination of the coordinate and geometrical parameters of the detected defects. This paper gives a brief description of laser-thermographic instrument, experimental set-up based on it, as well as thermograms and obtained preliminary results of defect area calculation, depending on monitoring distance. 4 References, 1 Table, 4 Figures.

Keywords: heat monitoring, thermography, laser-thermographic flaw detection, laser-thermographic instrument

Поступила в редакцию
20.05.2013



ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПОСЛЕ АВАРИЙ И ОБРУШЕНИЙ. ОПЫТ НПО «ДИСКРЕТ» ПО ИХ ЛИКВИДАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЮ МЕТОДОМ ПРОМЫШЛЕННОГО АЛЬПИНИЗМА

Ю.Н.БЛИНОВ, Л.А.ХРИПУН,

ООО НПО «Дискрет». 25006, г. Кировоград, ул. Дзержинского, 79/47. E-mail: nnpodiscret@email.com

Рассмотрены особенности обследования аварийных дымовых труб, а также случаи их обрушения, на основе инженерного анализа, поверочных расчетов и тщательного изучения материалов обследований на примерах применения методов неразрушающего контроля и промышленного альпинизма. Показано, что значительная часть дымовых труб в Украине эксплуатируется при наличии дефектов и повреждений, большинство из которых достигает критических значений и требуют капитального ремонта, частичного усиления, замены несущих конструкций и даже полного демонтажа. Проанализировано, что аварийное обрушение кирпичных дымовых труб является результатом длительного воздействия в сочетании таких факторов, как: неполный режим работы котлов, способствующий образованию конденсата внутри трубы; сверхнормативные крены и изгибы стволов; образование наледей, и, как результат, локальные разрушения и выветривание швов кладки; несоответствие характеристик прочности конструкционных материалов труб нормативным и проектным требованиям; грубое нарушение технологии производства ранее выполненных работ. Несвоевременное выявление аварийно-опасных участков с дефектами кладки приводит к авариям и аварийным обрушениям с тяжелыми последствиями. Установлено, что сочетание методов промышленного альпинизма и тепловизионного метода контроля дымовых труб позволяет проводить более качественную и оперативную инспекцию без прекращения или при кратковременных остановках их работы. Библиогр. 7, рис. 7.

Ключевые слова: аварийные дымовые трубы, обрушение, повреждение, промышленный альпинизм

Обследование дымовых труб. Дымовые трубы, построенные в 1960–1970 гг., в настоящее время практически полностью исчерпали свои ресурсы, что зачастую приводит к их обрушению (рис. 1, а) [1]. НПО «Дискрет» при обследовании труб выполняет инженерный анализ методом конечных элементов и расчеты по прочности дымовых труб с учетом фактически выявленных дефектов и деформаций, используя новейшие программные комплексы. В результате поверочных статических расчетов нами определяются напряжения и деформации труб, результаты которых

учитываются при проектировании ремонтно-восстановительных работ (рис. 1, б).

Основными причинами обрушения стволов кирпичных дымовых труб являются (рис. 2–6):

– неполный режим работы котлов, который способствует образованию конденсата внутри трубы, из-за того кирпич трубы эксплуатируется в режиме «намокание–замерзание–оттаивание» циклично, что и приводит к его разрушению вследствие морозной деструкции;

– наличие сверхнормативных кренов верха труб и изгибов стволов относительно вертикали;

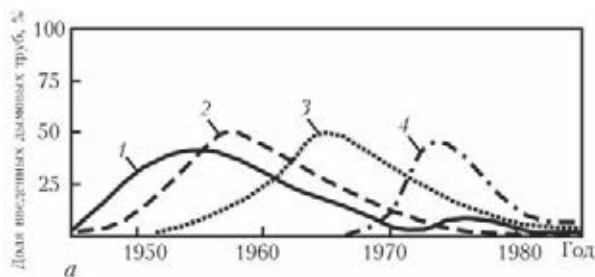


Рис. 1. График эксплуатации труб – а: 1 – кирпичных, 2 – железобетонных с футеровкой из глиняного кирпича, 3 – железобетонных с футеровкой из кислотоупорного кирпича, 4 – с противодавлением; б – результаты поверочного расчета по прочности кирпичной дымовой трубы высотой 30 м (изограммы напряжений и деформаций) методом конечных перемещений

© Ю. Н. Блинов, Л. А. Хрипун, 2013

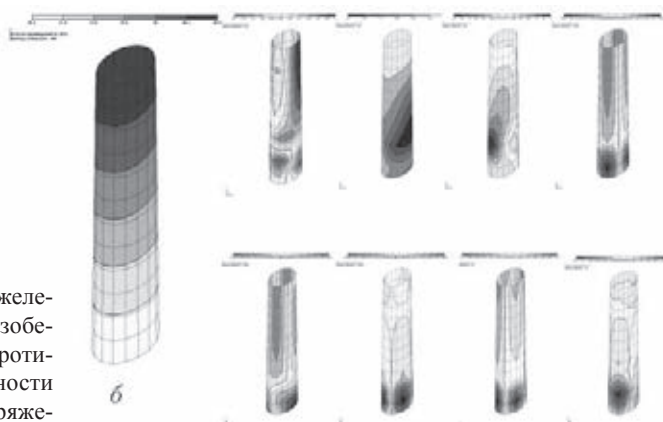




Рис. 2. Аварийное обрушение верхней части кирпичной дымовой трубы высотой 80 м, техническое обследование уцелевших конструкций на отметке +49 м и организация безопасной работы при ликвидации последствий обрушения с помощью стрелового автомобильного крана грузоподъемностью 120 т методом промышленного альпинизма (а); фрагмент дефектного аварийно-опасного участка кирпичной кладки объемом около 15 м³ на отметке +49 м (б); обследование аварийных участков экспертами-верхолазами (в, г)



Рис. 3. Основные факторы, действовавшие на ствол кирпичной трубы до обрушения и ставшие причинами обрушения: отклонение оси ствола от вертикали (крен) на отметке +45 м (1) составляет 220 мм (для труб высотой до 100 м допускается 0,002 высоты, но не более 150 мм*), изгиб ствола относительно вертикали (2) (а); образование наледей (3) на кирпичной кладке в верхней части ствола вследствие эксплуатации при неполном режиме работы котлов (б); во время обследования – стрелкой обозначены места увлажнения и массового разрушения (выпадения) кирпича из кладки (в, г)

– грубые нарушения технологии производства работ (отсутствие перевязки швов при кладке ствола и др.);

– несоответствие характеристик прочности конструкционных материалов отдельных мест конструкций нормативным и проектным требованиям.

Дефекты стволов труб и их футеровок часто бы-

*Для труб высотой более 100 м допускается 0,0015 высоты, но не более 200 мм.

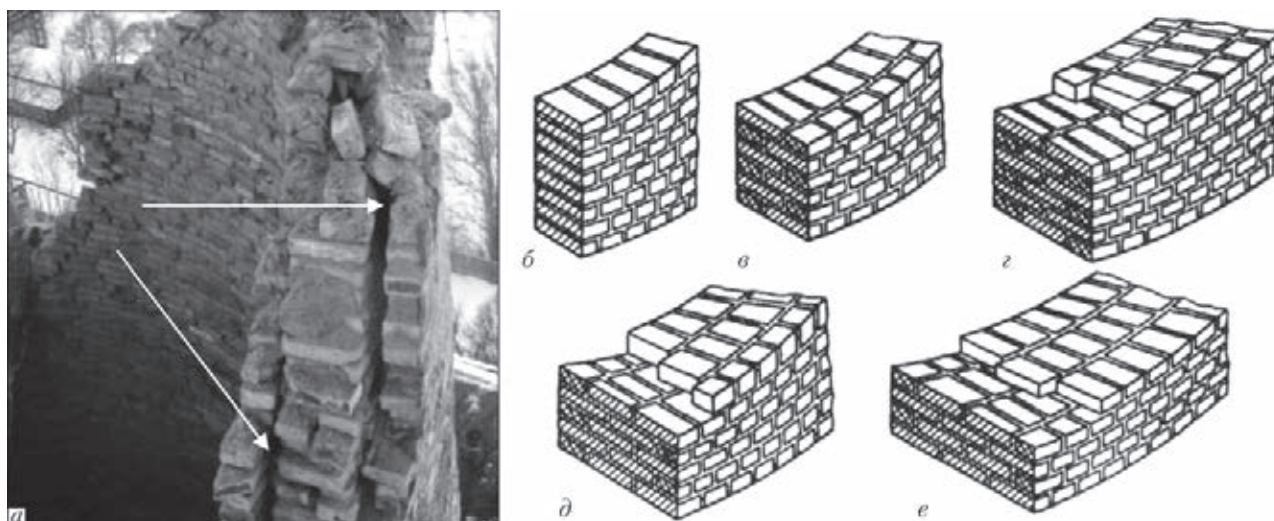


Рис. 4. Дефекты кладки на отметке +45 м – результат грубого нарушения технологии производства работ (отсутствие перевязки рабочих швов кладки в наружных слоях и, как следствие, попадание конденсата и атмосферных осадков в образовавшиеся зазоры с последующим разрушением от морозной деструкции (а); нормативные способы перевязки швов при кладке участков ствола кирпичной дымовой трубы: б – толщиной в один кирпич; в – полтора кирпича; г – два кирпича; д – два с половиной кирпича; е – три кирпича (вертикальные кольцевые швы должны быть перевязаны на 1/2 кирпича, радиальные – на 1/4 к. [2])

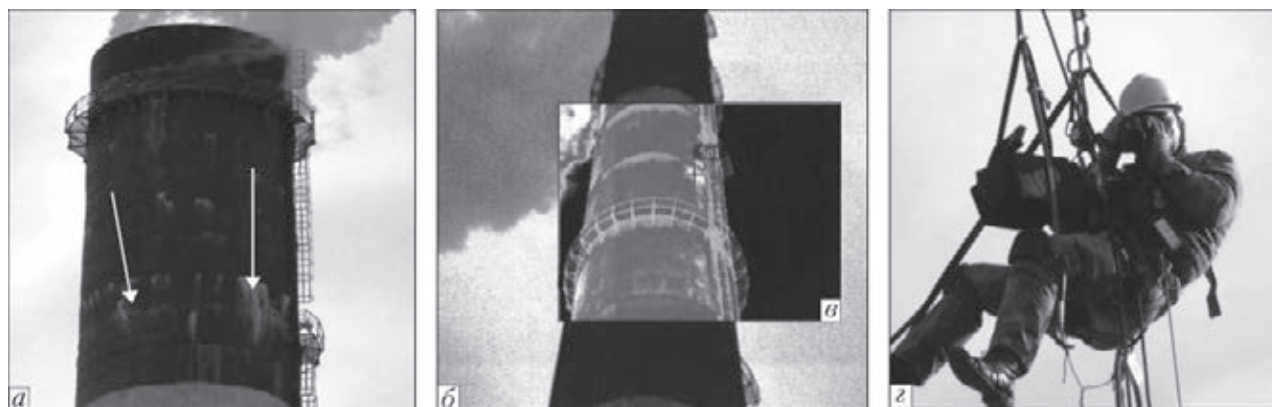


Рис. 5. Дефекты и повреждения наружной поверхности железобетонной дымовой трубы высотой 180 м: образование наледей (обозначены стрелками) вокруг некачественно выполненных рабочих швов бетонирования с отметкой +145 м до отметки +180 м (а); определение мест протечек и образования конденсата с помощью тепловизионного метода контроля (б); термограмма (в) – на ИК-изображении зафиксированы участки повышенных теплотерь через ограждающие конструкции. Зоны дефектных (с пустотами и полостями) участков рабочих швов трубы соответствуют по высоте трещинам во внутренней футеровке (рис. 6), что приводит к конденсации влаги и последующей морозной деструкции бетона; применение метода промышленного альпинизма при обследовании ствола трубы (г)

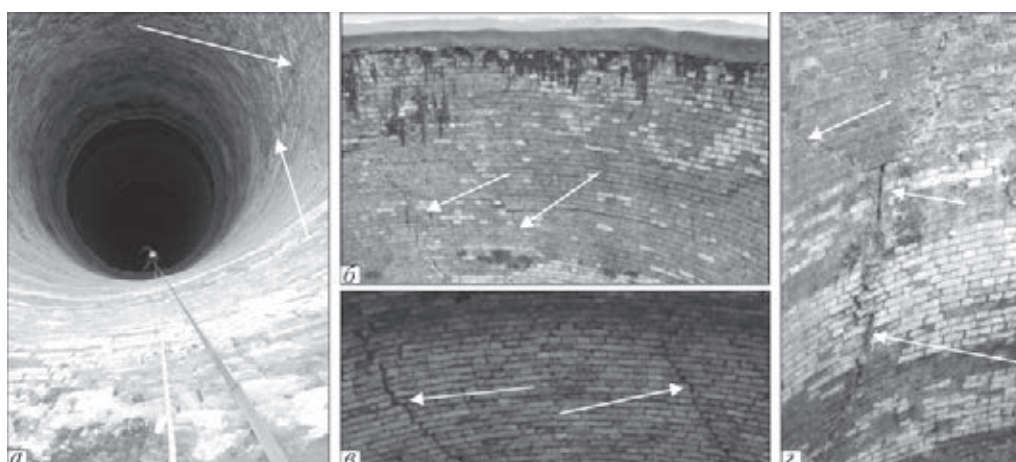


Рис. 6. Дефекты и повреждения внутренней кирпичной футеровки железобетонной дымовой трубы высотой 180000 м: техническое обследование экспертами-верхолазами внутренней части дымовой трубы (а); сквозные наклонные трещины в футеровке на отметке +173 500 м (обозначены стрелками) (б); сквозные трещины в футеровке на отметке +160 500 м (в); фрагмент разрушения футеровки (г)



Рис. 6. Дефекты и повреждения (обрушения) плиточной облицовки фасада здания высотой 50 м (а); применение метода промышленного альпинизма при обследовании облицовки фасада (б)

вают скрытыми и очень сложными для обнаружения. Применение тепловизионного метода контроля на первом этапе обследования в сочетании с промышленным альпинизмом показало их совместную эффективность при контроле труб.

Обследование облицовки фасадов зданий. Отслоение облицовки (например, плиточной) от стен (рис. 7) приводит к образованию воздушной прослойки между стеной и облицовкой. Это приводит к изменению теплопроводности на данном участке, что может быть определено при помощи тепловизора методом термографии. Сочетание термографии с традиционными методами (простукиванием, ударно-импульсной дефектоскопией и др.) позволяет повысить информативность и достоверность данных о состоянии облицовки, ограничивая влияние человеческого фактора.

Features of examination of flues in critical condition, as well as cases of their collapse, based on engineering analysis, confirmatory calculations and thorough study of examination materials in the cases of application of NDT and industrial alpinism methods. It is shown that emergency collapse of brick flues is the result of long-term impact at combination of such factors as non-full mode of boiler operation, promoting condensate formation inside the pipe; supernormative lists and bends of the barrel; icing; and, as a result, local fracture and erosion of brick joints; lack of compliance of strength properties of pipe material to normative and project requirements, gross violation of the technology of performance of earlier operations. Untimely detection of unsafe sections with brickwork defects leads to accidents and emergency collapses with grave consequences. It is established that the combination of industrial alpinism and thermal vision methods of flue testing allows performance of a more sound and fast inspection without stopping or with short-time stopping of their operation. 7 References, 7 Figures.

Key words: unsafe flues, collapse, damage, industrial alpinism

Выводы

Сочетание методов промышленного альпинизма и тепловизионного метода позволяет проводить более качественную и оперативную инспекцию дымовых труб без прекращения или при кратковременных остановках их работы.

Использование термографии вместе с другими методами исследования — простукивания, ударно-импульсной дефектоскопии при обследовании облицовки фасадов зданий и последующая обработка результатов в графической среде с отображением на карте дефектов позволяют повысить информативность и достоверность полученных данных.

Предаварийное состояние множества участков облицовки фасадов зданий в жилой зоне городов является угрозой для находящихся в зоне обрушения. Своевременное и достоверное выявление указанных конструкций является актуальным в Украине.

1. СО 34.21.671. Рекомендации по повышению надежности дымовых труб ТЭС.
2. СТО НОСТРОЙ 23-2011. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы. — М.: 2011.
3. Блинов Ю.Н., Хрипун Л.А.. Особенности технического обследования конструкций высотных зданий и сооружений после длительной эксплуатации в условиях агрессивной среды и опыт НПО «Дискрет» по их восстановлению методом промышленного альпинизма// 20-я Межд. конф. «Современные методы и средства НК и ТД». 1–5 окт. 2012 г., Гурзуф.
4. Трубі – труба // Кировоградська правда. – 2013. – 22 янв. (№ 5).
5. Щоб труби не падали // 21 канал. – 2012. – 06 дек. (№ 49).
6. Труба котельні мала колись упасти // Там же. – 2013. – 24 янв. (№ 4).
7. Зламано димову трубу неправильно будували // Там же. – 2013. – 07 дек. (№ 6).

Поступила в редакцию
22.03.2013



В ПРАВЛЕНИИ УКРАИНСКОГО ОБЩЕСТВА НКТД

14 июня 2013 г. состоялось открытое заседание бюро правления УО НКТД, на котором были рассмотрены вопросы создания виртуального музея неразрушающего контроля и организации учебного семинара по вопросам системы сертификации и освоения новой техники.

В.А. Троицкий и М.Л. Казакевич предложили создать под эгидой Европейской федерации неразрушающего контроля *Центр науки и техники в области НК* путем организации интерактивного виртуального музея неразрушающего контроля.

Концепция проекта заключается в следующем:

- обеспечение широкого доступа к информации в целях привлечения внимания общественности к вопросам снижения риска техногенных катастроф при работе с объектами высокой степени риска
- создание условий для научных исследований и обучения посредством виртуальной музейной коллекции
- популяризация идей НК с целью привлечения внимания общественности к вопросам снижения технологических рисков и защиты экологической ситуации в процессе эксплуатации объектов повышенного риска
- систематизация результатов исследований ведущих экспертов и организаций в виртуальном фонде музея
- использование музея как базы для неразрушающего контроля (в том числе собрание образцов-эталонов, приборов и технологий) для сети аккредитационных и сертификационных организаций в процессе обучения и контроля уровня знаний
- координация работ по созданию энциклопедии неразрушающего контроля, в том числе информационной базы по ключевым вопросам теории и практики неразрушающего контроля, новым технологиям, методам и средствам неразрушающе-

го контроля, демонстрации примеров бедствий и катастроф, которые произошли из-за нарушения правил или неиспользования неразрушающего контроля ■ использование музея как постоянного места деятельности, координации и коммуникации профессионалов в научных исследованиях; виртуальный музей должен быть Форумом для специалистов, где будут оперативно рассматриваться вопросы решения конкретных практических задач.

Принято решение поддержать идею создания виртуального музея неразрушающего контроля и поручить М.Л.Казакевичу ознакомить с проектом Совет директоров EFNDT на ближайшем заседании.

С июля 2012 г. начал действовать новый международный стандарт по сертификации персонала, работающего в области *НК EN ISO 9712 «Неразрушающий контроль – Квалификация и сертификация персонала. Основные требования»*, а также национальный стандарт *ДСТУ EN 473* в новой редакции. Какие изменения в системе сертификации персонала в связи с этим?

Следуя традиции организации ежегодных семинаров для практикующих дефектоскопистов, было решено провести семинар с рабочим названием «Изменения в системе сертификации вызванные введением нового стандарта EN ISO 9712».

Практическое использование новых технологий и оборудования неразрушающего контроля» 16–17 сентября 2013 г. и поручено М.Л. Казакевичу провести переговоры и пригласить принять участие в семинаре председателя Технического комитета TC-135 «Non-Destructive Testing» Международной организации по стандартизации ISO Hajime Hatano (Япония).

НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ПО ЕВРОПЕЙСКОМУ ПРОЕКТУ «INNOPIRES» В ВАРШАВЕ

С 21–29 мая 2013 г. в Варшаве в Военной технической академии (WAT) состоялся научный семинар по Европейскому проекту «Инновационные технологии неразрушающего контроля трубопроводов с объемными поверхностными дефектами и их ремонта композитными материалами – INNOPIRES», выполняемому в рамках 7-й Рамочной программы ЕС, а также рабочее совещание участников проекта.

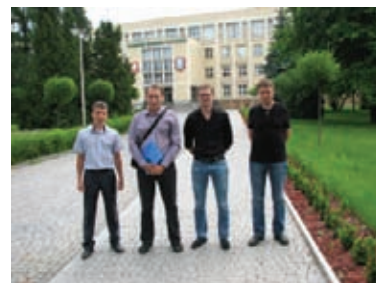
В семинаре приняли участие специалисты учебных университетов и научных организаций: Военной технической академии (Польша), Рижского технического университета (Латвия), Университета нефти и газа (Румыния), Института механики Болгарской академии наук, Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, НТУ «Харьковский политехнический институт», Южного федерального университета



Семинар открывает декан факультета механики Военной технической академии, проф. З. Богданович



Участники семинара из Польши, Болгарии, Румынии, Латвии, Украины, России и Беларуси



Специалисты ИЭС им.Е.О. Патона: С.Прокопчук, А.Шекеро, Г.Беляев, С.Швыдкий



Лекция в лаборатории механики



Участники на фоне главного корпуса Военной технической академии



Во время одного из заседаний семинара

(Ростов-на-Дону, Россия), Института металлополимеров НАН Беларуси (Гомель).

Со словами приветствия и пожеланиями плодотворной дискуссии по рассматриваемым вопросам семинар открыли декан факультета механики Военной технической академии проф. **З. Богданович**, руководитель отдела механики и прикладных наук, проф. **Т. Низгода**, а также руководитель проекта «INNOPIPES» со стороны Военной технической академии проф. **Е. Малаховски**.

Далее состоялась презентация организаций, участвующих в выполнении данного научного проекта. Были представлены главные направления выполняемых ими исследований, экспериментальная база, основные достижения и др. информация, касающаяся возможностей выполнения задач, стоящих в проекте.

Для молодых исследователей было прочитано 10 лекций ведущими учеными стран-участниц проекта.

Состоялась ознакомительная экскурсия в подразделение Военной технической академии, а именно, на кафедры новых материалов и технологий, механики и информатики, машиностроения. Большое впечатление на участников семинара произвела материально-техническая база для проведения фундаментальных исследований по созданию новых материалов, оснащенная современным оборудованием для определения физических

и химических свойств, твердости, износостойкости, ударной вязкости и др.

Научные сотрудники, аспиранты, студенты Академии имеют возможность проводить здесь исследования по разработке и развитию альтернативных технологий производства и механической обработки полуфабрикатов и готовых металлических изделий, пластмасс, композитов, порошковых материалов, металлокерамики, в том числе предназначенных для работы при повышенных температурах, в коррозионной среде, с сильным абразивным износом, повышенной эрозией с целью замены традиционных дорогие и трудоемких «классических» технологий.

Семинар завершился заседаниями «круглых столов», где молодые специалисты и аспиранты участвующих в проекте организаций рассказали о проводимых ими исследованиях и возможному использованию ожидаемых результатов для целей проекта.

О развитии неразрушающего контроля в Польше Вы можете узнать уже этой осенью, посетив традиционную Национальную конференцию по неразрушающему контролю, которая состоится 15–17 октября 2013 г. в курортном городе Колобжеге, расположенном на побережье Балтийского моря.

Информация о конференции на сайте <http://www.badania-ndt.eu/> в Интернете.

А.Л.Шекеро,
Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины



ПОДВИЖНЫЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Намагничивающее устройство ТВА-4 на боковине железнодорожной тележки



Намагничивающее устройство ТВА-4И на поверхности трубы



Намагничивающее устройство ТВА-4У на ободе железнодорожного колеса

Подвижные намагничивающие устройства позволяют:

осуществлять контроль качества протяженных конструкций

расширяют возможности магнитопорошкового контроля и выявления несплошностей различной ориентации

позволяют уменьшить количество ложных показаний

Представленные на фотографиях мощные устройства **ТВА-4** позволяют оценить глубоко залегающие внутренние дефекты металлоконструкций

Перемещение **ТВА-4** по поверхности в разных направлениях уменьшает вероятность пропусков и неконтролируемых зон

Наши специалисты **бесплатно предоставляют** весь комплекс услуг по магнитопорошковому контролю металлоконструкций с выдачей информации о месторасположении и размерах дефектов

По лизингу разрабатывают технологию контроля и внедряют необходимое оборудование

проводят обучение и аттестацию персонала

обеспечивают необходимой нормативной документацией и литературой

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
при ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины
e-mail: office@paton.kiev.ua





VII НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

22–24 мая 2013 г. в пгт Ворзель (Киевская обл.) на базе кардиологического санатория «Ворзель» состоялась VII Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии», посвященная 95-летию Национальной академии наук Украины. Организатором конференции выступил Совет научной молодежи ИЭС. им. Е.О. Патона НАНУ при активной поддержке дирекции. Эта традиционная конференция проводится раз в два года с 2001 г. и является одной из наиболее крупных молодежных конференций в странах СНГ по данной тематике.

Для участия в конференции было заявлено 234 доклада молодых ученых и специалистов, которые представляли научно-исследовательские институты, учебные заведения, организации и предприятия Украины, России, Польши, Сербии, Канады. Кроме того, представили свои доклады аспиранты и студенты, выбравшие сварку и родственные технологии как непосредственное направление своей будущей трудовой деятельности. При поддержке дирекции института был издан сборник тезисов и программа работы конференции.

С приветственным словом на открытии конференции от лица дирекции института выступил заместитель директора ИЭС академик НАН Украины *И.В. Кривцун*, который подчеркнул необходимость проведения подобного рода мероприятий с целью обмена опытом и налаживания научных и дружественных отношений между сотрудниками различных учреждений, представленных на конференции.

Основная цель таких конференций — популяризация технологий, получение новых знаний, с помощью которых можно создавать надежную и конкурентоспособную продукцию, пропаганда необходимости получения новых, способствующих повышению качества, надежности и долговечности выпускаемых и эксплуатируемых технических изделий и конструкций.

Работа конференции велась по 9-ти направлениям:

- прогрессивные технологии сварки и соединения материалов;
- прочность, надежность и долговечность сварных конструкций;
- технологии наплавления, нанесения покрытий и обработки поверхности;
- процессы специальной электрометаллургии;
- новые конструкционные и функциональные материалы;
- техническая диагностика и неразрушающий контроль;
- автоматизация процессов сварки и родственных технологий;
- математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах.

24-го мая состоялось торжественное закрытие конференции, на котором традиционно были отмечены лучшие доклады и вручены премии. Конференция способствовала развитию тематических дискуссий, установлению деловых контактов.

И. Клочков



ПОДПИСКА — 2014

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
160 грн.	320 грн.	900 руб.	1800 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
на сайтах: www.patonpublishinghouse.com, www.rucont.ru.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате *.pdf.

Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2013 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)
- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот А3 (400×290 мм)
- 0,5 А4 (185×130 мм)
- 0,25 А4 (90×130 мм)

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм 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

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:

Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua

Подписано к печати 06.09.2013. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 6 цв. вклейки.

Печать ООО «Фирма «Эссе».

03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.