

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

## № 2, 2001

Основан в январе 1989 г.

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

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Неразрушающие методы и средства контроля

##### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ВЕНГРИНОВИЧ В. Л., КУНЦЕВИЧ А. П., ТИЛЛАК Г.-Р. Диагностика состояния внутренней поверхности трубы в рентгеновской томографии: двухмерная байесова реконструкция	3
ЗОЛОТАРЕВ С. А., ВЕНГРИНОВИЧ В. Л., ТИЛЛАК Г.-Р. 3-хмерная реконструкция внутренней поверхности двухсвязного бинарного объекта по малому числу проекций	8
ГЕЙЗЕР А. А. Основные уравнения физических процессов в вихретоковом преобразователе на основе закона электромагнитной индукции	12

##### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

РАДЫШ Ю. В., КИРЕЕВ А. С. Определение допустимого условиями прочности гидростатического нагружения стальных вертикальных резервуаров	17
ПОСЫПАЙКО Ю. Н. Контроль герметичности сварных соединений изделий с многослойной стенкой. 1. Расчет и исследование газопереноса по межслойным зазорам	20
ЕМЕЛЬЯНОВ О. А., ШЕПОТЬКО В. П., С. В. ЛУБЕНЕЦ С. В., ПИХОТА Ю. В. Силовое взаимодействие крана с путями. Влияние поперечной жесткости моста на распределение энергии деформации и накопление усталостных повреждений	27
ДЕГТЯРЬОВ В. В. Аналіз впливу поля завади на точність вимірювання магнітного моменту зональної гармоніки квадрупольної складової поля технічного об'єкта	32
РОЙТМАН А. Б., ТИТОВА О. А. Аналитические индикаторы «дышащей» трещины в круговой цилиндрической оболочке	35
КОЗИН А. Н., ДАВЫДОВ Е. А. Сопоставление результатов ультразвукового контроля сварных швов магистральных трубопроводов	39

##### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

БАГРОВ В. А. Исследование и контроль износостойкости штамповочного инструмента	43
СТОРОЖЕНКО В. А., МЕЛЬНИК С. И., КУХАРЕВ Ю. А. Новые методики для анализа информации при тепловом контроле трубопроводов	45

##### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Підсумки роботи УТ НКД за 2000 рік	48
Перший стандарт СТТУ УТ НКД	49
Сертификация в НАКУНК	49
КОЗИН А. Н. 15-я Всемирная конференция по неразрушающему контролю	51
ПОСЫПАЙКО Ю. Н. Ученые и специалисты Украины на 15-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю	56
Вітаємо ювіляра! Володимирі Васильовичу Панасюку — 75 років	59
К столетию академика Николая Сергеевича Акулова	60
Рефераты статей	61
Реклама	64

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

**Б.Е.ПАТОН**

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),  
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),  
З. А. Майдан (отв. секр.),  
И. П. Белокур, Ю. К. Бондаренко,  
В. Л. Венгринович, Э. Ф. Гарф,  
А. А. Грузд, Ю. Б. Дробот,  
Н. Н. Зацепин, В. И. Иванов,  
О. М. Карпаш, В. В. Ключев,  
Л. М. Лобанов, А. А. Лебедев,  
В. К. Лебедев, Г. Г. Луценко,  
Н. В. Новиков, Е. С. Переверзев,  
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,  
В. Н. Учанин, А. И. Степаненко,  
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,  
А. Ф. Улитко, Т. М. Швец,  
И. Я. Шевченко

#### Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел.: (044) 261-58-81, 261-54-03,  
269-26-23  
Факс: (044) 268-04-86  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

Редактор А. И. Сулима  
Электронная верстка  
Н. Н. Кравченко, И. В. Петушков

Свидетельство  
о государственной регистрации  
КВ 4787 от 09.01.2001

# TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 2, 2001

Founded in January, 1989

The National Academy of Sciences of Ukraine  
The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine  
International Association "Welding"

## CONTENTS

### Non-destructive methods and means of control

#### THEORETICAL

- VENGRINOVICH V.L., KUNTSEVICH A.P., TILLAK G.-R.* Diagnostics of the condition of the pipe inner surface in X-ray tomography: two-dimensional Bayesian reconstruction ..... 3
- ZOLOTAREV S.A., VENGRINOVICH V.L., TILLAK G.-R.* Three-dimensional reconstruction of the inner surface of a two-bond binary object by a small number of projections ..... 8
- GEISER A.A.* Basic equations of physical processes in an eddy current converter, based on the law of electromagnetic induction ..... 12

#### SCIENTIFIC AND TECHNICAL

- RADYSH Yu.V., KIREEV A.S.* Determination of hydrostatic loading of vertical steel tanks admissible in terms of strength ..... 17
- POSYPAIKO Yu.N.* Monitoring the tightness of welded joints on items with a multilayer wall. 1. Calculation and investigation of gas transfer across interlayer gaps ..... 20
- EMELYANOV O.A., SHEPOTKO V.P., LUBENETS S.V., PIKHOTA Yu.V.* Force interaction of the crane with the tracks. Influence of transversal rigidity of the bridge on distribution of deformation energy and accumulation of fatigue damage ..... 27
- DEGTYAREV V.V.* Analysis of the influence of interference field on the accuracy of measurement of the magnetic moment of the zonal harmonic quadruple composite field of an engineering object ..... 32
- ROITMAN A.B., TITOVA O.A.* Analytical indicators of a athing crack in a circular cylindrical shell ..... 35
- KOZIN A.V., DAVYDOV E.A.* Comparison of the results of ultrasonic testing of welds on the main pipelines ..... 39

#### BRIEF INFORMATION

- BARGOV V.A.* Investigation and control of stamping tools wear resistance ..... 43
- STOROZENKO V.A., MEL'NIK S.I., KUKHAREV Yu.A.* New procedures for information analysis in thermal control of pipelines ..... 45

#### NEWS AND INFORMATION

- Results of USNDT activity in 2001 ..... 48
- First STTU Standard of USNDT ..... 49
- Certification in UNCC-NDT ..... 49
- KOZIN A.N.* 15th World Conference on NDT ..... 51
- POSYPAIKO Yu.N.* Scientists and specialists of Ukraine in the 15th World Conference on NDT ..... 56
- Testing laboratory of technical diagnostics of the Institute of Strength Problems of the NAS of Ukraine ..... 58
- Jubilee greetings ..... 59
- For 100th anniversary of Nikolai Sergeevich Akulov ..... 60
- Abstracts of articles ..... 61
- Advertisement ..... 64

#### BOARD OF EDITORS

Editor-in-Chief

**B.E. Paton**

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),  
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),  
Z. A. Maidan (exec. secr.),  
I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko,  
V. L. Vengrinovich, E. F. Garf,  
A. A. Gruzd, Yu. B. Drobot,  
V. I. Ivanov, O. M. Karpash,  
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,  
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,  
G. G. Lutsenko,  
N. V. Novikov, E. S. Pereverzev,  
P. P. Prokhorenko, V. P. Radko,  
I. Ya. Shevchenko, A. I. Stepanenko,  
V. A. Strizhalo, A. Ya. Teterko,  
V. N. Uchanin, A. F. Ulitko,  
T. M. Shvets, N. N. Zatsepin

#### Address

The E. O. Paton Electric  
Welding Institute  
of the NAS of Ukraine,  
11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine  
Tel.: (38044) 261 58 81, 261 54 03,  
269 26 23  
Fax: (38044) 268 04 86  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
<http://www.nas.gov.ua/pwj>

Editor A. I. Sulima  
Electron galley N. N. Kravchenko,  
I. V. Petushkov

State Registration Certificate  
KV 4787 of 09.01.2001

# ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ: ДВУХМЕРНАЯ БАЙЕСОВА РЕКОНСТРУКЦИЯ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, А. П. КУНЦЕВИЧ, Г.-Р. ТИЛЛАК

В теплоэнергетике, химической промышленности, трубопроводном транспорте всегда существует необходимость диагностики текущего состояния внутренней поверхности труб, ослабленных коррозией в процессе эксплуатации. Если доступ к наружной поверхности не затруднен, то используют контактные методы ультразвуковой и электромагнитной толщинометрии. Проблема возникает, если такой доступ невозможен, например, из-за наличия изоляции, высокой температуры и прочих ограничений. В этом случае широко используется метод радиометрии [1].

Сущность метода радиометрии иллюстрируется рис. 1. Исследуемая труба просвечивается рентгеновским излучением источника  $S$ , как правило, коллимированного. Прошедшее через трубу излучение регистрируется детектором  $D$  и преобразуется в цифровую форму. Это может быть сделано с помощью комплексной радиоскопической системы или пленочного детектора со сканером. Поглощение излучения интенсивностью  $I$  (рис. 1) максимально в области между касательными к наружной и внутренней поверхностям трубы. По ширине провалов можно судить о толщине стенки трубы в данном месте. Этот подход называют тангенциальной радиографией. Несмотря на широкое распространение, этот метод имеет ряд недостатков.

Во-первых, толщина стенки измеряется только в локальной области. Для полного восстановления толщины стенки необходимо провести множество рентгеновских съемок, поворачивая систему источник-детектор вокруг оси трубы в диапазоне  $180^\circ$ , так как коррозия может быть неоднородной. Использование столь широкого диапазона углов съемки и большого числа проекций практически невозможно.

Во-вторых, в результате рассеяния рентгеновского излучения и других эффектов провалы размываются, что приводит к значительной погрешности определения даже локальной толщины, особенно тонкостенных труб. Достигнутая в настоящее время точность измерения толщины стенки этим методом составляет 1 мм, что неприемлемо.

Кардинальным решением было бы получение изображения сечения трубы с помощью компьютерной томографии, однако это требует, кроме большого числа проекций ( $\sim 700$ ), кругового обзора, или, как минимум,  $180^\circ$  обзора.

В работах [2–4] изложены принципы и алгоритмы малоракурсной рентгеновской томографии (МРТ) с использованием байесовой реконструкции [5]. В настоящей статье сделана попытка применить МРТ для двухмерной реконструкции внутренней

поверхности трубы в поперечном сечении с использованием до пяти рентгеновских проекций и диапазоном углов поворота при рентгеновской съемке (углом обзора) до  $90^\circ$ . Цель такого подхода — заменить экспериментальные исследования математическим моделированием. Однако это связано с существенным недостатком информации (малое число проекций и малый угол обзора) и со значительной модельной неадекватностью, что будет пояснено ниже.

Вначале излагаются основные принципы МРТ и описывается реконструкция, проведенная на основании данных, полученных моделированием.

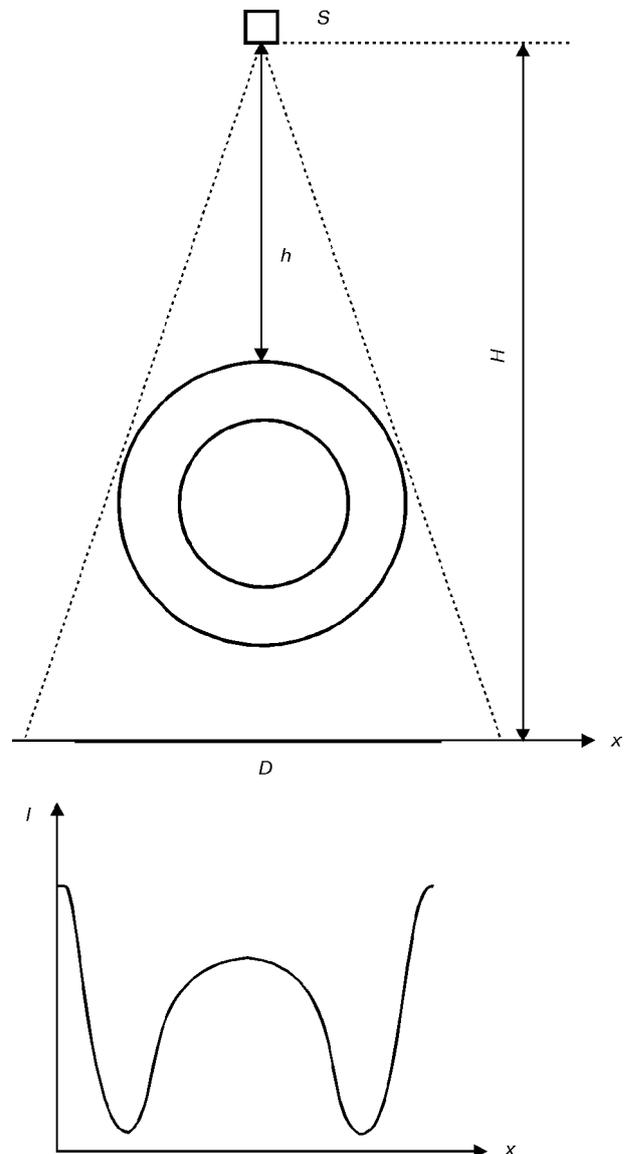


Рис. 1. Схема рентгеновской съемки и общий вид получаемого изображения.

Затем излагается нетривиальная проблема модельной неопределенности, т. е. существенной неточности физической модели рентгеновской съемки, проявляющаяся в этой практической задаче. После этого изложен метод решения, использованный в данной работе. Далее приведены результаты двухмерной реконструкции, полученные на реальных данных при известной внешней поверхности трубы.

**Основные принципы МРТ.** Назовем лучевой суммой  $P_{n,i}$  линейный интеграл

$$P_{n,i} = \int \mu(r) dI \quad (1)$$

по отрезку, соединяющему источник рентгеновского излучения, который предполагается точечным, с центром  $i$ -го пиксела на  $n$ -й проекции (т. е. на рентгеновском снимке при  $n$ -м положении системы источник–труба–детектор). Здесь  $\mu(r)$  — функция пространственного распределения коэффициента ослабления. Поскольку тип вещества однозначно связан с  $\mu(r)$ , то при известной  $\mu(r)$  известны форма и внутренняя структура исследуемого объекта.

Уравнение (1) идеализированное и не учитывает ошибок измерения, в том числе и систематических, обусловленных неадекватностью модели. В общем виде процесс измерения выражается операторным уравнением

$$P_{n,i} = (T\mu(r))_{n,i} + \eta_{n,i}, \quad (2)$$

где  $(T\mu(r))_{n,i} = \int \mu(r) dI$ , т. е.  $T$  — оператор, выражающий формулу (1);  $\eta_{n,i}$  — шум в  $i$ -м пикселе  $n$ -й проекции.

Из байесовой теории реконструкции известно, что если эти шумы носят несистематический характер, а их распределение близко к гауссовому, то наиболее физически вероятное решение уравнения (2) относительно  $\mu(r)$  можно записать в виде

$$\mu_{\text{вер}}(r) = \arg \min \left\{ \left[ \sum_{n,i} ((T\mu(r))_{n,i} - P_{n,i}^m)^2 \right] + \alpha B(\mu(r)) \right\}, \quad (3)$$

где  $(T\mu(r))_{n,i}$  рассчитаны, а  $P_{n,i}^m$  получены из измеренных данных на основании закона поглощения излучения в веществе

$$I = I_0 e^{-P}, \quad (4)$$

где  $I_0$  — интенсивность рентгеновского излучения, не прошедшего через вещество;  $I$  — интенсивность, измеренная детектором;  $P$  — лучевая сумма.

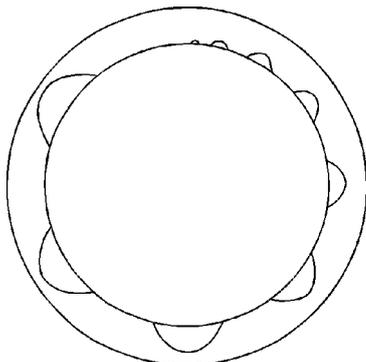


Рис. 2. Профиль трубы в модельном эксперименте.

Первое слагаемое в (3) отвечает за соответствие  $\mu(r)$  измеренным данным. Во втором  $B(\mu(r))$  — ограниченный снизу функционал, заключающий в себе наши априорные знания об искомом решении, т. е. значение функционала для данного  $\mu(r)$  определяется априорной вероятностью этого  $\mu(r)$ ;  $\alpha$  — положительный параметр, зависящий от ошибок измерения: чем выше ошибка, тем большим нужно брать  $\alpha(r)$ , так как измеренным данным приходится меньше доверять. Выбор наиболее правдоподобной априорной информации, по существу, и составляет искусство байесовой реконструкции. Именно априорная информация противостоит недостатку и неполной достоверности входных данных.

Преимуществом МРТ является одновременная обработка всей доступной информации. В результате этого составляющая, связанная с шумом и другими ошибками, и, как правило, не подтвержденная на всех проекциях, или грубо противоречащая нашим априорным знаниям о характере решения, отбрасывается.

**Реконструкция по моделированным данным.**

Для проверки эффективности применения байесовой реконструкции к проблеме реконструкции профиля внутренней поверхности трубы проведены эксперименты по восстановлению из моделированных данных с наложенным на них знакопеременным гауссовым шумом. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1. Источник рентгеновского излучения полагается точечным и имеющим однородное угловое распределение интенсивности излучения. Данные снимались при пяти углах поворота трубы (вокруг своей оси, которая оставалась неподвижной): 0, 25, 45, -25 и -45°. Были рассчитаны лучевые суммы  $P_{n,i}$  для нескольких профилей внутренней поверхности трубы, в частности, изображенного на рис. 2, на которые наложен аддитивный гауссов шум. Затем эти данные использовались как входные для алгоритма реконструкции.

**Алгоритм.** Область интереса дискретизировалась на равномерной сетке в полярных координатах, разбиваясь в них на прямоугольные. Поскольку задача бинарная, т. е. в ней присутствуют только два вида вещества (воздух и металл), то каждой  $i$ -й ячейке сопоставлялась своя величина  $\mu_i$ , имеющая одно из двух возможных значений. После дискретизации операторное уравнение (1) можно представить в виде

$$P_{n,i} = \sum_j \mu_j I_{n,ij}, \quad (5)$$

где  $I_{n,ij}$  — эффективное расстояние, проходимое лучом, падающим на  $i$ -й пиксел детектора на  $n$ -й проекции, через  $j$ -ю ячейку дискретизации.

В качестве априорного функционала  $B(\mu)$  использовался один из простейших априорных функционалов — сумма квадратов первых производных по базисным направлениям в центре каждой ячейки дискретизации. С точностью до постоянного множителя,

$$B(\mu) = \sum_j \sum_a (\mu_j - \mu_{j,a})^2, \quad (6)$$

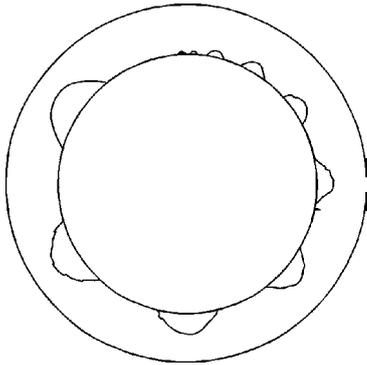


Рис. 3. Результаты восстановления в модельном эксперименте.

где индекс  $a$  обозначает ячейки, соседние с  $j$ -й;  $\mu_j$ ,  $a$  — коэффициент ослабления в ячейках дискретизации, соседних с  $j$ -й. Кроме того, в априорную информацию вводились дополнительные ограничения, направленные на формирование цельного профиля внутренней поверхности и исключение возможности появления внутренних полостей в стенке трубы в конечном решении.

После подстановки выражений (5) и (6) в уравнение (3) получаем для  $\mu = \{\mu_r\}$

$$\mu = \arg \min \left\{ \sum_{n,i} \left( \sum_j \mu_j I_{n,ij} - P_{n,i}^m \right)^2 + \alpha \sum_j \sum_a (\mu_j - \mu_{j,a})^2 \right\}.$$

Минимизация проводилась с помощью оригинального алгоритма, основанного на идее градиентного спуска.

Результат восстановления профиля трубы показан на рис. 3. Как видно, с помощью байесового подхода удается подавлять несистематический шум и успешно противостоять недостатку информации, приводя к средней ошибке восстановления толщины стенки 80 мкм при шуме со стандартным отклонением, равным 5 % от толщины стенки трубы. Однако систематических ошибок входных данных не было, и физическая модель была полностью определена.

**Реконструкция по реальным данным.** Проблема реконструкции по реальным данным существенно отличается от описанной выше. Главное ее отличие состоит в неадекватности модели поглощения (4), обычно используемой в МРТ, реальному взаимодействию рентгеновского излучения с трубами промышленных размеров. Это связано с высоким вкладом рассеяния в изображение на проекции, что вносит недопустимо большие систематические ошибки во входные данные для алгоритмов МРТ, которые не рассчитаны на сильное рассеяние. Большую роль играет явление ужесточения излучения, вытекающее из того, что высокие частоты спектра излучения источника поглощаются меньше, чем низкие. Систематические ошибки обусловлены также следующим: конечными размерами источника, который рассматривается как точечный, ошибками в определении геометрических параметров, неучтенный неравномерностью углового распределения интенсивности излучения источника, наличием близости от трубы объектов, сильно рассеивающих излучение. Эти факторы, в частности, могут вести к асимметрии изображения.

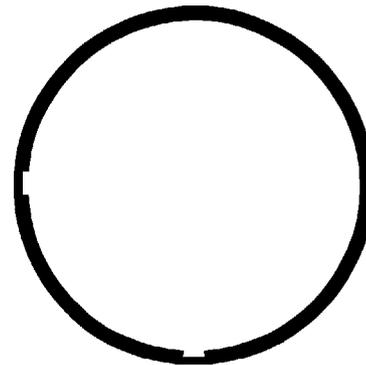


Рис. 4. Поперечное сечение реальной рентгеновской проекции.

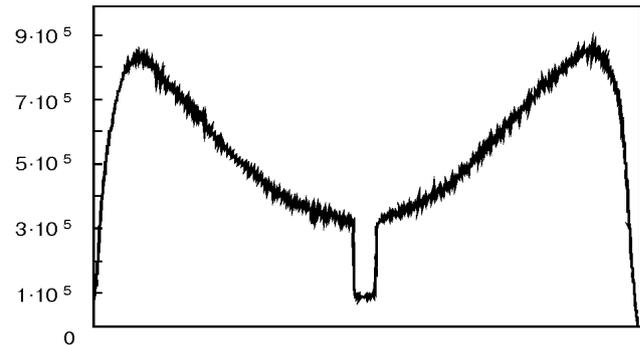


Рис. 5. Профиль трубы в реальном эксперименте.

Теоретически возможны несколько путей преодоления проблем, связанных с рассеянием.

1. Учет в модели рассеяние рентгеновского излучения. Однако сейчас не существует быстрых способов для его прямого расчета. Внушает определенные надежды проведение калибровки по специально подготовленным образцам труб.

2. Изменение процедуры рентгеновской съемки с тем, чтобы минимизировать те эффекты, которые нельзя учесть в модели. В частности, можно отнести детектор на большое расстояние от трубы, чтобы вклад рассеяния был однородным по всей проекции и с ним можно было обращаться как с постоянной составляющей. Однако это не всегда возможно в практических приложениях.

3. Выбор тех участков проекций, которые могут быть более успешно описаны уже существующей моделью (4), с дальнейшим использованием при реконструкции только их.

В данной работе в основном применялся третий подход.

Экспериментальные данные, использовавшиеся в данной работе, были получены по схеме, аналогичной описанной в предыдущей части (рис. 1) при следующих параметрах: источник 200 кВ; рентгеновская трубка с фокусным расстоянием 0,8 мм, расстояние от источника до трубы 50 см, а до детектора — 20 см, внешний диаметр трубы 11,4 см, толщина ее стенки 6 мм (в стенке вырезаны две прямоугольные продольные канавки определенных размеров — см. рис. 4), углы поворота 0, 25, 45, -25 и -45°. При 0° большой дефект расположен строго на перпендикуляре, опущенном из источника на детектор. На рис. 5 изображено типичное поперечное (относительно оси трубы) сечение проекции, полученной при сканировании экспонированной

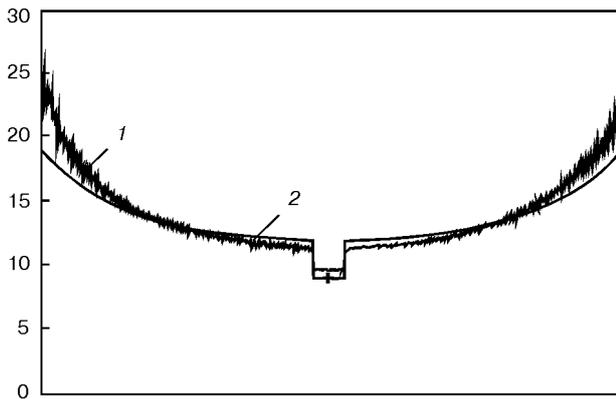


Рис. 6. Поперечное сечение реальной рентгеновской проекции в сравнении с данными, которые должны были получиться, если бы использованная модель (9) была полностью адекватна.

пленки (из тех, что использовались в описываемой работе). Здесь сканер инвертировал изображение и отсек большие интенсивности.

Входными данными для алгоритма реконструкции в МРТ являются лучевые суммы  $P_{n,i}^m$ . Именно они должны быть получены из цифровых данных  $D_{n,i}^m$  при сканировании пленки. С физической точки зрения связь между  $D$  и  $P$  состоит из связи между  $D$  и интенсивностью падающего излучения  $I$ , а также между  $I$  и  $P$ .

Зависимость между  $D$  и  $I$  линейная:

$$D = A + CI. \quad (7)$$

Коэффициенты  $A$  и  $C$  не могут быть рассчитаны теоретически ввиду сложности физических процессов, происходящих при экспонировании и сканировании пленки. Один из коэффициентов можно исключить, если определить  $D = D_0$ , соответствующее лучам, не проходящим через вещество:

$$B = D_0 - AI_0. \quad (8)$$

Однако, если, как это было в использованных в данной работе экспериментах, весь диапазон оптической плотности на экспонированной пленке не помещается в диапазон сканера, то даже это невозможно. В этом случае данные, соответствующие большим интенсивностям, отбрасываются, и  $D_0$  измерить невозможно. Поскольку связь между  $D$  и  $P$  для труб очень мало изучена, для начала пришлось ограничиться простейшей аппроксимацией этой связи

$$D_{n,i} = a + b \exp(-P_{n,i}) + c(X_{n,i} - X_c), \quad (9)$$

**Среднеквадратичная ошибка восстановления толщины стенки в зависимости от размеров отсекаемой части проекции**

Отсекаемая часть, %	Ошибка			
	общая, мм	для центрального дефекта, мм	для бокового дефекта, мм	для остальной части (артефакты), мм
24	0,16	0,81	0,24	0,12
25	0,16	0,82	0,29	0,12
30	0,16	0,79	0,31	0,12
35	0,20	0,98	0,45	0,15
40	0,19	0,80	0,89	0,11
45	0,19	0,80	не восстанавливается	0,11
60	0,22	1,0	—	0,13

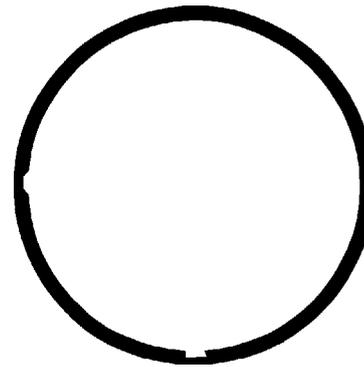


Рис. 7. Результаты восстановления по данным реального эксперимента.

где  $X_{n,i}$  — координата  $i$ -го пиксела  $n$ -й проекции;  $X_c$  — координата проекции оси трубы на детектор;  $a, b, c$  — параметры, которые должны быть найдены.

При расчете лучевых сумм  $P_{n,i}$  коэффициент  $\mu$ , рассчитывался с учетом явления ужесточения излучения. Третье слагаемое в выражении (9) предназначено для компенсации асимметрии.

Коэффициенты  $a, b, c$  находились путем квадратичной оптимизации. Минимизировалась разница между измеренными значениями  $D$  и рассчитанными по формуле (9).

Установлено, что эти коэффициенты не могут быть оптимизированы так, чтобы формула (9) удовлетворительно описывала все сечение. Однако она относительно успешно работает, если отбросить края сечения (не менее 20 %). Это уменьшает количество входных данных и одновременно кардинально улучшает их качество. В качестве примера представлен рис. 6, где изображены теоретически рассчитанные 1 и полученные из измеренных данных 2 (при оптимальных  $a, b, c$ ) лучевые суммы, нормированные на  $\mu$ , материала трубы. Видны очень сильные расхождения систематического характера. Сильные систематические искажения присутствуют и на всех остальных проекциях. Однако они не подтверждают друг друга, и поэтому в основном отбрасываются алгоритмом МРТ. Результат восстановления сечения трубы показан на рис. 7. Следует отметить, что боковой (меньший) дефект фактически восстанавливался только по двум проекциям  $\pm 45^\circ$ . Иначе говоря, входные данные на остальных проекциях говорили не о том, что дефект не существует, а о том, что никакой информации о нем нет.

В таблице приведены интегральные характеристики качества восстановления каждого из дефектов, поверхности между ними, а также толщины стенки в целом в зависимости от размеров отсекаемой области.

**ВЫВОДЫ**

Проверена возможность применения малоразмерной рентгеновской томографии для определения толщины стенки трубы при известной внешней поверхности. Показано, что при наличии точной физической модели задача успешно решается даже при сильном шуме. Однако, как было найдено, реальная физическая модель взаимодействия излучения и вещества

трубы может сильно отличаться от простейшей модели поглощения. Поскольку систематической работы по уточнению модели пока не проведено, принята попытка ее аппроксимации. С целью улучшения качества входных данных, т. е. более успешной аппроксимации, предложено использовать проекции не полностью, а лишь их центральные части. Используемый метод реконструкции отличается принципиальной способностью извлекать правильную информацию из этих данных, с переменным успехом подавляя недостатки физической модели. Получение более точных результатов требует либо улучшения технологии съемки, чтобы модель поглощения больше соответствовала реальности, либо дальнейшего изучения закономерностей рассеяния рентгеновского излучения на трубах. Альтернативным путем является проведение экспериментальной калибровки для каждого конкретного типа источника и трубы.

Данная работа проводилась на оборудовании Федерального института материаловедения и испыт

аний Германии при содействии доктора У. Эварта, К. Беллона и И. Онеля.

1. *Zscherpel U., Bellon C.* Wall thickness estimation from digitized radiographs // Proc. of 7-th ECNDT conference, Copenhagen 1998. — P. 2819–2825.
2. *Vengrinovich V. L., Denkevich Yu. B., Tillack G.-R.* Reconstruction of 3D binary structures from an extremely limited number of cone-beam X-ray projections // J. Phys., dev. appl. phys. — 1999. — № 32. — P. 2505–2514.
3. *Zolotarev S. A., Vengrinovich V. L., G.-R. Tillack.* 3D reconstruction of flaw images with Inter-Iterational suppression of shadow artefacts // Rev. of Prog. In QNDE / Ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti. — New-York: Plenum Press, 1997. — Vol. 16.
4. *Vengrinovich V., Denkevich Yu., Tillack G.-R.* Limited projection 3D X-ray tomography using the maximum entropy method // Review of Progress in QNDE / Ed. by D. O. Tompson and D. E. Chimenti. — Vol. 17. — New-York: Plenum Press. — 1998. — P. 403–410.
5. *Besag J.* Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems // J. R. Statist. Soc., 1974. — B36. P. 192–236.

*Ин-т прикладной физики НАН Беларуси,  
Минск  
Федеральный ин-т исследования материалов и контроля,  
Берлин*

*Поступила в редакцию  
19.09.2000*

### **Специалисты отдела №4 ИЭС им.Е.О.Патона предлагают Вам:**

- ✓ **проведение** неразрушающего контроля сооружений, конструкций, материалов и изделий ультразвуковым, рентгеновским, магнитопорошковым, капиллярным, герметичности, и другими методами НК по различным нормам и стандартам;
  - ✓ **определение** типа, местоположения и реальных размеров дефектов с использованием компьютеризированных ультразвуковых дефектоскопов;
  - ✓ **проведение** сертификационных испытаний объектов повышенной опасности (котлы, сосуды, резервуары, трубопроводы, краны, трубы) методами НК;
  - ✓ **разработка** технологии, оформление и утверждение технологических инструкций на проведение НК объектов;
  - ✓ **оказание** консультативных услуг в выборе и применении средств и методов НК, а также содействие в приобретении средств НК отечественных и зарубежных фирм;
  - ✓ **аттестация** испытательных лабораторий (служб неразрушающего контроля) на техническую компетентность в области НК, в соответствии со стандартами ДСТУ EN45001 и ДСТУ EN45002;
  - ✓ **обучение** специалистов ультразвукового, радиационного, магнитопорошкового, капиллярного, визуального и контроля герметичности по программам начального обучения и подготовки к экзаменам на 1, 2 и 3 уровни квалификации;
  - ✓ **проведение** механических испытаний, металлографических исследований и химанализа основного металла и сварных соединений;
  - ✓ **изготовление** стандартных образцов предприятия для ультразвукового контроля; обеспечение нормативно-технической документацией по НК и соответствующей литературой.
- Наши специалисты сертифицированы на 2 и 3 уровни квалификации по всем методам НК, а техническая компетентность отдела подтверждена сертификатами Госстандарта Украины и Госнадзорхрантруда Украины.

**Ин-т электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины  
Украина, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 4.  
Телефоны: (044) 227 26 66, 261 51 96. Факс: (044) 220 94 82.  
E-mail: paton@i.kiev.ua**

### 3-ХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХСВЯЗНОГО БИНАРНОГО ОБЪЕКТА ПО МАЛОМУ ЧИСЛУ ПРОЕКЦИЙ

С. А. ЗОЛОТАРЕВ, В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, Г.-Р. ТИЛЛАК

Компьютерная радиография является наиболее распространенным способом контроля труб и визуализации выявленных коррозионных дефектов [1]. Кроме того, она давно используется для оценки толщины стенок труб по изменению оптической плотности фильма вдоль диаметра трубы [2]. Погрешность таких оценок составляет не менее 0,2...0,3 мм. Для современной промышленности необходимо снижение этого уровня до 0,1 мм и менее. Кроме того при использовании такой технологии невозможно раздельно оценить дефекты, проецирующиеся в одну и ту же область радиограммы. Для повышения разрешающей способности и определения точного геометрического положения дефектов может быть использована 3-хмерная малоракурсная томография [3]. Для преодоления проблемы высокой размерности обратной задачи предлагается использовать поверхностное представление объекта реконструкции. Еще одна отличительная черта изучаемой проблемы заключается в следующем: 1) мы исследуем так называемые однородные объекты, которые имеют постоянный коэффициент линейного ослабления. После проведения соответствующей нормировки он приводится к значению, равному единице. Кроме того, 2) источник рентгеновского излучения является точечным, 3) основным механизмом взаимодействия рентгеновского излучения с веществом является поглощение и 4) реконструируемый объект — внутренняя поверхность трубы, а внешняя поверхность — цилиндрическая с фиксированным радиусом.

**Основные определения.** Рассматривается нелинейное операторное уравнение

$$A(\vec{R}(M)) = \vec{F}, \quad (1)$$

где  $\vec{F}$  — совокупность измеренных данных для всех проекций.

Для  $N$  проекций:  $\vec{F} = \{f_n^m\}$ ;  $n = \overline{1, N}$ , где функция  $f_n^m(p)$  — измеренные данные на  $n$ -й проекции;  $\{p_j^n : j = \overline{1, J_n}\}$  — позиции пикселей  $n$ -й проекции;  $\vartheta_n$  — угол проецирования для  $n$ -й проекции;  $J = \sum_n J_n$  — суммарное число пикселей на всех про-

екциях. Вектор  $\vec{R}(M)$  — радиус-вектор текущей точки внутренней поверхности  $M(x, y, z)$ ,  $\{M_i : i = \overline{1, I}\}$  — позиции узлов решетки внутренней

поверхности. Оператор  $A$  связывает внутреннюю поверхность  $S$ , определяемую как годограф конца вектора  $\vec{R}(M)$  и проекции объекта, т.е.

$$A(\vec{R}(M)) = \{A(\vec{R}(M))_n\}, \quad n = \overline{1, N}.$$

Здесь  $A(\vec{R}(M))_n = f_n^c(p)$  — расчетные данные  $n$ -й проекции. Источники излучения располагаются на дуге окружности в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Плоскости детекторов перпендикулярны центральному лучу, проведенным через источник и точку вращения. Все они расположены на одном расстоянии от оси вращения.

**Представление объекта.** Будем рассматривать объект контроля, описываемый двумя цилиндрическими оболочками: внешней и внутренней. Внешняя оболочка в данной работе считается заданной заранее. Внутренняя оболочка задается узловыми точками в цилиндрической системе координат  $\rho(\varphi, y)$ , полученными дискретизацией по полярному углу  $\{\varphi_k : k = \overline{1, K}\}$ , и оси  $OY \{y_l : l = \overline{1, L}\}$ , которая совпадает с осью ординат декартовой системы координат. Число узловых точек остается постоянным в течение всего процесса реконструкции. Цилиндрическая система координат используется только для первоначальной дискретизации внутренней оболочки. Все дальнейшие операции выполняются в декартовой системе координат. Сетки по полярному углу и оси ординат будем считать равномерными. Заметим, что  $I = K * L$ . Для решения прямой задачи рассмотрим внутреннюю поверхность как совокупность элементарных поверхностных элементов  $S_u : u = \overline{1, U}, \quad U = 2 * K * (L - 1).$

Поверхностный элемент — это треугольник, вершинами которого являются узловые точки дискретной решетки. Отметим, что границы треугольника (т.е. его стороны и вершины) могут не принадлежать поверхностному элементу. Тогда  $S = \cup S_u, S_{u_1} \cap S_{u_2} = \emptyset, u_1 \neq u_2$ . Проекцию элемента поверхности  $S_u$  на  $n$ -ю плоскость детекторов обозначим  $\sigma_u^n$ . Разбиение поверхности осуществляется таким образом, что соприкасающиеся стороны соседних треугольников и их общие вершины будут принадлежать только одному из них. Такое разбиение всегда возможно, но оно не единственное. Разбиение может быть осуществлено двумя путями:

до начала реконструкции определенным образом маркируются границы каждого треугольника с тем, чтобы они не имели общих точек с границами соседних треугольников;

в процессе реконструкции принадлежность грани к элементу поверхности  $S_u$  определяется по проекции данного треугольника  $\sigma_u^n$  на текущей плоскости детекторов. Это может быть установлено по топологической ориентации проекции поверхностного элемента  $\sigma_u^n$  на плоскости детекторов. Идея такого подхода была предложена Загоновым В. П.

В настоящей работе реализованы оба этих подхода. Были разработаны оригинальные математические алгоритмы и осуществлена их программная реализация. По затратам машинного времени они оказались эквивалентными. Основное преимущество второго подхода заключается в возможности описания внутренней поверхности в виде произвольным образом упорядоченного списка поверхностных элементов.

**Расчет прямого оператора.** Осуществляется последовательный перебор всех элементов внутренней оболочки и для каждого из них:

- а) находится проекция треугольника  $S_u$  на текущую плоскость детекторов;
- б) устанавливаются границы треугольника  $\sigma_u^n$ ;
- в) определяются все пиксели  $p_j^n : j = \overline{1, J_n}$ , центры которых лежат внутри треугольника  $\sigma_u^n$  или на его границах;
- г) рассчитываются точки пересечения лучей, проходящих через центры внутренних и граничных пикселей треугольника  $\sigma_u^n$  с внутренней и внешней поверхностью объекта.

Вычисление точек пересечения с внутренней поверхностью сводится к пересечению соответствующих лучей с плоскостью, определяемой элементом  $S_u$ . Точки пересечения с внешней поверхностью рассчитываются один раз до начала реконструкции.

После определения всех точек пересечения, лежащих на конкретном луче, осуществляется их сортировка по возрастанию либо убыванию параметра прямой, на которой лежит луч.

Число точек пересечения для каждого луча всегда будет четным. Вычисляя расстояния между соответствующими парами точек и суммируя их, определим лучевую сумму  $f_n^c(p)$  для пикселя  $p_j^n : j = \overline{1, J_n}$ , определяющего данный луч.

Таким образом, после обхода всех проекций и расчета прямого оператора  $A(\vec{R}(M))_n = f_n^c(p)$ ,  $n = \overline{1, N}$ , мы определим все расчетные лучевые суммы.

Функционал

$$\delta_n(\vec{R}(M)) = \sum_{p_1}^n |f_n^c(p) - f_n^m(p)| \sum_{p_1}^n f_n^m(p) \quad (2)$$

измеряет отклонение внутренней поверхности  $S$ , заданной дискретной решеткой узлов  $M_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ , от внутренней поверхности, соответствующей измеренным данным для  $n$ -й проекции. Среднее значение отклонения

$$\delta_{mid}(\vec{R}(M)) = \sum_n \delta_n(\vec{R}(M)) / N. \quad (3)$$

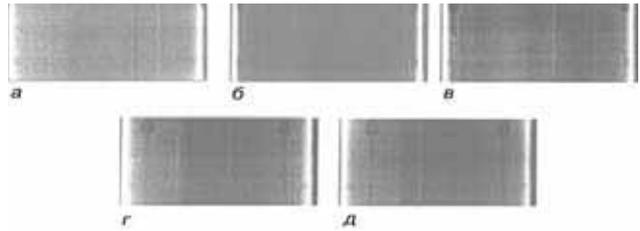


Рис. 1. Проекция для углов, град: а – 0; б – 25; в – 45; г – (-25); д – (-45).



Рис. 2. Реконструированная внутренняя поверхность трубы, развернутая по полярному углу.

**Принцип деформации внутренней поверхности объекта.** Для реконструкции внутренней поверхности объекта используется итерационная процедура, обеспечивающая последовательную минимизацию функционала невязки (3). Междуитерационная деформация внутренней поверхности осуществляется с использованием взвешенной поддержки центральных областей трубы, где эффект рассеивания рентгеновских лучей не вносит значительный вклад в измеренные данные. Эта процедура производится следующим образом:

осуществляется последовательный перебор всех узловых точек внутренней поверхности  $M_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ . Через каждую узловую точку  $M_i$  проводим  $N$  лучей, которые пересекут соответствующие плоскости детекторов в пикселях  $p_{j^n}^n$ ,  $n = \overline{1, N}$ . Для них вычисляем разности между измеренными и вычисленными значениями лучевых сумм  $\Delta f_n(p) = f_n^c(p) - f_n^m(p)$ . Потом находим взвешенную среднюю разность

$$\sum_n (M_i) = \sum_n \Delta f_n(p) \cos(\Psi_i^n) / N, \quad (4)$$

где  $\Psi_i^n$  – это угол между проекциями на плоскость, перпендикулярную оси ординат луча, проведенного через данный узел  $M_i$  от источника, расположенного под углом  $\vartheta_n$ , и радиус-вектора  $(\vec{R}(M))$ . Величина смещения узла  $M_i$  будет

$$h(M_i) = \lambda^{(0)*} \Sigma(M_i), \quad 0 < \lambda^{(0)} < 1, \quad (5)$$

где  $\lambda_0$  – величина параметра релаксации для 1-й итерации.

Релаксационные методы решения систем уравнений и неравенств подробно рассмотрены в [5]. Смещение производится вдоль перпендикуляра, опущенного из данного узла  $M_i$  на ось ординат. Если в среднем рассчитанные лучевые суммы больше, чем измеренные, то смещение  $h(M_i)$  будет положительным. Это приведет к увеличению расстояния между узлом и осью ординат, т.е. толщина стенки объекта станет меньше. Для обеспечения более гладкого смещения точек внутренней поверхности осуществлялось усреднение двумерного массива  $h(M_i)$ ,  $i = \overline{1, I}$ , методом скользящего окна. При

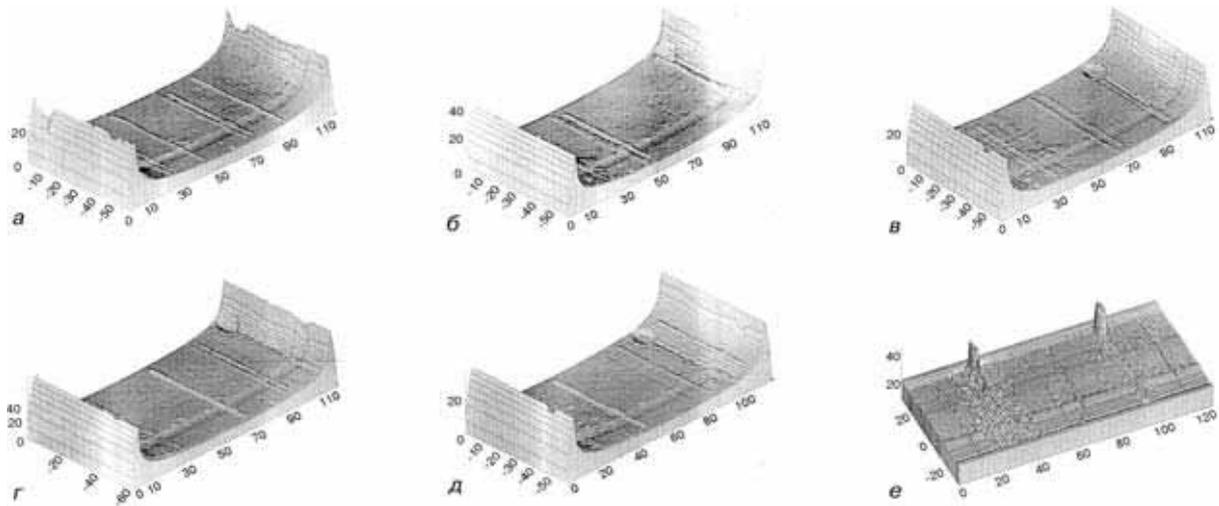


Рис. 3. Проекция для разных углов, полученные по реконструированным объектам, для углов, град: а – 0; б – 25; в – 45; г – (-25); д – (-45); е – трехмерное представление внутренней поверхности реконструированного объекта.

значениях  $\delta_{mid}(\vec{R}(M)) > 0,2$  фильтрация производилась окном 5×5 элементов. После достижения значений  $\delta_{mid}(\vec{R}(M)) \leq 0,2$  размер окна уменьшался до 3×3 элементов. Смещение внутренней границы осуществлялось для всех узловых точек одновременно. После смещения всех узловых точек  $M_i$  получим новую дискретную решетку  $M_i^{(q)}, i = 1, \bar{I}$ . Для  $(q + 1)$ -й итерации будем иметь соответственно:

$$\sum (M_i^{(q)} = \sum_n \Delta_n^{(q)}(p) \cos(\Psi_i^n) / N, \quad (4^*)$$

$$h(M_i^{(q)}) = \lambda^{(q)} \sum (M_i^{(q)}), \quad 0 < \lambda^{(q)} < 1. \quad (5^*)$$

После внесения поправок  $h(M_i^{(q)}, i = 1, \bar{I}$ , получим очередное приближение  $\vec{R}(M_i^{(q+1)}), i = 1, \bar{I}$ . Итерационный процесс останавливался, если для трех последовательных итераций не удавалось получить лучшее приближение, т. е. если справедливы неравенства

$$\begin{aligned} \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) &\geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-1)})), \\ \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) &\geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-2)})), \\ \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) &\geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-3)})). \end{aligned} \quad (6)$$

**Пример применения алгоритма.** Для проверки предлагаемого метода в ВАМ (Берлин) осуществлен эксперимент, в котором получены пять проекций трубы из нержавеющей стали. Съемка экспериментальных данных проводилась с фиксацией полученных радиограмм на новом типе детекторов – люминесцентной регистрирующей пластине (Imaging Plate) [4]. Внешний диаметр трубы 112 мм, толщина стенки 3,6 мм.

Внутренняя поверхность трубы имела впадины и выпуклости различных размеров. Для проверки разрешающей способности алгоритма к внутренней поверхности трубы прикрепили четыре проволоочки диаметрами 1,8; 1,4; 1,25 и 0,8 мм. Просвечивание трубы осуществлялось придиевым источником.

Время экспозиции 6 мин. Получено пять изображений при углах поворота трубы +45; +25; 0; -25 и -45°. Размер пиксела исходных изображений 50 мк. Расстояние от источника до детектора 1604 мм; от нижнего края трубы до плоскости детекторов 12 мм. Это привело к сильному рассеиванию на краях трубы. Для данной геометрии источник излучения можно считать точечным, т.е. просвечивание осуществлялось коническим пучком. Коэффициент линейного ослабления материала трубы  $\mu = 74,8 \text{ м}^{-1}$ .

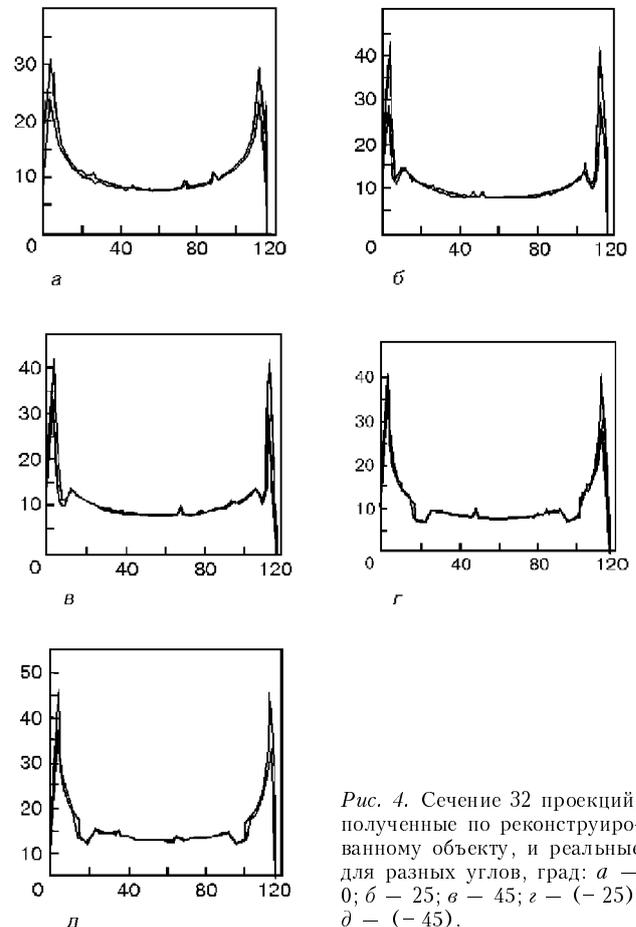


Рис. 4. Сечение 32 проекций, полученные по реконструированному объекту, и реальные для разных углов, град: а – 0; б – 25; в – 45; г – (-25); д – (-45).

Для проведения реконструкции изображения были переведены в более крупную сетку. Размер пиксела новых изображений составил 0,2 мм. Размер изображений получили равным 593×299 пикселов. Дискретизация внутренней поверхности: по углу 1200 точек, а по оси ординат 213 точек (0,3° и 0,3 мм — размер интервалов по углу и координате). Число элементов внутренней поверхности равно 508800.

Число итераций обычно составляло 10–15. Время счета на компьютере Pentium-200 порядка двух часов. Это время можно значительно сократить, если задействовать дополнительную оперативную память. Функционал невязки минимизировался до значения 0,0785.

По непосредственной оценке в сравнении с реальным объектом установлено, что погрешность реконструкции составила порядка 2 %, а величина артефактов — 1 %. Среднее отклонение реконструированного внутреннего радиуса трубы от истинного значения в тех местах, где не было выступов и впадин равно 0,1 мм. Используемые проекции и результаты реконструкции приведены на рис. 1–4.\*

#### ВЫВОДЫ

Разработан метод реконструкции 3-хмерных изображений объектов по данным ограниченного числа рентгеноскопических проекций при наличии сущес-

твенной модельной неопределенности на краях (за счет краевых эффектов и дополнительного рассеивания). Сущность метода состоит в использовании взвешенной поддержки проекционных данных в зависимости от расстояния до проекции края трубы. Экспериментальная проверка метода показала его высокую эффективность при реконструкции внутренней поверхности коррелированных труб по малому числу проекций (в эксперименте 5) и ограниченном угле обзора (90°).

1. *Zscherpel U., Bellon C.* Wall Thickness Estimation from Digitized Radiographs., 7-th ECNDT Conference. — Copenhagen, 1998. — P. 2819–2825.
2. *Willems P., Vaessen B.* — Agfa Gevaert. — Belgium. Hueck W. VEBA Ol. — Germany. Ewert U. a. o., BAM — Berlin. Applicability of CR for corrosion and Wall Thickness Measurements, 7-th ECNDT Conference. — Copenhagen, 1998 — P. 2774–2781.
3. *Vengrinovich V., Denkevich Y., Tillack G.-R., Heine S.* X-ray 3-D reconstruction using minimal projections and maximum a priori knowledge. Preceding International Conference «Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics». — Minsk, Belarus, 1995. P. 77–81.
4. *Ewert U., Onel Y., Zscherpel U., Stade J.* — BAM, Germany. Willems. P. — Agfa Gevaert. — Belgium., 7-th ECNDT Conference. — Copenhagen, 1998. P. 2725–2732.
5. *Herman G. T.* Image reconstruction from projections. The fundamentals of computerized tomography. Academic press. — New-Jork, 1980.

*Ин-т прикладной физики НАН Беларуси,*

*Минск*

*Федеральный ин-т исследования материалов и контроля,*

*Берлин*

*Поступила в редакцию*

*20.09.2000*

## Всероссийская конференция с международным участием

### СВАРКА И КОНТРОЛЬ-2001

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ

**18–20 сентября 2001 г.**

**г. Воронеж**

- ✓ Технология и оборудование для поверхностного упрочнения и нанесения покрытий
- ✓ Методы и средства контроля и диагностики сварных соединений
- ✓ Автоматизация и компьютеризация сварочных процессов
- ✓ Сертификация продукции, оборудования, технологии, сварочных материалов и персонала в сварочном производстве

**Тел. / факс: (0732) 71-65-59, E-mail: alex@mk.vrn.ru**

\* Эксперимент по получению рентгеноскопических проекций трубы выполнен в BAM (Berlin) в лаборатории рентгенографии и ламинографии с участием У. Эверта, И. Онея, А. Кунцевича, В. Венгриновича.

# ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИХРЕТОКОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ ЗАКОНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

А. А. ГЕЙЗЕР

Электромагнитные методы неразрушающего контроля и диагностики токопроводящих изделий нашли широкое применение в современной промышленности, технике, особенно в трех областях неразрушающего контроля: дефектоскопии, толщинометрии и структуроскопии [1–4]. Между тем теоретическое осмысление физических процессов, происходящих в аппаратуре при этом методе контроля, вызывает определенные трудности. В равной степени это утверждение относится и к разработке инженерных методов расчета вихретоковых преобразователей (ВТП) и особенно многоэлементных, которые могут найти широкое применение [5]. Это обусловлено сложным математическим аппаратом, применяемым для его объяснения. Так, для этого метода контроля необходимо найти решение уравнений Максвелла [6], записанных в дифференциальной форме в виде

$$\operatorname{rot} \vec{H} = J_{\text{полн}}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \quad (2)$$

где  $H$  и  $E$  — векторы напряженности магнитного и электрического полей соответственно;  $B$  — вектор магнитной индукции;  $J_{\text{полн}}$  — вектор плотности полного тока, равный сумме векторов плотности токов проводимости  $J_{\text{пр}}$ , смещения  $J_{\text{см}}$ , переноса  $J_{\text{пер}}$  и сторонних  $J_{\text{стор}}$ ;  $t$  — время.

Уравнения (1), (2) после ряда допущений, характерных для этого метода контроля, таких как отсутствие токов смещения и тока переноса в линейной изотропной проводящей среде, сводятся к одному уравнению Фурье [7] вида

$$\nabla^2 \vec{H} - \sigma \mu_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\operatorname{rot} J_{\text{стор}}, \quad (3)$$

где  $\nabla$  — оператор Гамильтона;  $\sigma$  — удельная электрическая проводимость;  $\mu_a = \mu_0 \mu_r$  — абсолютная магнитная проницаемость;  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Уравнения (1), (2) можно свести к уравнению векторного потенциала  $A$ , определяемого выражением

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}.$$

Для неподвижной линейной изотропной среды уравнение векторного потенциала при монохроматическом возбуждении имеет вид

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu_a \vec{J}_{\text{стор}}, \quad (4)$$

где  $k^2 = j\omega \mu_a \sigma$ ;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  — круговая частота.

Для анализа зависимости сигналов вихретокового преобразователя от параметров объектов и режимов контроля используют математические модели в виде витка радиуса  $R_b$  и пренебрежимо малого сечения с переменным током  $I_b$ , размещенного вблизи объекта [7]. Решая уравнения (3) или (4) с соответствующими граничными условиями, находим интегральные выражения для  $H$  или для  $A$  в виде  $A = A_0 + A_{\text{вн}}$ , где  $A_{\text{вн}}$  — вносимая в преобразователь составляющая  $A$ , обусловленная реакцией объекта. Для перехода к комплексной ЭДС  $E$ , вносимой в измерительную обмотку малого сечения за счет влияния объекта, воспользуемся формулами

$$E = -j\omega w_n \Phi, \quad E = -j\omega w_n l A, \quad (5)$$

считая  $l = 2\pi R_n$ , где  $R_n$  — радиус измерительной обмотки;  $w_n$  — число витков измерительной обмотки. Если возбуждающая обмотка содержит  $w_b$  витков, то в уравнении (5) нужно ввести множитель  $w_b$ .

Из выражений (1)–(5) видно, что для решения задачи определения ЭДС на зажимах измерительной обмотки необходимо решать сложные математические уравнения. При этом за сложными выражениями затухает физический смысл решаемой задачи, что нередко вызывает дополнительные трудности. Это связано с тем, что уравнение (2) закона электромагнитной индукции, на наш взгляд, не имеет в записанном виде самостоятельного значения. Для его применения необходимо использовать уравнение (1), поэтому в представленном виде решение задачи выглядит как единственно возможное. Кроме того, следует отметить, что классические формулы с применением соотношения (2) для описания принципа работы трансформатора, что применимо и для ВТП, дают разительное несоответствие положений теории, данным эксперимента и практики [9]. Это несоответствие состоит в том, что согласно классической теории входное  $U_1$  и выходное  $U_2$  напряжения трансформатора находятся в противофазе, в то время, как результаты опытов свидетельствуют, что между указанными напряжениями нет противофазы. Здесь также следует отметить, что полученные решения уравнений (1)–(5) [7] в виду их сложности трудно применить для расчета вихретоковых преобразователей и особенно многоэлементных. В связи с отмеченным выше, актуальной является проблема разработки инженерных методов расчета вихретоковых датчиков.

По своей сути вихретоковые преобразователи построены на явлении электромагнитной индукции, поэтому для описания принципа работы ВТП достаточно одного уравнения этого закона, записанного в развернутой форме. На наш взгляд, такой фор-

мой является наша формула записи закона электромагнитной индукции [8], имеющая вид

$$\epsilon_n = \frac{A_{\text{стор}}}{q} - \frac{d\Psi}{dt}, \quad (6)$$

где  $\epsilon_n$  — ЭДС индукции;  $A_{\text{стор}}$  — работа сторонних сил по перемещению заряда  $q$  по какому-то замкнутому контуру;  $d\Psi$  — изменение потокосцепления за время  $dt$ .

Применим уравнение (6) для описания электромагнитных процессов в обмотках ВТП. При этом для конкретизации задачи будем иметь в виду накладные преобразователи [6] как наиболее универсальные и распространенные. Для рассматриваемого случая на основе формулы (6) и второго закона Кирхгофа для замкнутых цепей можно записать следующие уравнения. Для возбуждающей обмотки ВТП

$$I_b r_b = \frac{A_{\text{ст}}}{q} - \left[ \frac{d(w_b \Phi_b)}{dt} - \frac{d(w_b \Phi_n)}{dt} - \frac{d(w_b \Phi_{\text{изд}})}{dt} \right], \quad (7)$$

где  $I_b$  — ток в возбуждающей обмотке;  $r_b$  — сопротивление возбуждающей обмотки;  $A_{\text{ст}}$  — работа сторонних сил по перемещению заряда  $q$  по возбуждающей обмотке;  $\Phi_b$  — поток самоиндукции;  $\Phi_n$  — магнитный поток, создающийся измерительной обмоткой;  $\Phi_{\text{изд}}$  — магнитный поток, создающийся контролируемым изделием.

Для измерительной обмотки аналогичное уравнение имеет вид

$$I_n R_n + I_n r_n = \frac{A_{\text{стн}}}{q_n} - \left[ \frac{d(w_n \Phi_n)}{dt} - \frac{d(w_n \Phi_{\text{изд}})}{dt} \right], \quad (8)$$

где  $I_n$  — ток в измерительной обмотке;  $R_n$  — сопротивление нагрузки измерительной обмотки;  $r_n$  — собственное сопротивление измерительной обмотки;  $A_{\text{стн}}$  — работа сторонних сил по перемещению заряда  $q_n$  по измерительной обмотке.

Применим уравнение (6) для контролируемого изделия. При этом будем считать, что в контролируемом изделии под действием сторонних сил создается один виток с током, обуславливающий появление магнитного потока изделия. В этом случае уравнение (6) имеет следующий вид:

$$\epsilon_{\text{изд}} = \frac{A_{\text{стизд}}}{q_{\text{изд}}} - \left[ \frac{d(\Phi_{\text{изд}})}{dt} - \frac{d(\Phi_n)}{dt} \right], \quad (9)$$

где  $\epsilon_{\text{изд}}$  — ЭДС, индуцируемая в контролируемом изделии;  $A_{\text{стизд}}$  — работа сторонних сил по перемещению заряда  $q_{\text{изд}}$  по изделию.

Предлагаемые уравнения (7)–(9) записаны исходя из следующих положений. Если к возбуждающей обмотке ВТП подключить источник с ЭДС  $\epsilon_{\text{ис}}$ , величина которой равна отношению  $A_{\text{стн}}/q$ , то в ней возникает переменный ток  $I_b$ , создающий в сердечнике ВТП переменный магнитный поток  $\Phi_b$ . При этом на возбуждающей обмотке появится ЭДС индукции  $\epsilon_{\text{инд}}$ , которая согласно нашей трактовке закона электромагнитной индукции подсчитывается по формуле

$$\epsilon_{\text{инд}} = \frac{A_{\text{ст1}}}{q} - \left[ \frac{d(w_b \Phi_b)}{dt} - \frac{d(w_b \Phi_n)}{dt} - \frac{d(w_b \Phi_{\text{изд}})}{dt} \right],$$

где  $A_{\text{ст1}}$  — работа сторонних сил по перемещению заряда  $q$  по возбуждающей обмотке ВТП.

Применив к цепи возбуждающей обмотки второй закон Кирхгофа, получим уравнение (7). При этом учтено, что  $I_e r_e = \epsilon_{\text{ис}} + \epsilon_{\text{инд}}$  и  $\frac{A_{\text{ст}}}{q} = \frac{A_{\text{стн}}}{q} + \frac{A_{\text{ст1}}}{q}$ . Будем

рассматривать ВТП, у которого магнитный поток полностью локализован в сердечнике и целиком пронизывает витки возбуждающей и измерительной обмоток, а также возбуждает вихревые токи в контролируемом изделии. Изменение потока в возбуждающей обмотке вызывает появление в контролируемом изделии ЭДС индукции, в измерительной обмотке ЭДС — взаимной индукции, равной отношению  $A_{\text{стн}}/q_n$ , а в возбуждающей — ЭДС самоиндукции, равной  $d(W_b \Phi_b)/dt$ . Если измерительная обмотка, обладающая сопротивлением  $r_n$ , соединена с нагрузкой, имеющей сопротивление  $R_n$ , то в ней появится ток  $I_n$ , который создаст поток  $\Phi_n$ . Так как причиной появления потока  $\Phi_n$  является поток  $\Phi_b$ , то оба потока на основании правила Ленца направлены встречно. В наших уравнениях будем считать, что поток  $\Phi_b$  имеет положительное направление, а поток  $\Phi_n$  — отрицательное. Изменяющийся поток  $\Phi_n$  создаст в возбуждающей и измерительной обмотках, а также в контролируемом изделии соответствующие электродвижущие силы, которые отражены в виде членов  $d(w_b \Phi_n)/dt$ ,  $d(w_n \Phi_n)/dt$  и  $d(\Phi_n)/dt$ . Аналогичным образом изменится поток, возникающий в контролируемом изделии  $\Phi_{\text{изд}}$ . Он создает в возбуждающей и измерительной обмотках соответствующие ЭДС, что учтено в уравнениях (7) и (8) соответствующими членами. Уравнение (9) составлено по аналогии с выражениями (6)–(8).

В связи с тем, что величина отношения  $A_{\text{ст}}/q$  в уравнении (7) равна ЭДС источника  $\epsilon_b$ , подключенного к возбуждающей обмотке, а такая же величина в уравнениях (8) и (9) равна ЭДС наводимой потоком  $\Phi_b$  в измерительной обмотке и равна  $d(w_n \Phi_b)/dt$ , и в контролируемом изделии равна  $d(\Phi_b)/dt$ , то с учетом знаков потоков, а также приняв во внимание, что обмотки намотаны в одну сторону и количества витков  $w_b$  и  $w_n$  являются величинами постоянными и не меняются со временем, уравнения (7)–(9) примут вид

$$I_b r_b = \epsilon_b - \left[ w_b \frac{d(\Phi_b)}{dt} - w_b \frac{d(\Phi_n)}{dt} - w_b \frac{d(\Phi_{\text{изд}})}{dt} \right], \quad (10)$$

$$I_n R_n + I_n r_n = w_n \frac{d(\Phi_b)}{dt} - \left[ w_n \frac{d(\Phi_n)}{dt} - w_n \frac{d(\Phi_{\text{изд}})}{dt} \right], \quad (11)$$

$$\epsilon_{\text{изд}} = \frac{d(\Phi_b)}{dt} - \left[ \frac{d(\Phi_{\text{изд}})}{dt} - \frac{d(\Phi_n)}{dt} \right]. \quad (12)$$

Рассмотрим режим работы ВТП, который чаще всего встречается на практике, когда сопротивление нагрузки измерительной обмотки  $R_n$  стремится к бесконечности, а ток  $I_n$  стремится к нулю. Этот режим возникает, например, при измерении напряжения на измерительной обмотке вольтметром с высоким входным сопротивлением. В этом случае измерительная обмотка не создает магнитного потока, а напряжение на резисторе нагрузки  $R_n$  равно ЭДС

$\epsilon_n$  на измерительной обмотке, поэтому уравнения (10)–(12) принимают вид

$$I_n r_n = \epsilon_n - \left[ w_n \frac{d(\Phi_n)}{dt} - w_n \frac{d(\Phi_{изд})}{dt} \right], \quad (13)$$

$$\epsilon_n = w_n \frac{d(\Phi_n)}{dt} + w_n \frac{d(\Phi_{изд})}{dt}, \quad (14)$$

$$\epsilon_{изд} = \frac{d(\Phi_n)}{dt} - \frac{d(\Phi_{изд})}{dt}. \quad (15)$$

Уравнения (7), (8), а также следующие из них соотношения (10), (11), (13) и (14) описывают электромагнитные процессы собственно в вихретоковом преобразователе, а выражения (9), (12) и (15) — в контролируемом изделии. Так как целью настоящей работы является исследование процессов в ВТП, то мы в дальнейшем будем анализировать только уравнения, ему соответствующие. Рассмотрение же процессов в контролируемом изделии на основе закона электромагнитной индукции является предметом самостоятельных исследований и будет описано отдельно.

Из формулы (14) видно, что для трансформаторных ВТП, имеющих как минимум две обмотки (возбуждающую и измерительную), ЭДС измерительной обмотки зависит от параметров возбуждающего сигнала и определяется первым членом в правой части выражения. Кроме того, ЭДС измерительной обмотки зависит от изменения магнитного потока, создаваемого контролируемым изделием, и определяется вторым членом в правой части выражения (14).

Для параметрических ВТП, содержащих одну возбуждающую обмотку, на наш взгляд, наиболее удобным параметром контроля является ток, потребляемый в цепи возбуждающей обмотки. Как видно из формулы (13), он также зависит как от параметров возбуждающего сигнала, так и от параметров контролируемого изделия.

Как видно из приведенных формул (13), (14), влияние контролируемого изделия на измеряемые параметры ВТП заключается в том, что как в трансформаторных, так и в параметрических ВТП в преобразователь вносится ЭДС, обусловленная реакцией объекта контроля. Эта ЭДС может быть определена по выражениям, полученным в [7].

Рассмотрим более подробно случай использования полученных уравнений (13), (14) для трансформаторных ВТП как наиболее распространенный в практике неразрушающего электромагнитного контроля. Для определения зависимости ЭДС на измерительной обмотке от параметров возбуждающего сигнала и контролируемого изделия, получим из уравнения (13) величину  $d(\Phi_n)/dt$  и подставим её значение в уравнение (14):

$$\epsilon_n = \frac{w_n}{w_b} \epsilon_b - \frac{w_n}{w_b} I_n r_n + 2w_n \frac{d(\Phi_{изд})}{dt}. \quad (16)$$

Из уравнения (16) видно, что использование трансформаторных ВТП более предпочтительно, чем параметрических, так как они обладают большей чувствительностью к параметрам контролируемого изделия. Этот вывод следует из того факта,

что ЭДС, вносимая изделием, входит с коэффициентом 2 в выражение для ЭДС измерительной обмотки (16).

При инженерных расчетах вихретоковых датчиков удобно величины, входящие в уравнения (13), (14) выразить через индуктивности и взаимные индуктивности обмоток ВТП. В связи с этим указанные уравнения преобразуются к следующему виду:

$$I_n r_n = \epsilon_n - L_b \frac{d(I_n)}{dt} + L_{изд б} \frac{d(I_{изд})}{dt}, \quad (17)$$

$$\epsilon_n = L_{вн} \frac{d(I_n)}{dt} + L_{изд и} \frac{d(I_{изд})}{dt}, \quad (18)$$

где  $L_b$  — индуктивность возбуждающей обмотки;  $L_{изд в}$  — взаимная индуктивность контролируемого изделия и возбуждающей обмотки;  $I_{изд}$  — ток, создающийся в изделии;  $L_{вн}$  — взаимная индуктивность возбуждающей и измерительной обмоток ВТП;  $L_{изд и}$  — взаимная индуктивность изделия и измерительной обмотки.

Входящие в выражения (17), (18) индуктивности и взаимные индуктивности обмоток ВТП вводятся исходя из следующих положений. Учтя, что магнитный поток  $\Phi = BS$ , где  $B$  — индукция магнитного поля, а  $S$  площадь поперечного сечения, пронизываемая потоком, а также приняв во внимание зависимость магнитной индукции от тока  $I$  в виде соотношения  $B = \mu_0 \mu \frac{\omega}{l} I$ , где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды;  $l$  — длина соответствующей обмотки ВТП при числе витков  $\omega$ , выразим, например, соотношение  $w_b \frac{d(\Phi_b)}{dt}$  в виде

$$w_b \frac{d(\Phi_b)}{dt} = \mu_0 \mu \frac{w_b^2}{l_b} S_b \frac{d(I_b)}{dt} = L_b \frac{d(I_b)}{dt}, \quad (19)$$

где  $L_b = \mu_0 \mu \frac{\omega_b^2}{l_b} S_b$  — индуктивность возбуждающей обмотки ВТП.

По формулам, аналогичным (19), вводятся взаимные индуктивности, входящие в выражения (17), (18). Необходимые сведения для расчета индуктивностей и взаимных индуктивностей можно найти в справочной книге [10].

## ВЫВОДЫ

Полученные на основе закона электромагнитной индукции выражения (7)–(9), позволяют в наглядной форме представлять характер процессов, протекающих в обмотках вихретокового преобразователя и в контролируемом изделии, и на их основании вести анализ зависимости сигналов ВТП применительно к конкретной ситуации. В частности из анализа полученных выражений следует, что в случае накладных преобразователей применение трансформаторных ВТП более предпочтительно, чем параметрических, так как они обладают большей чувствительностью к параметрам контролируемого изделия. Кроме того, из выражений (7)–(12) видно, что при наличии измерительной обмотки в случае протекания тока по ней, как в случае трансформаторных, так и в случае параметрических ВТП, в

измеряемые величины вносятся дополнительные погрешности. С целью их устранения необходимо стремиться к уменьшению величины тока в измерительной обмотке, для чего следует применять измерительные приборы с высоким входным сопротивлением.

На основе полученных выражений, ввиду их простоты и наглядности, можно достаточно просто произвести расчет вихретоковых датчиков и, в частности, многоэлементных.

1. Герасимов В. Г., Ключев В. В., Шатерников В. Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 272 с.
2. Дорофеев А. Л. Электроиндуктивная дефектоскопия. — М.: Машиностроение, 1967. — 305 с.
3. Дорофеев А. Л. Индукционная структуроскопия. — М.: Энергия, 1973. — 197 с.

4. Справочное пособие по неразрушающим методам контроля / Пер. с нем. под ред. Мак-Мастера. — М.: Энергия, 1975. — 386 с.
5. Гейзер А. А. Электромагнитное диагностическое устройство на основе аналогоцифрового преобразователя // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 2. — С. 42–46.
6. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / В. Г. Герасимов, Ю. А. Останин, А. Д. Покровский и др. — М.: Энергия, 1978. — 216 с.
7. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий / Справ. Под ред. Ключева В.В. 2 изд. — М.: Машиностроение, 1986. — Том 2. — 352 с.
8. Гейзер А. А. Использование некоторых выражений закона электромагнитной индукции // Электричество. — 1996. — № 10. — С.73–76.
9. Китаев А. В. Причины спора по описанию поведения трансформатора // Технічна електродинаміка. — 1998. — № 3. — С. 74–76.
10. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. — Л.: Энергия, 1970. — 416 с.

Приазовский гос. техн. ун-т,  
Мариполь

Поступила в редакцию  
10.01.2001

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ**  
**ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ ИМ. Л.В.ПИСАРЖЕВСКОГО**  
**ГП «КОЛОРАН»**

**МАТЕРИАЛЫ «ИФХ-КОЛОР»**

1. Наборы материалов для цветной и люминесцентной дефектоскопии.
2. Комплекты «МАГЭКС» для магнитно-порошкового контроля с намагничивающим устройством на постоянных магнитах.
3. Проявители течей испытательных и рабочих сред.
4. Средства контроля пористости защитных покрытий.
5. Средства очистки и защиты металлических поверхностей от ржавчины.
6. Герметики различного назначения.
7. Силиконовая смазка, лако-красочные и др. материалы для ремонта и консервации металлических и бетонных конструкций.

**НАЗНАЧЕНИЕ**

- ВИЗУАЛЬНОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ И ЛИКВИДАЦИЯ ДЕФЕКТОВ
- ПОДГОТОВКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
- ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ И КОНСЕРВАЦИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

**МАТЕРИАЛЫ «ИФХ-КОЛОР» ЭТО:**

- ✓ пожаробезопасность;
- ✓ экологическая чистота и отсутствие высокотоксичных компонентов;
- ✓ высокая производительность;
- ✓ простота, надежность и безопасность технологии, успешно апробированной на ведущих предприятиях аэрокосмического комплекса, энергетики, судостроения, химического и нефтяного машиностроения.

По вопросам поставки материалов, проведения технологических консультаций и оказания сервисных услуг просим обращаться по адресу:

**03028, УКРАИНА, г.Киев-28, пр-т Науки, 31**  
**ГП «КОЛОРАН» ИФХ НАН Украины**  
**факс: 265-95-29; 265-65-67.**

## **КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ и ВЫСТАВОК**

**2001**

### **АПРЕЛЬ**

3–6: Международная конференция и выставка «Проблемы обеспечения качества в сварочном производстве», ИЭС им.Е.О.Патона, Киев, Украина

24–27: Пятая конференция-выставка Ассоциации «ОКО»: «Неразрушающий контроль-2001», ИЭС им.Е.О.Патона НАНУ, Киев, Украина

24–26: COFREND 2001 NDT Congress: «NDT and Corrosion», Reims, France

### **МАЙ**

21–23: Annual Conference of the German Society for NDT, Berlin, Germany

23–25: Третья международная конференция «Диагностика и контроль трубопроводов», Москва, Россия

### **ИЮНЬ**

XVII Петербургская конференция «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций», пос. Репино, Санкт-Петербург, Россия

20–26: International Simposium «NDT in Progress», Trest, Czech Republic

### **СЕНТЯБРЬ**

10–14: 9-й Ежегодный семинар-выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Ялта, Украина

17–21: 10th Asia-Pasific Conference on Non-Destructive Testing, Brisbane, Australia

18–20: 40th Annual British Conference on NDT: NDT 2001, Coventry, UK

24–26: First Middle East NonDestructive Testing Conference and Exhibition - Nondestructive Testing Technologies for Improving Safety and Reliability of the Oil and Petrochemical Industries, Bahrain

### **НОЯБРЬ**

14–16: 3rd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Seville, Spain

**2002**

### **ИЮНЬ**

17–21: 8-я Европейская конференция по неразрушающему контролю, Барселона, Испания

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО УСЛОВИЯМИ ПРОЧНОСТИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Ю. В. РАДЫШ, А. С. КИРЕЕВ

Безаварийная эксплуатация резервуаров для хранения нефти поддерживается в соответствии с действующей нормативно-технической документацией посредством выполнения регламента либо ремонтов [1], либо обследований [2–4]. Регламент ремонтов резервуаров обязателен к выполнению для предприятий нефтеперерабатывающих и нефтехимических отраслей промышленности, тогда как регламент обследований — для предприятий, обеспечивающих транспортировку и хранение нефти. Программа текущего, среднего и капитального ремонтов предусматривает проведение ревизий при подготовке резервуаров к ремонту с целью составления дефектной ведомости, на основании которой выполняется этот ремонт. Программа частичного и полного обследований предусматривает оценку технического состояния резервуаров. На основании соответствия (либо несоответствия) качественных и количественных результатов контроля технического состояния требованиям нормативно-технической документации может быть принято одно из следующих возможных решений:

- продолжить эксплуатацию без ограничений (вплоть до очередного обследования);
- продолжить эксплуатацию с ограничением срока либо технологических режимов нагружения;
- выполнить ремонтно-восстановительные работы;
- демонтировать и при необходимости заменить металлоконструкции.

Таким образом, подчиненность регламенту обследований представляется наиболее ответственным и достоверным средством оценки текущего состояния и прогнозирования надежности резервуаров как условия обоснованного принятия решения по обеспечению их безаварийной эксплуатации. Однако и при этом подходе возникают проблемы, требующие совершенствования нормативной и технической базы диагностики состояния, а также прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти [5, 6]. В частности, как при продлении эксплуатации с ограничением технологических режимов, так и при введении резервуаров в эксплуатацию после ремонта возникает необходимость установить допустимый условиями прочности уровень наполнения резервуаров. Действующими нормативными документами [1–4] предусматривается возможность оценки этого уровня при расчете прочности резервуара по предельному состоянию в соответствии с нормами проектирования строительных конструкций [7–9] на основе следующего критерия: *максимальное кольцевое напряжение  $\sigma_k$  не должно превышать нормативно допустимое  $[\sigma]$ , т. е.*

© Ю. В. Радыш, А. С. Киреев, 2001

$$\max \sigma_k \leq [\sigma] R_y \gamma_c, R_y = R_{yn} / \gamma_m, \quad (1)$$

где  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы пояса;  $\gamma_m$  — коэффициент надежности материала;  $R_{yn}$ ,  $R_y$  — соответственно нормативное (минимальное значение предела текучести) и расчетное сопротивление.

Кольцевые напряжения в стенке резервуара на высоте  $X$  от дна без учета сопряжения поясов различной толщины равны

$$\sigma_k = pR / t, \quad (2)$$

где  $p = n_1 \rho g (H_{np} - X)$  — гидростатическое давление;  $n_1$  — коэффициент перегрузки для гидростатического давления;  $\rho$  — плотность продукта;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения,  $H_{np}$  — уровень наполнения продуктом;  $t$  — толщина стенки в данной точке;  $R$  — радиус кривизны срединной поверхности стенки резервуара.

При расчетах стенка резервуара рассматривается как тонкостенная безмоментная цилиндрическая оболочка, составленная из поясов, различающихся по толщине и материалу листового проката. Оценка выражения (2) имеет неудовлетворительный характер в области сопряжения поясов между собой и с дном вследствие разрывности функций кольцевых напряжений и радиальных перемещений. Указанный недостаток может быть устранен на основании выполнения условий непрерывности перемещений и углов поворота в этих сопряжениях одновременно с определением перерезывающих сил и крутящих моментов согласно методике, изложенной в [10]. Однако нормативное требование выражения (1) оказывается совершенно неприемлемым для оценки уровня наполнения резервуара, геомет-

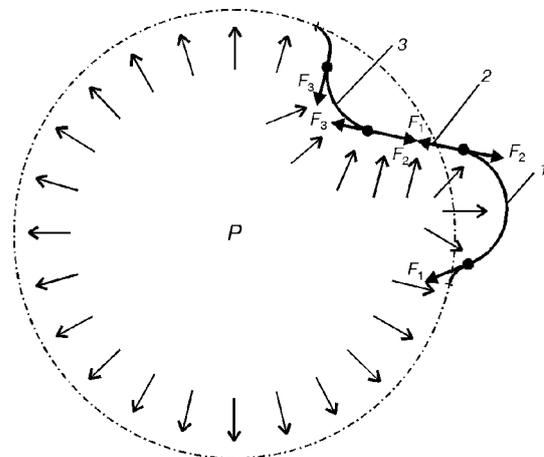


Рис. 1. Силы  $F_1$ – $F_3$ , приложенные к различным участкам цилиндрического резервуара, находящегося под действием внутреннего давления  $P$ ; 1–3 — номера участков.

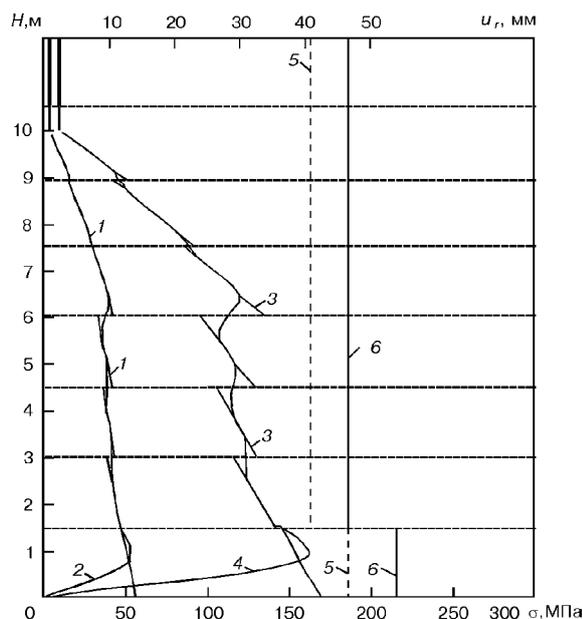


Рис. 2. Перемещения (1, 2) и кольцевые напряжения (3, 4) стенки резервуара при уровне нефти 10 м с коэффициентом перегрузки 1,1 и избыточном давлении 2 кПа с коэффициентом перегрузки 1,2: 1, 3 – без учета стыка; 2, 4 – с учетом стыка; 5 – напряжения допустимые [9]; 6 – то же [8].

рическая форма стенки которого имеет отклонения от идеальной формы кругового цилиндра.

Рассмотрим равновесие части стенки цилиндрического резервуара, находящегося под действием внутреннего давления. Часть стенки, имеющая радиальное отклонение от идеальной формы кругового цилиндра, изображена на рис. 1 (вид сверху). Она состоит из трех участков  $i = 1, 2, 3$ , кривизна  $k_i = 1/R_i$  которых с учетом знака составляет соответственно  $k_1 > 0, k_2 = 0, k_3 < 0$ . Из условий равновесия, определяющих согласно выражению (2) кольцевые напряжения каждого из участков, следует, что участок 1 находится в состоянии растяжения с напряжениями  $\sigma_{к1} > 0$ , участок 3 – в состоянии сжатия с напряжениями  $\sigma_{к3} < 0$ . При этом участок 2 с неопределенными по формуле (2) напряжениями вообще не может находиться в равновесии, поскольку приложенные к нему силы со стороны растянутого участка 1 и сжатого участка 3 действуют в одну и ту же сторону. В действительности рассматриваемая часть стенки резервуара указанной геометрической формы и каждый из ее участков находятся в равновесии, что противоречит установленному по выражению (2) распределению кольцевых напряжений. Следовательно, исключается возможность оценки допустимого уровня наполнения резервуара реальной геометрической формы на основе нормативного требования критерия (1).

Данное обстоятельство требует расчета напряженно-деформированного состояния резервуара по более полной моментной теории оболочек. При этом возникает проблема оценки допустимого уровня наполнения резервуара реальной геометрической формы.

В соответствии с действующими нормативными требованиями, принципами проектирования и рас-

чета стальных вертикальных резервуаров [7–9, 11, 12] можно предложить три подхода к оценке допустимого уровня прочности уровня наполнения резервуаров.

*Первый* (существующий) основан на расчете кольцевых напряжений в стенке резервуара идеализированной геометрической формы согласно уравнению (2). Эти напряжения при наполненном резервуаре не должны превышать допустимых, определенных критерием (1).

*Второй* подход базируется на расчете полных (мембранных и изгибных) эквивалентных напряжений в стенке резервуара реальной геометрической формы согласно формуле

$$\sigma_{экив} = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)^{0,5}, \quad (3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – главные напряжения двумерного напряженного состояния стенки, которые при наполненном резервуаре не должны превышать допустимых значений, определенных следующим критерием:

$$\max \sigma_{экив} \leq [\sigma] = R_y, R_y = R_{yn}/\gamma_m. \quad (4)$$

*Третий* подход основан на разделении полных напряжений на мембранные и изгибные в стенке резервуара реальной геометрической формы. При этом мембранные определяются действующими в срединной поверхности стенки эквивалентными напряжениями по формуле (3)

$$\sigma_m = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)^{0,5}, \quad (5)$$

Изгибные, равные нулю в срединной поверхности, достигают на граничных поверхностях стенки наибольшего значения

$$\sigma_n = 6M/h^2, \quad (6)$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $h$  – толщина стенки.

Данные напряжения при наполненном резервуаре не должны превышать допустимых значений, определяемых следующими критериями:

$$\max \sigma_m[\sigma] \leq R_y\gamma_{cm}, R_y = R_{yn}/\gamma_m, \quad (7)$$

$$\max \sigma_n[\sigma] \leq R_y\gamma_{cn}, R_y = R_{yn}/\gamma_m, \quad (8)$$

где  $\gamma_{cm}$  и  $\gamma_{cn}$  – условие работы соответственно при мембранных и изгибных напряжениях.

Коэффициенты условий работы в неравенствах (1), (7) принимаются согласно выражению [7] равными

$$\begin{aligned} \gamma_c = \gamma_{cm} = 0,6 \text{ (для нижнего пояса стенки),} \\ \gamma_c = \gamma_{cn} = 0,7 \text{ (для остальных поясов).} \end{aligned} \quad (9)$$

В неравенстве (8) коэффициент условий работы принимается согласно публикациям [7, 9]

$$\gamma_{cn} = 1,2. \quad (10)$$

Использование одних и тех же коэффициентов условий работы в критериях (1) и (7) обусловлено тем, что при исправлении геометрической формы стенки резервуара мембранные напряжения, вызванные гидростатической нагрузкой, переходят в кольцевые. Использование в критерии (8) коэффициента условий работы, превышающего единицу,

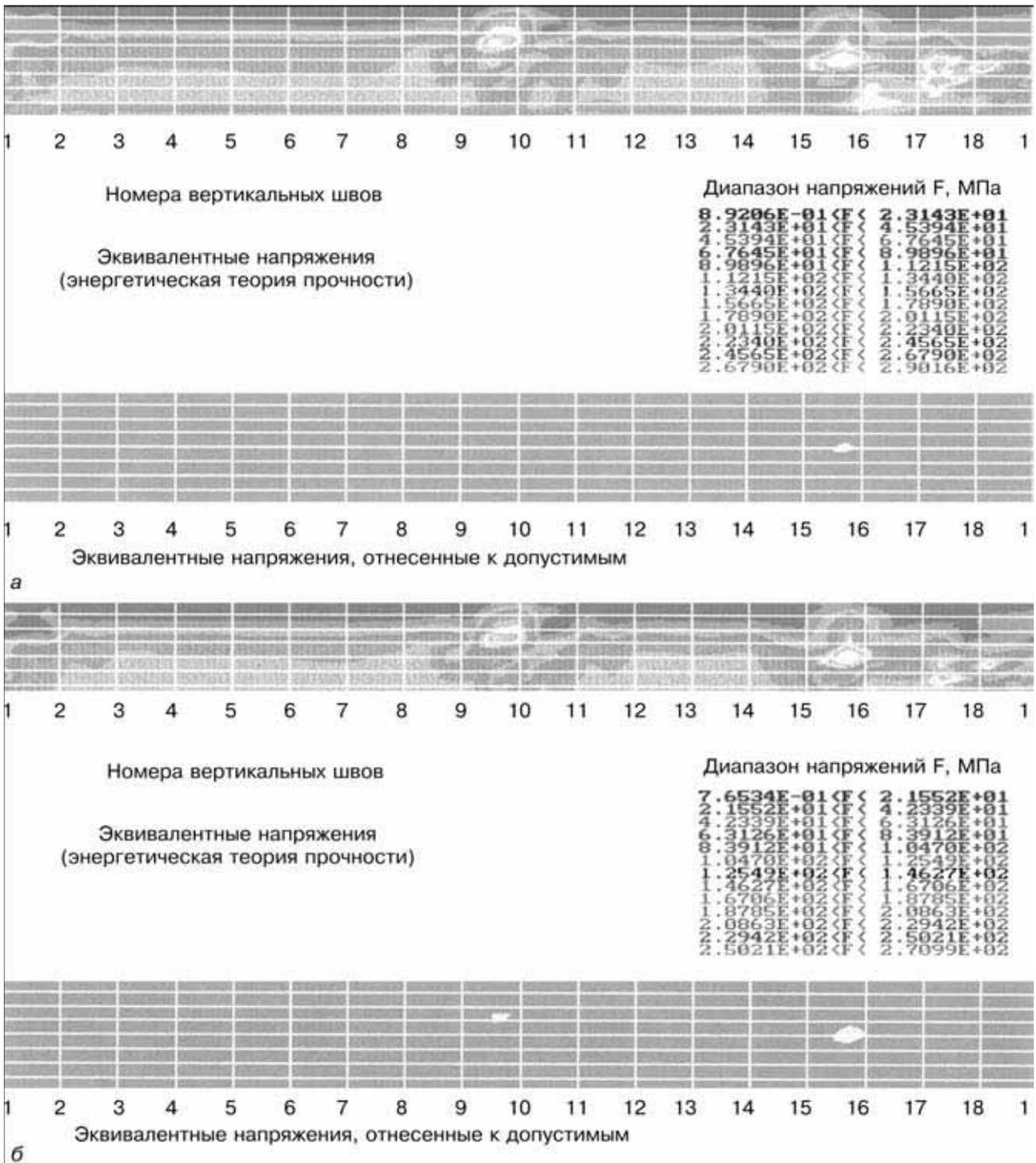


Рис. 3. Напряженное состояние стенки резервуара при уровне нефти 10 м: а — мембранные и изгибные, б — мембранные напряжения.

свидетельствует о допустимости пластических шарниров при деформировании стенки резервуара в условиях эксплуатации и гидравлических испытаний [12]. Последнее может быть использовано как возможный метод исправления геометрической формы резервуара в ходе гидравлических испытаний.

Из указанных трех подходов оценки допустимого условиями прочности уровня наполнения резервуара предпочтение следует отдать тому, для которого допустимый уровень окажется наименьшим.

Для сравнения этих подходов на рис. 2, 3 приведено распределение осесимметричных кольце-

вых, полных (мембранных и изгибных) и мембранных напряжений в стенке одного из обследованных резервуаров РВС-10000, геометрическая форма которой показана на рис. 4. Во всех случаях в качестве внешней нагрузки рассматривалось внутреннее гидростатическое давление на стенку резервуара при уровне наполнения нефтью 10 м. Сравнительный анализ использования критериев (1), (4), (7) свидетельствует о правомерности оценки допустимого уровня наполнения резервуара на основании последнего из изложенных подходов с использованием критериев (7), (8). Следует отметить, что для рас-

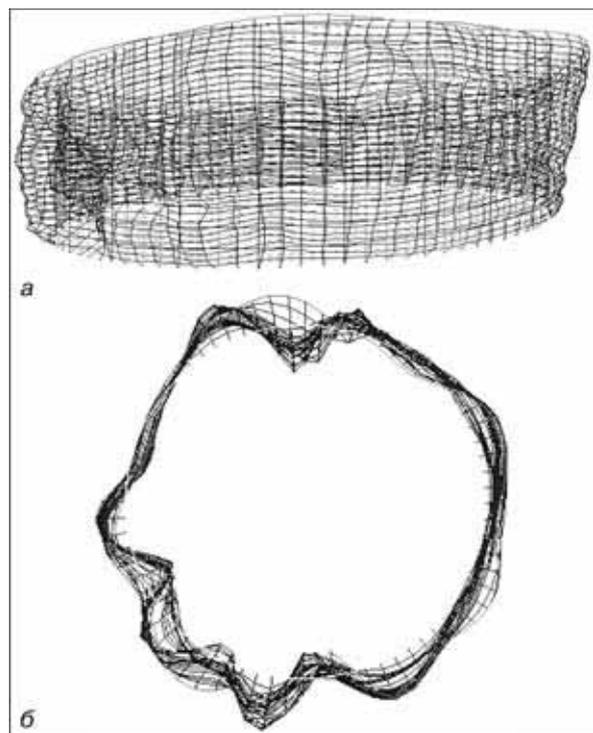


Рис. 4. Геометрическая форма стенки резервуара: а — изометрия; б — вид сверху.

чета напряженно-деформированного состояния резервуара неидеальной геометрической формы требуется применение численных методов. Приведенные на рис. 3, 4 результаты расчета полных и мембранных напряжений получены при решении задачи упругого деформирования стенки резервуара на основе метода конечных элементов.

Корп. «Укрмонтажспецстрой», Техн. комитет «Спецмонтаж», Киев

Поступила в редакцию  
30.11.2000

УДК 620.13.38

## КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ С МНОГОСЛОЙНОЙ СТЕНКОЙ. 1. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПЕРЕНОСА ПО МЕЖСЛОЙНЫМ ЗАЗОРАМ

Ю. Н. ПОСЫПАЙКО

**Общая характеристика проблемы.** Разработка, изготовление и эксплуатация изделий с многослойной стенкой — аппаратов химических производств, трубопроводов, резервуаров и т. п. вызвано растущими требованиями к повышению производительности, мощности, надежности и безопасности оборудования высокого давления [1–3].

Особенностью технологии технического контроля таких изделий является необходимость испыта-

1. *ИТН-93*. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. — Волгоград: Минтопэнерго России, 1995. — 188 с.
2. *Правила* технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. — М.: Недра, 1988. — 269 с.
3. *Правила* технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту (доповнення та зміни). — Київ. — 1997. — 121 с.
4. *РД-08-95-95*. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М.: Госгортехнадзор России, 1995. — 34 с.
5. *Тенденции* в развитии комплексных требований к резервуарам для хранения нефти (зарубежный опыт) / А. М. Бородовский, Б. М. Медник, Ю. В. Радыш, А. А. Цвигун. — Киев: Основа, 2000. — 208 с.
6. *Радыш Ю. В., Киреев А. С.* Совершенствование базы диагностики технического состояния и прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 38–47.
7. *СНиП 2.09.03-85*. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Сооружения промышленных предприятий. — М.: Госстрой, 1986. — 56 с.
8. *СНиП 11-23-81\**. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Стальные конструкции. М.: Госстрой, 1990. — 95 с.
9. *ВБН В.2.2-58.2-94*. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти та нафтопродуктів з тиском не вище 93,3 кПа. — Київ: Держ. комітет України по нафті і газу, 1994. — 98 с.
10. *Тимошенко С. П., Войтовский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. — М.: Наука, 1966. — 635 с.
11. *СНиП 2.01.07-85*. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. — М.: Госстрой, 1987. — 36 с.
12. *Лессиг Е. Н., Лилеев А. Ф., Соколов А. Г.* Листовые металлические конструкции. — М.: Госстройиздат, 1970. — 488 с.

ния на герметичность внутренних сварных соединений [4]. Это вызвано возможностью возникновения в процессе сварки сквозных дефектов во внутренних сварных швах, что может привести к проникновению рабочего, хранящегося или транспортируемого вещества из полости изделия в полость межслойных зазоров многослойной стенки. Накопление его там может стать причиной нарушения нормальной работы изделия или его разрушения.

© Ю. Н. Посыпайко, 2001

Обнаружение сквозных дефектов в сварных соединениях изделий с многослойной стенкой возможно при существовании газопереноса по межслойным зазорам. Для определения потока газа через межслойные зазоры необходимо знать их форму и геометрические размеры. Однако реальное строение межслойного зазора установить крайне сложно. Для расчета характеристик контакта двух необработанных металлических поверхностей используют статистические методы, позволяющие описать деформацию усредненных выступов и учесть законы распределения на поверхности выступов, волн и макрореконструкций формы. Необходимо создание модели зазора, которая могла бы с заданной точностью описать и определить его параметры в процессе контакта поверхностей.

Определив параметры зазоров, необходимо смоделировать механизм газопереноса через межслойные зазоры, что позволит рассчитать величину потока газа в зазоре, скорость его заполнения и т. д. Таким образом, задача разработки технологии контроля герметичности сварных соединений изделий с многослойной стенкой включает в себя следующие этапы:

- анализ сквозных дефектов сварных соединений;
- анализ факторов, определяющих параметры межслойных зазоров;
- расчет сближения двух контактирующих поверхностей в межслойном зазоре;
- моделирование, расчет и исследование газопереноса по межслойным зазорам;
- анализ и выбор способов контроля герметичности сварных соединений;
- исследование выбранных способов контроля герметичности сварных соединений;
- разработка технологического оборудования для контроля герметичности.

**Сквозные дефекты сварных соединений.** В процессе сварки, как и в других технологических процессах обработки материалов, практически всегда возникают различные дефекты. Образование дефектов определяется характером взаимодействия жидкого и твердого металлов, а также металлов с газами и шлаками. В различных участках зоны сварки одновременно протекает целый ряд процессов: нагрев, плавление, испарение, кристаллизация и охлаждение металла, переход веществ из одной фазы в другую, перераспределение веществ внутри фазы, взаимодействие различных компонентов и т. д. Многообразие причин, в той или другой мере определяющих образование дефектов в сварном соединении, подробно рассмотрены в литературе [5–7].

Показано, что при сварке плавлением в результате протекания различных физических и химических процессов всегда есть условия для образования дефектов (пор, неметаллических включений, трещин и др.) в сварном соединении или создания факторов, способствующих образованию дефектов (химическая и физическая неоднородность, структурные изменения и др.).

Особенно склонны к образованию дефектов сварные соединения, выполненные в многослойных изделиях. Наличие воздуха, продуктов коррозии и различных загрязнений в межслойных зазорах,

контактирующих при сварке с жидким металлом, может при неблагоприятных условиях привести к образованию в швах дефектов, в том числе, сквозных. Они особенно нежелательны во внутренних швах, так как через них транспортируемый или хранящийся продукт будет проникать в межслойные зазоры, накапливаться там, и может стать причиной нарушения нормальной работы изделия. На рис. 1 показано расположение наиболее характерных сквозных дефектов в кольцевых стыковых и продольных нахлесточных сварных соединениях многослойных труб (поры, непровары, трещины) по их сечению (а) и поверхности (б).

На рис. 2 показаны макрошлифы кольцевых стыковых и продольных нахлесточных сварных соединений со сквозными дефектами. Как видно из рисунков, дефекты зарождаются возле межслойного зазора и пронизывают сварной шов.

**Факторы, определяющие параметры межслойных зазоров.** Факторами, определяющими форму и размеры межслойных зазоров, являются: силовое воздействие на многослойную стенку (механическое экспандирование, гидравлическое давление и др.), физико-механические свойства поверхностного слоя (предел текучести материала, модуль упругости, твердость, микротвердость и др.), рельеф поверхностного слоя (макрореконструкции формы, волнистость и шероховатость) и конструктивные особенности изделия (тип навивки, расположение сварных швов и др.). Схема их взаимодействия приведена на рис. 3.

Силовое воздействие на многослойное изделие предусмотрено, как правило, технологией его изготовления. Наибольшее силовое воздействие оказывает экспандирование — «растяжка» слоев с целью увеличения контактной жесткости. Силовое воздействие ведет к сближению поверхностей и изме-

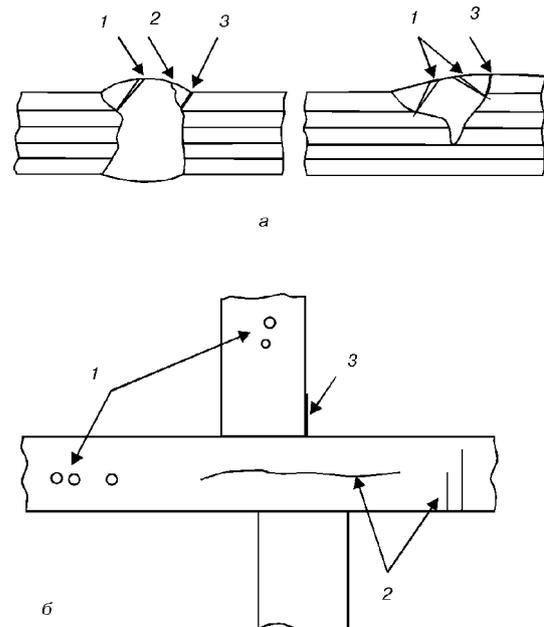


Рис. 1. Расположение наиболее характерных сквозных дефектов в кольцевых стыковых и продольных нахлесточных сварных соединениях многослойных труб: а — по сечению швов, б — по поверхности швов (1 — поры, 2 — трещины, 3 — несплавление по кромке).

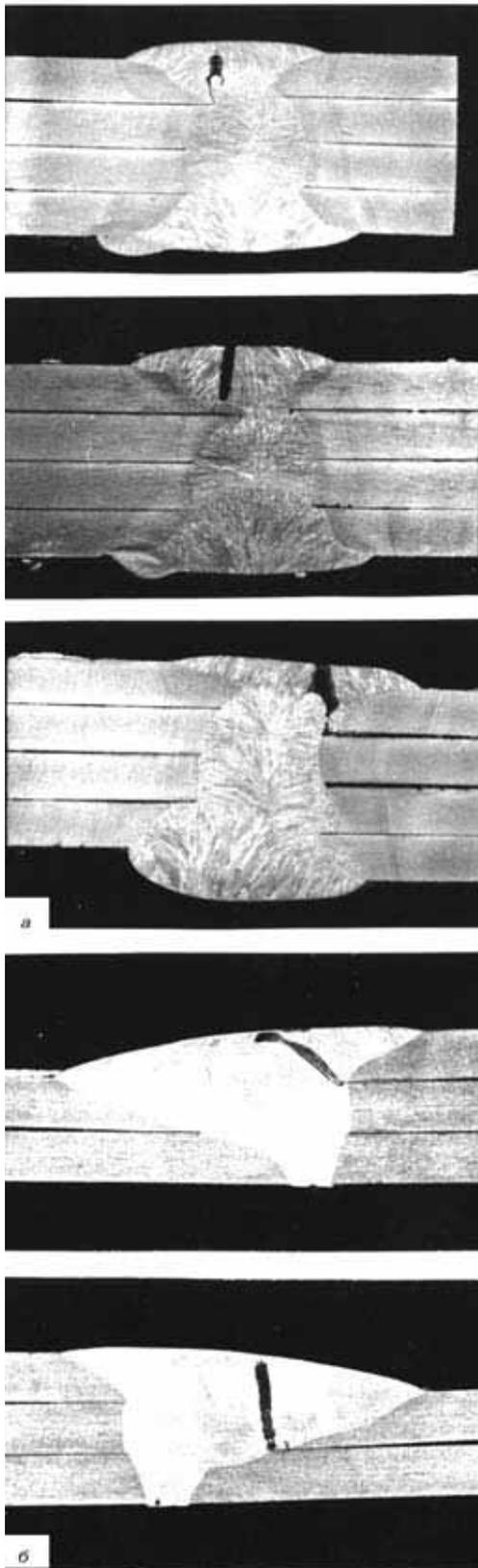


Рис. 2. Наиболее характерные сквозные дефекты кольцевых стыковых (а) и продольных нахлесточных (б) сварных соединений многослойных труб.

няет конструктивные параметры, например, увеличивает площадь контакта поверхностей. Конструктивные особенности изделия, физико-механические свойства поверхностного слоя и рельеф поверхнос-

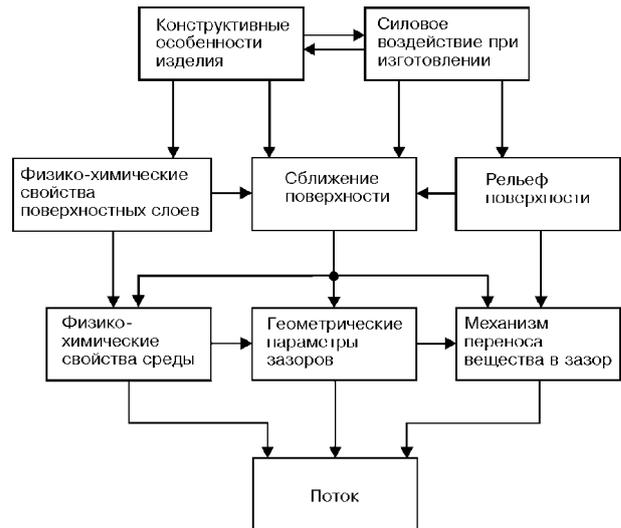


Рис. 3. Схема взаимодействия факторов, влияющих на перенос газа по межслойным зазорам.

ти в свою очередь влияют на эффективность силового воздействия и сближения поверхностей.

В общем виде многослойное изделие как объект исследования можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 4, на которой показаны три группы параметров:

а) управляющие входные параметры  $X$ : действующая приложенная сила  $N$ , отклонения  $W$  формы поверхности, волнистость  $H$  поверхности, шероховатость  $R$  поверхности, средний шаг шероховатости  $S_m$ , входное давление  $p$  испытательного вещества, температура  $T$  испытательного вещества;

б) существующие параметры  $Y$ : номинальная площадь  $A_a$  контакта, предел прочности  $\sigma$ , металла, коэффициент Пуассона  $\mu$ , модуль упругости металла  $E$ , коэффициент вязкости  $\eta$  испытательного вещества;

в) выходной параметр состояния  $Z$ : поток  $Q$  газа через межслойный зазор.

Управляющие параметры  $X$  представляют собой независимые переменные, которые можно изменять с целью управления выходными параметрами объекта. Существующие параметры  $Y$  характеризуют объект исследования в целом. Они практически не изменяются в рамках данного объекта и конкретного эксперимента. К выходным параметрам состояния  $Z$  относятся контролируемые или вычисляемые параметры, характеризующих состояние объекта. В нашем случае это — поток  $Q$  газа через межслойный зазор.

Одной из основных задач анализа является выявление взаимосвязей между входными и выходными параметрами объекта и представление их в количественной форме. Такое математическое отображением наиболее существенных взаимосвязей между параметрами объекта позволяет получить информацию о процессах, протекающих в объекте, а также использовать ее для управления объектом с целью поиска оптимальных условий.

**Расчет сближения двух контактирующих поверхностей в межслойном зазоре.** Параметры межслойных зазоров многослойных изделий определялись нами расчетным путем на основе теории

контактного взаимодействия поверхностей. Вопросы контактного взаимодействия двух поверхностей имеют весьма широкое приложение. Они учитываются при оценке трения и контактной жесткости, при определении электро- и теплопроводности контакта, при расчетах площади соприкосновения тел и изучении массопереноса по межповерхностным зазорам [8–12].

Теория контактного взаимодействия исходит из того, что реальная поверхность металла имеет отклонения от номинальной поверхности. Неровности поверхности разделяют на макроотклонения формы, волнистость и шероховатость.

Поверхность листового проката, из которого изготавливаются стенки многослойных изделий, характеризуется нерегулярным микрорельефом, отличающимся значительной неоднородностью по ширине и длине полос. Неоднородность шероховатости и волнистости сочетается со сравнительно высоким макроотклонением формы (коробоватостью, серповидностью и т.д.)

Фактическая площадь контакта  $A_r$  двух реальных поверхностей состоит из отдельных дискретных площадок, расположенных на разных высотах, под разными углами, с разной степенью упругих и пластических деформаций металла.

Для описания физической картины контактного деформирования микрорельефа двух однородных поверхностей при их сближении под воздействием нагрузки  $N$  необходимо учитывать:

- распределение выступов по высоте  $n_r(y)$ ;
- площадь сечения выступов на уровне  $y_{н.л}$ ;
- вероятность встречи пары выступов двух поверхностей;
- вероятность нахождения выступа в слое  $dn_2$ ;
- распределение по высоте различных видов микронеровностей;
- базовую длину и целый ряд других величин.

Это приводит к достаточно громоздким теоретическим выражениям для контактного сближения поверхностей с микронеровностями под действием приложенной нагрузки, расчет которых возможен только на ЭВМ.

Нормальное сближение двух поверхностей с одинаковыми механическими свойствами поверхностных слоев можно представить в виде равенства

$$y = 2(y_{н.л} + y_{уп}), \quad (1)$$

где  $y_{н.л}$  — пластические контактные деформации поверхностных слоев под действием силы  $N$  контактирующих тел;  $y_{уп}$  — упругие перемещения следующих ниже слоев контактирующих тел.

Опуская здесь описание теоретических расчетов, приведем выражения для инженерного расчета слагаемых в формуле (1):

$$y_{н.л} = [2\pi NR_a H_z W_z / \sigma_t A_a]^{1/3}. \quad (2)$$

$$y_{уп} = \pi c \sigma_t \Sigma_M (1 - \mu^2) y_{н.л}^{1/3} / ER_a, \quad (3)$$

где  $N$  — нагрузка, приходящаяся на номинальную площадь контакта  $A_a$ ,  $R_a$ ,  $H_z$ ,  $W_z$  — параметры шероховатости, волнистости и макроотклонения формы;  $\sigma_t$  — предел текучести металла;  $c$  — коэффи-

циент стеснения,  $c = 2,82$ ;  $S_M$  — средний шаг выступов шероховатости;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль упругости.

Полученные уравнения описывают сближение двух поверхностей многослойного изделия как функцию давления:  $y = f(N/A_a)$ .

Характеристики неровности поверхности прокатанной стальной полосы, используемой для изготовления многослойных изделий, имеют значения: шероховатость  $R_a = 1 \dots 2$  мкм,  $S_m = 1 \dots 5$  мкм; волнистость  $H_z = 5 \dots 20$  мкм; макроотклонения формы  $W_z = 50 \dots 100$  мкм. Прочностные характеристики стальной полосы имеют следующие значения:  $\sigma_t = 600$  МПа,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0,3$ .

Таким образом, зная значения характеристик неровностей поверхности стальной полосы, из которой изготавливается многослойное изделие, и действующие усилия сжатия поверхностей, можно рассчитать сближение контактирующих поверхностей: зависимости  $y = f(N/A_a)$  для различных значений  $R_a$ ,  $S_m$ ,  $H_z$  и  $W_z$ . На рис. 5 представлены зависимости  $y = f(N/A_a)$  для минимальных и максимальных значений  $R_a$ ,  $S_m$ ,  $H_z$  и  $W_z$ .

**Методы расчета потока газа через межслойные зазоры.** Анализ расчетных методов определения потока газа через контакт двух металлических поверхностей позволяет выделить три основных направления:

методы, основанные на расчете потока газа по эмпирическим зависимостям;

методы, основанные на расчете потока газа по уравнениям для гладких (плоских) приведенных каналов высотой  $\delta$ ;

методы, основанные на использовании пористой модели стыка двух металлических поверхностей, обладающих определенной шероховатостью, волнистостью и макроотклонением формы, с применением законов фильтрационного движения газа.

*Первое направление* использует эмпирические зависимости типа  $Q = f(q, p, l)$ , характеризующие перенос газа через стык двух поверхностей. Для этого необходимо знать значения удельных нагрузок  $q$  на контролируемые поверхности, давление  $p$

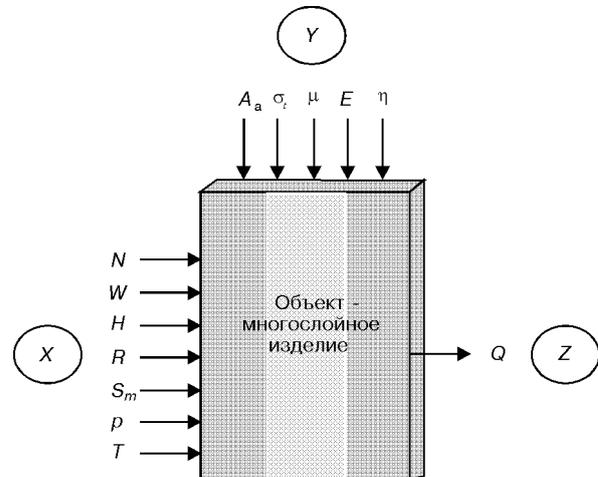


Рис. 4. Структурная схема объекта исследования для составления модели взаимосвязей между входными и выходными параметрами: X — управляющие входные параметры; Y — существующие параметры; Z — выходной параметр состояния.

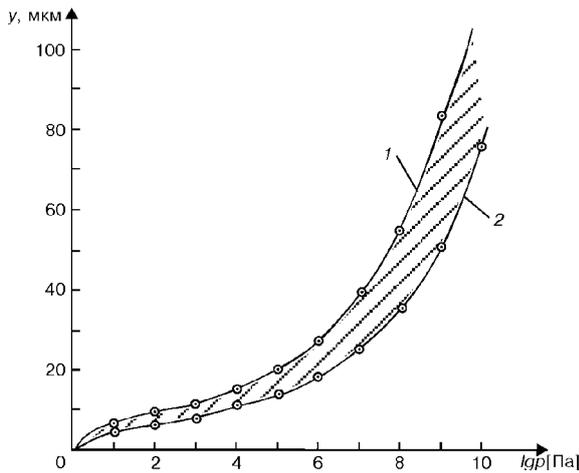


Рис. 5. Зависимость сближения  $y$  двух поверхностей многослойного изделия под действием силы сжатия: 1 — максимальные значения  $R_{\sigma}, S_m, H_2, W_2$ ; 2 — их минимальные значения.

газа, перетекающего по зазору, а также размеры и характеристики состояния поверхности.

Применение эмпирических зависимостей для прогнозирования переноса газа через стык контактирующих поверхностей возможно только для приближенной оценки потока в хорошо изученных случаях, например, в случае оценки герметизации трубопроводной арматуры [13, 14]. Попытки создать эмпирическую зависимость для потока газа через стык контактирующих необработанных металлических поверхностей большого размера не дали положительных результатов. Поэтому метод расчета нами дальше не рассматривается.

Второе направление использует расчетную модель на основании уравнения движения вязкой несжимаемой среды, граничным условием для которого является равенство нулю скорости движения на поверхности, ограничивающей поток [15, 16].

Решение уравнения для этих условий, полученное для потока газа в вязкостном режиме течения (уравнение Пуазейля) через зазор шириной  $h$ , высотой  $\delta$  и длиной  $l$  при перепаде давления между концами зазора ( $p_2 - p_1$ ), имеет вид

$$Q_v = h\delta^3(p_2 - p_1) / 24\eta l, \quad (4)$$

где  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости газа, Па·с.

Решение уравнения, полученное для потока газа в молекулярном режиме течения (уравнение Кнудсена) при тех же условиях имеет вид

$$Q_M = 2h\delta^2 v_{cp} (p_2 - p_1) / 3l, \quad (5)$$

где  $v_{cp} = (8RT / \pi M)^{1/2}$  — средняя скорость молекул;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) =  $8,31 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·град);  $T$  — абсолютная температура, град;  $M$  — молекулярная масса газа, кг/моль.

Между молекулярным и вязкостным течением нет четкой границы. В большом диапазоне давлений существует так называемое промежуточное течение, для которого поток можно определить по формуле (обобщенное уравнение Кнудсена)

$$Q_{\Pi} = Q_v + zQ_M, \quad (6)$$

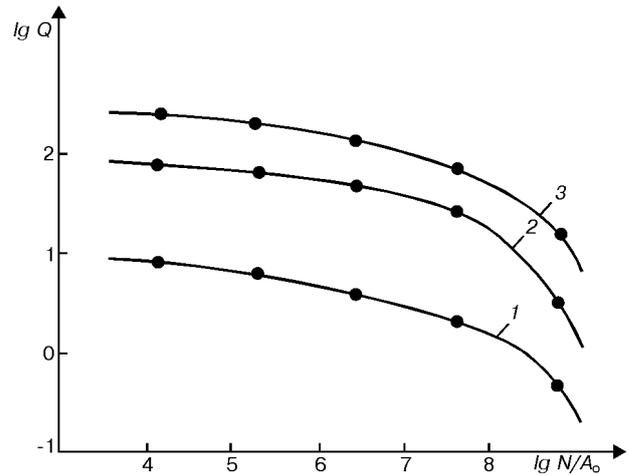


Рис. 6. Зависимость потока  $Q$  газа через щелевидный зазор от силы сжатия  $N/A_0$  поверхностей, образующих этот зазор: 1 —  $Q'_{\max}$ , при  $P_2 = 2 \cdot 10^3$  Па; 2 —  $Q''_{\max}$ , при  $P_2 = 6 \cdot 10^3$  Па; 3 —  $Q'''_{\max}$ , при  $P_2 = 10 \cdot 10^3$  Па.

где  $z$  — сложного вида эмпирическая функция  $z(\delta, p)$ , введенная Кнудсенем для приведения расчетной зависимости в соответствие с наблюдавшейся им экспериментально. При переходе от вязкостного течения к молекулярному коэффициент  $z$  меняется от 0,81 до 1,0 и в практике расчетов часто принимают его равным 0,9.

Границы между режимами течения определяются соотношениями длины свободного пробега молекулы  $\lambda$  к характерному размеру  $\delta$  полости, по которой протекает газ (для зазора это его высота). Длина свободного пробега определяется по формуле:

$$\lambda = kT / 1,4\pi d^2 p_{cp}, \quad (7)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $d$  — диаметр молекулы;  $p_{cp}$  — среднее давление в зазоре,  $p_{cp} = (p_1 + p_2) / 2$ .

Промежуточное течение газов характерно для диапазона  $1/3 \geq \lambda/\delta \geq 5 \cdot 10^{-3}$ . При  $\lambda/\delta > 1/3$  — течение молекулярное, при  $\lambda/\delta < 5 \cdot 10^{-3}$  — вязкостное. Для воздуха при  $T = 293$  °К граница промежуточного течения  $0,02 \leq p_{cp}\delta \leq 1,33$ ; при  $p_{cp}\delta < 1,33$  — течение вязкостное, при  $p_{cp}\delta < 0,02$  — молекулярное.

При переносе газа по межповерхностным зазорам принято считать, что потоки, превышающие  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>Па/с — вязкостные, меньше  $10^{-5}$  м<sup>3</sup>Па/с — молекулярные.

Уравнения (4) и (5) широко применяются в практике моделирования механизма протекания газа по межслойной полости. Однако они не учитывают особенностей течения газов через зазоры, связанные с наличием значительного перепада давлений по длине зазора. При этом на разных участках зазора одновременно существуют разные режимы течения газа. Для вычисления потока газа через межслойную полость следует пользоваться уравнением (6).

Высоту зазора  $\delta$  (или  $\delta_{cp}$ ) следует определить на основе теории контактного взаимодействия поверхностей или экспериментально, измерив объем полости межповерхностных зазоров. Высота зазора  $\delta$

определяется в теории контактного взаимодействия двух поверхностей следующим образом:

$$\delta = W_z + H_z + 2R_p - y, \quad (8)$$

где  $W_z$  — средняя высота макроотклонений формы;  $H_z$  — средняя высота волнистости;  $R_p$  — средняя величина шероховатости;  $y$  — величина сближения поверхностей под воздействием нагрузки, определяемая уравнением (1).

Таким образом, уравнения (1) — (8) позволяют рассчитать величину потока газа через щелевидный зазор в зависимости от силы сжатия поверхностей, образующих зазор, и характеристик поверхностей, при различных перепадах давления газа на зазоре ( $p_2 - p_1$ ). На рис. 6 представлена зависимость потока  $Q$  газа через щелевидный зазор обечайки многослойной трубы от силы сжатия  $N/A_a$  поверхностей, образующих этот зазор, для случая максимальных значений  $R_a$ ,  $H_z$  и  $W_z$  и трех значений входного давления  $p_2$ : 0,2; 0,6 и 1,0 МПа.

Нами разработана диалоговая программа компьютерного расчета газовых потоков, предусматривающая ввод параметров поверхностей, образующих щелевидный зазор и вывод на экран графиков зависимости  $Q = f(N/A_a)$ . Предложенный подход дает косвенную возможность рассчитать время заполнения тупиковых зазоров на основе уравнения  $Q = V/t$ , но без учета влияния уменьшения потока по мере заполнения зазора.

*Третье направление расчета* потока основано на представлении стыка двух контактирующих поверхностей как некоторой пористой структуры и применения к ней основных законов фильтрационного движения газов. Так как форма, высота и распределение неровностей на обеих поверхностях случайны, то, следовательно, контактный слой, образованный сжатиями поверхностями неровностями, характеризуется наличием множества случайных микроканалов и пор, разнообразных по форме и протяженности. Вся совокупность микроканалов и пор может быть рассмотрена как некоторый слой пористого тела, параметры которого изменяются по мере сближения контактирующих поверхностей [17–20].

Для определения расхода газа через стык двух поверхностей следует использовать уравнение неразрывности фильтрационного потока. Допустив, что течение газа вязкостное, установившееся; скорость потока в плоскости, перпендикулярной его движению, постоянна; пористость по стыку распределена равномерно; давление газа по длине стыка изменяется линейно; коэффициент динамической вязкости газа не зависит от давления, массовый расход сжимаемого газа можно описать уравнением Дарси:

$$Q = (A_s K_n / RT \mu) p dp / dr, \quad (9)$$

где  $A_s$  — площадь сечения контактного слоя, через которую происходит фильтрация;  $K_n$  — коэффициент проницаемости;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости;  $p$  — давление газа.

Совершив многочисленные преобразования, после интегрирования получим

$$Q = \pi V_s^3 (p_2^2 - p_1^2) / 4 \mu k A_a^3 RT (\ln r_2 / r_1), \quad (10)$$

где  $V_s$  — объем свободного пространства пор;  $A_a$  — номинальная площадь контакта;  $k$  — константа Кармана, зависящая от формы каналов; обычно  $k = 4,5 \dots 5,0$ .

В соответствии с этой моделью разработана программа компьютерного расчета, позволяющая визуализировать поля давления в зазоре в различные моменты времени. Она также позволяет строить зависимости от времени интегральных характеристик: расхода газа источника, расхода газа через течь, давления газа в удаленной точке зазора и др.

**Исследование заполнения газом полости межслойных зазоров.** Нами проведено исследование заполнения газом обечаяек (156 шт.) многослойных труб и многослойных баллонов (4 шт.) в лаборатории на Харцызском трубном и Выксунском металлургическом заводах и строительстве опытного участка газопровода из многослойных труб.

Газ давлением 0,4...0,8 МПа подавался в полость межслойных зазоров обечаяек и баллонов через дренажные и специально выполненные отверстия. Давление газа в полости зазоров регистрировалось манометрами.

Исследования показали существенное различие в характере заполнения полости межслойных зазоров обечаяек, не подвергавшихся и подвергавшихся экспандированию. На рис. 7, а представлены результаты исследований заполнения зазоров обечаяек, не подвергавшихся экспандированию, а на рис. 7, б — обечаяек, экспандирование которых выполнено на заводском оборудовании с целью придания обечайкам большей контактной жесткости и устойчивости.

Время заполнения межслойных зазоров неэкспандированных обечаяек равно 0,5...2,0 мин. (до уровня  $p/p_{вх} = 0,9$ ). Для обечаяек, прошедших технологическое экспандирование, характерен большой разброс величин времени заполнения зазоров от изделия к изделию — от 3 до 25 мин. Тем не менее графики зависимости  $p/p_{вх} = f(t)$  для большинства обечаяек (86%) располагаются в зоне I, т.е. в зоне хорошего заполнения. Графики остальных 14% обечаяек располагаются в зоне II, т.е. в зоне медленного заполнения.

В некоторых случаях наблюдалось значительное замедление роста давления  $dp/dt$  на каком-то уровне  $p$ , причем  $p/p_{вх} < 1$ . Такое «перекрытие» межслойных зазоров замечено на 12-ти обечайках (16%). Одной из наиболее вероятных причин «перекрытия» зазоров является движение слоев внутри стенки изделия под воздействием возникающих перепадов давления. На этих обечайках испытан способ «медленного» роста давления на входе в отверстие — 0,002...0,004 МПа/с. В большинстве обечаяек (кроме 3-х из 12-ти) это устранило явление «перекрытия» зазоров и удалось достичь примерного равенства  $p_{вх} \cong p_{вн}$ . Таким образом, результаты экспериментов показали, что для многослойных изделий, подвергавшихся технологическому экспандированию, целесообразно применить способ «медленного» роста давления на входе в отверстие. Для обечаяек многослойных труб это означает, что

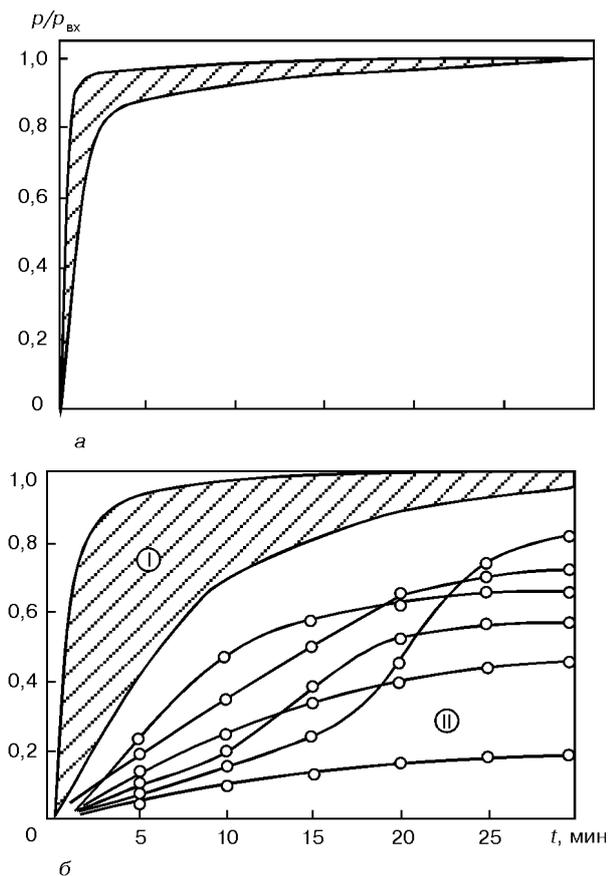


Рис. 7. Зависимость давления  $p$  газа в межслойных зазорах от времени заполнения  $t$  для неэкспандированных (а) и экспандированных (б) обечаек (входное давление  $P_{вх}$ ).

увеличение давления до 0,4... 0,6 МПа должно происходить в течение 3... 5 мин.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ сквозных дефектов сварных соединений изделий с многослойной стенкой показал, что такие дефекты открывают доступ из полости изделия в полость межслойных зазоров, а проникновение через них рабочего, хранящегося или транспортируемого вещества под высоким давлением может стать причиной нарушения нормальной работы изделия или его разрушению.

2. Контроль герметичности сварных соединений изделий с многослойной стенкой возможно при существовании газопереноса по межслойным зазорам. Для определения потока газа через межслойные зазоры необходимо знать их форму и геометрические размеры. Факторами, определяющими форму и размеры межслойных зазоров, являются: силовое воздействие на многослойную стенку, физико-механические свойства поверхностного слоя, рельеф поверхностного слоя и конструктивные особенности изделия.

3. Расчет сближения двух контактирующих поверхностей в межслойном зазоре выполнен на основе теории контактного взаимодействия твердых тел. Приведены формулы для инженерного расчета

сближения контактирующих поверхностей под действием усилий сжатия (1)–(3).

4. Анализ методов расчета газопереноса через контакт двух металлических поверхностей позволил создать формулы для инженерного расчета газового потока через щелевидный межслойный зазор изделия с многослойной стенкой. Созданы программы компьютерного расчета газовых потоков, позволяющие визуализировать поля давления в межслойных зазорах в различные моменты времени от начала подачи газа в зазор.

5. Выполнены исследования заполнения газом обечаек многослойных труб и многослойных баллонов. Исследования показали существенное различие в характере заполнения полости межслойных зазоров обечаек, не подвергавшихся и подвергавшихся технологическому экспандированию. Время заполнения межслойных зазоров не экспандированных обечаек равно 0,5... 2,0 мин. Для обечаек, прошедших экспандирование, характерен большой разброс величин времени заполнения зазоров от изделия к изделию — от 3 до 25 мин.

В некоторых случаях наблюдалось замедление роста давления в межслойном зазоре на каком-то уровне  $p$ , причем  $p/p_{вх} < 1$ . Предложен способ «медленного» роста давления на входе в межслойные зазоры — 0,002... 0,004 МПа/с, с целью предотвращения явления «перекрывания» зазоров. Для обечаек многослойных труб это означает, что увеличение давления до 0,4... 0,6 МПа должно происходить в течение 3... 5 мин.

1. Новиков В. И. Многослойные сварные конструкции / Многослойные сварные конструкции и трубы. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 20–24.
2. Макаров В. М. Совершенствование рулонированных сосудов высокого давления. — Там же. — С. 14–19.
3. Патон Б. Е., Билецкий С. М. Конструкция, технология и основные характеристики многослойных труб для магистральных газопроводов — Там же. — С. 5–14.
4. Трущенко А. А., Посытайко Ю. Н. Особенности контроля герметичности сварных соединений многослойных труб / Передовой опыт неразрушающего контроля качества сварных соединений. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 134–136.
5. Деев Г. Ф., Пацкевич И. Р. Дефекты сварных швов. — Киев: Наук. думка, 1984. — 208 с.
6. Подгаецкий В. В. Пори, включения и трещины в сварных швах. — Киев: Техніка, 1972. — 236 с.
7. Походня И. К. Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
8. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. — М.: Наука, 1970. — 227 с.
9. Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. — М.: Изд. АН СССР, 1962. — 111 с.
10. Трение, изнашивание, смазка. Справ. в 2-х кн // Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. — М.: Машиностроение, 1978. — Кн. 1. — 400 с.
11. Рыжов Э. В. Основы расчета стыковых поверхностей на контактную жесткость. — М.: Машгиз, 1962. — 143 с.
12. Рудзит Я. А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. — Рига: Зинате, 1975. — 210 с.
13. Гуревич Д. Ф. Трубопроводная арматура. Справ. пос. — Л.: Машиностроение, 1981. — 368 с.

(Окончание см. на с. 31)

# СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРАНА С ПУТЯМИ. ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ МОСТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ И НАКОПЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

О. А. ЕМЕЛЬЯНОВ, В. П. ШЕПОТЬКО, С. В. ЛУБЕНЕЦ, Ю. В. ПИХОТА

Силовое взаимодействие кранов с эстакадами вызывает усталостные повреждения крановых мостов и подкрановых балок. Результаты исследований, проведенные в лаборатории эксплуатационной надежности крановых металлоконструкций Донбасской государственной машиностроительной академии, позволяют выразить этот процесс в энергетической форме.

Установлены следующие закономерности: работа привода передвижения крана может быть представлена как передача энергии от тела энергоносителя (крана) на контртело (подкрановую эстакаду) в процессе их силового взаимодействия при относительном перемещении, сопровождающимся скольжением (трением) в местах контактирования колес с рельсами (кинематических парах). Процесс передачи энергии от привода передвижения трением в контактах колесо-рельс при совместном относительном перемещении систем с упругими звеньями происходит дискретно и сопровождается циклическими упругопластическими деформациями как звеньев, так и площадок их контактирования.

Схематически взаимодействие крана с подкрановой эстакадой можно представить в виде системы, состоящей из трех контуров (рис. 1): верхнего 1 (тело-энергоноситель), нижнего 2 (контртело) и промежуточного 3 (кинематические пары с силовым замыканием). Верхним контуром является кран, контртелом — основание, по которому он перемещается. Система представляет совокупность двух контуров (крана и эстакады), взаимодействующие детали которых (колеса и рельсы) соединяются промежуточным контуром (пятна контакта), т. е. имеем кинематические пары с силовым замыканием.

Рассмотрим систему кран – подкрановая эстакада при их силовом взаимодействии в процессе движения крана [1–5]. Ее можно представить (см. рис. 1) как состоящую из следующих контуров: кранового (мост крана с колесами), опорного (эстакада с рельсами) и контактного (контактирующие поверхности колес и рельсов). При взаимодействии крана с эстакадой он является источником энергии (телом-энергоносителем), которая вырабатывается электродвигателем механизма передвижения моста. Через трансмиссию привода энергия от двигателя передается в места контакта колес с рельсами — она сообщает движение крану (полезная работа) и затрачивается на различные потери (рис. 2).

В контактном контуре на приводные колеса действуют силы реакций: вертикальных, а также горизонтальных — продольных (силы продольного

скольжения, реализующие поступательное движение или торможение) и поперечных (паразитные силы поперечного скольжения, вызываемые перекосом колес в горизонтальной плоскости). На неприводные колеса действуют только вертикальные и горизонтальные поперечные силы реакций — как и поперечные силы в приводных колесах, они обусловлены перекосом колес и являются паразитными. При движении крана поперечные силы горизонтальных реакций вызывают распор кранового и опорного контуров. Эти распорные силы могут быть направлены внутрь пролета или из него в зависимости от углов перекоса колес и направления движения крана.

Если пути идеально ровные, то работа упругой деформации подкрановых балок и эстакады в це-

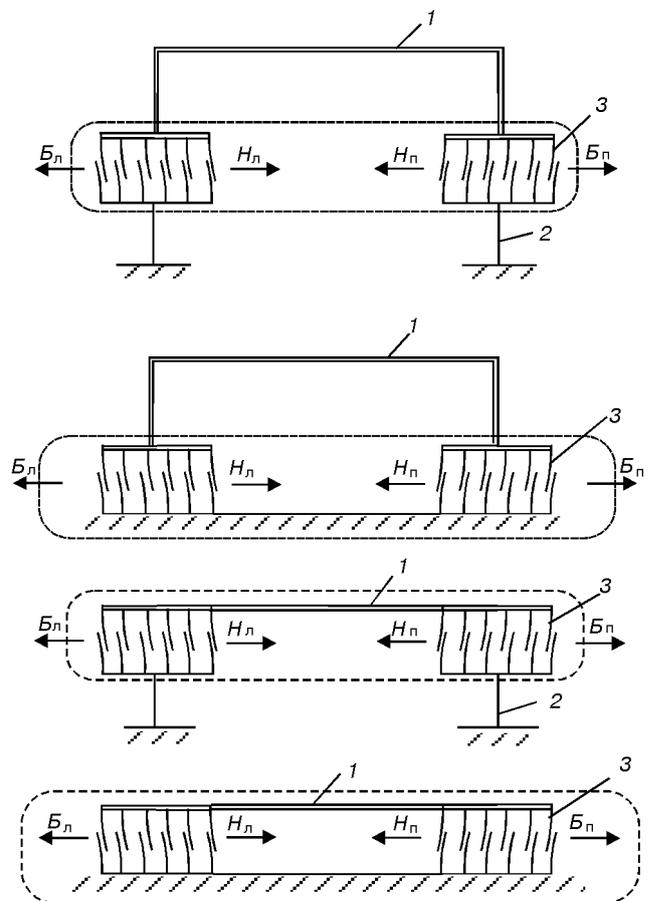


Рис. 1. Схема взаимодействия крана с путями в виде системы, состоящей из трех элементов; 1 — кран; 2 — подкрановая эстакада; 3 — контактирующие поверхности колесо-рельс;  $B_n$ ,  $B_n$  — соответственно левое и правое боковое давление колеса на рельс;  $H_n$ ,  $H_n$  — левое и правое усилие от рельса на колесо.

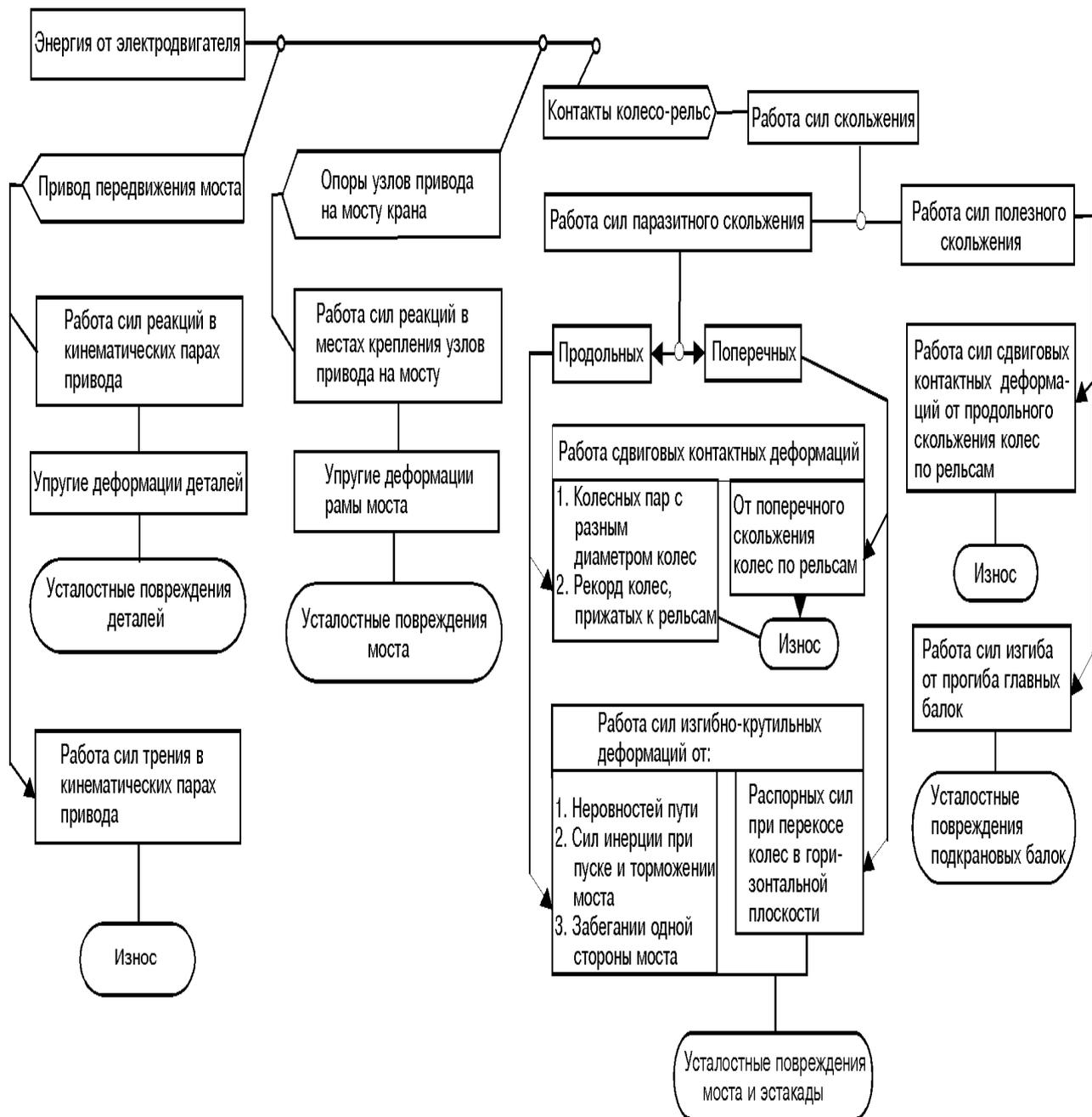


Рис. 2. Потери энергии электродвигателя при передвижении моста крана по путям.

лом, производимая силами вертикальных реакций (подвижной нагрузки от сил веса крана), передается только в опорный контур и способствует накоплению в нем усталостных повреждений.

В случае неровности путей силы вертикальных реакций совершают дополнительную работу, вызывая изгибно-крутильные деформации рамы моста и перераспределяя деформации на эстакаде, а производимая энергия передается в опорный и крановый контур. Работа, совершаемая силами вертикальных реакций, выполняется за счет затрат энергии, создаваемой силами тяги, и идет на накопление усталостных повреждений конструкций моста и эстакады. Часть энергии при действии горизонтальных продольных реакций (силе тяги), затрачивается на сдвиговые и контактные деформации и рассеивается, не влияя на усталость конструкций. Исключе-

нием являются режимы пуска и торможения крана, когда возникают силы инерции, а также преодоления повышенных сопротивлений движению одной его стороны, вызывающие упругие деформации моста механизмом привода передвижения.

При действии поперечных сил возникает распор конструкции моста и эстакады — в этом случае могут возникать различные ситуации. Рассмотрим при этом роль контактного контура в процессе работы системы. Предположим, что крановый и опорный контуры имеют очень высокую жесткость и упругая энергия в них не накапливается. Таким образом, имеем систему с низким резильансом (упругой энергией, накапливаемой в конструкции при ее деформации под действием сил до момента разрушения). Работа поперечных распорных сил при движении крана может тратиться только на упругие

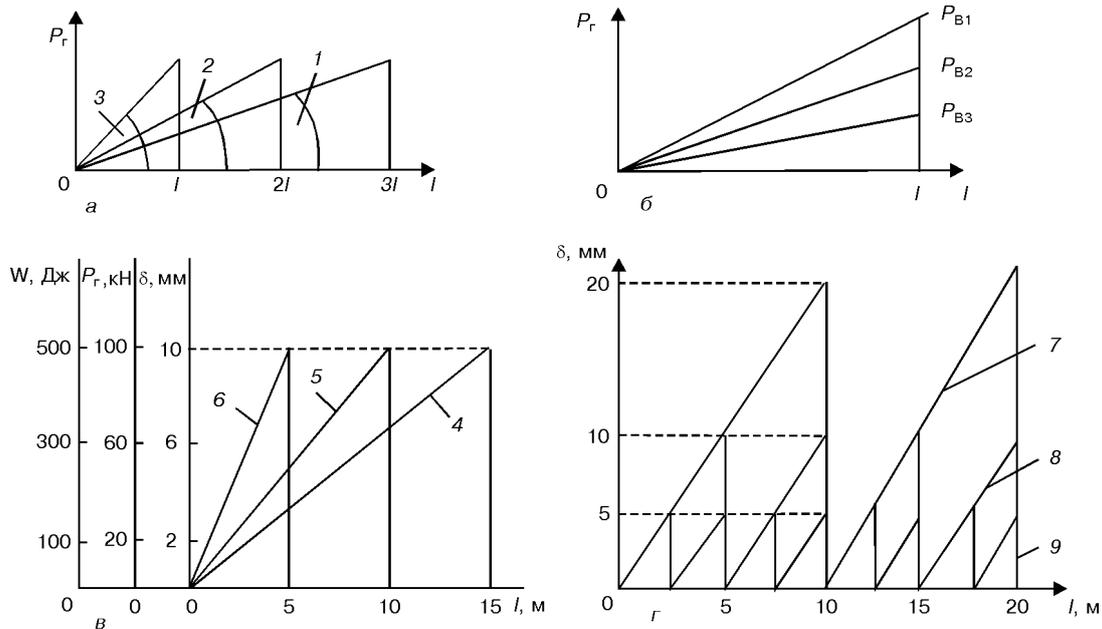


Рис. 3. Зависимость от длины отрезка пути  $l$  (проходимого колесом до срыва в контакте):  $a, б$  — боковой (распорный) силы  $P_r$ ;  $a$  — при  $P_b = \text{const}$  и углах перекоса  $\alpha$  (1),  $2\alpha$  (2) и  $3\alpha$  (3);  $б$  — при  $\alpha = \text{const}$  и  $P_{b1} > P_{b2} > P_{b3}$ ;  $в$  — параметров  $W, P_r$  и  $\delta$  при  $C = 10 \text{ кН/мм}$  и  $\alpha = 0,0007$  (4),  $0,001$  (5) и  $0,002$  (6);  $г$  — упругой деформации  $\delta$  при  $\alpha = 0,002$  и  $C = 5$  (7),  $10$  (8),  $20 \text{ кН/мм}$  (9).

и пластические деформации контактирующих слоев поверхностей рельсов и колес, способствуя их износу. Действие поперечных сил вызывает диагональный перекос моста на рельсах или одностороннее его прижатие к правому или левому рельсу колеи. При плотном прижатии колесных реборд к боковым граням рельсов происходит их взаимный интенсивный износ, на что затрачивается дополнительная работа тяговых сил. Следовательно, в системе с низким резильянсом вся энергия от тела энергоносителя отдается в контактный контур и затрачивается в нем на деформацию и износ поверхностей колес и рельсов, находящихся во взаимно подвижном контакте.

Рассмотрим систему, у которой крановый контур упругий, а опорный — жесткий. Результаты экспериментов показывают [6], что при поступательном прямолинейном движении крана колесо, упруго соединенное с мостом под углом  $\alpha$  к общему направлению движения, совершает колебательные пилообразные перемещения. В крановом контуре в процессе увеличения деформации от 0 до  $\delta_{\text{max}}$  накапливается энергия упругая, а подводимая в контакты приводных колес затрачивается на совершенные работы сдвиговых деформаций вдоль и поперек пути, а также упругой деформации моста, вызывая при этом развитие усталостных повреждений. Эксперименты показывают, что при жестком крановом и упругом опорном контурах деформация последнего происходит аналогично — подкрановая балка выжимается в горизонтальной плоскости.

В общем процессе силового взаимодействия системы контактный контур выполняет роль распределителя энергии. В зависимости от жесткости кранового и опорного контуров, значения коэффициента трения в контактах рельс-колесо, вертикальных нагрузок на колеса и наличия упора реборд в рельсы контактный контур отпускает всем «потребителям» энергию, а угол перекоса колеса  $\alpha$  высту-

пает в качестве регулятора ее распределения. Вполне очевидно, что функциональные возможности контактного контура можно изменять за счет конструктивного совершенствования и структурного усложнения, влияя тем самым на процесс силового взаимодействия. В полной мере это относится к крановому и опорному контуру, т. е. в целом ко всем контурам системы.

Рассмотрим, как влияют параметры системы на затраты энергии при упругой деформации кранового контура в следующих условиях: нагрузка на колесо  $P_b = 500 \text{ кН}$ ; скорость крана  $v = 80 \text{ м/мин}$ ; жесткость моста  $C = 10 \text{ кН/мм}$ ; коэффициент трения  $f = 0,2$ . При этом горизонтальная нагрузка  $P_r = fP_b = 500 \cdot 0,2 = 100 \text{ кН}$ ; упругая деформация  $\delta = P_r / C = 100 / 10 = 10 \text{ мм}$ , а энергия упругой деформации моста за один цикл  $W = 0,5P_r\delta = 0,5 \cdot 100 \cdot 0,01 = 0,5 \text{ кДж}$ .

1. Угол перекоса колеса (рис. 3,  $a, в$ ). При  $\alpha_1 = 0,002 = l_1 = \delta / \alpha_1 = 0,01 / 0,002 = 5 \text{ м}$ . Количество срывов (циклов нагружения) за 1 мин на пути  $80 \text{ м}$   $n_1 = L / l_1 = 80 / 5 = 16 \text{ циклов/мин}$ . Для  $\alpha_2 = 0,001$   $l_2 = \delta / \alpha_2 = 0,01 / 0,001 = 10 \text{ м}$ ;  $n_2 = L / l_2 = 80 / 10 = 8 \text{ циклов/мин}$ , тогда  $W_1 = n_1 W = 16 \cdot 0,5 = 8 \text{ кДж}$ ;  $W_2 = n_2 W = 8 \cdot 0,5 = 4 \text{ кДж}$ .

Потеря энергии на упругую деформацию моста прямо пропорциональна углу перекоса колеса.

2. Жесткость моста  $C$  при постоянной величине  $\alpha = 0,002$  (рис. 3,  $г$ ). При  $C_1 = 5 \text{ кН/мм}$ ;  $\delta_1 = P_r / C_1 = 100 / 5 = 20 \text{ мм}$ ;  $l_1 = \delta_1 / \alpha = 20 / 0,002 = 10000 \text{ мм}$ . Для  $C_2 = 10 \text{ кН/мм}$   $\delta_2 = P_r / C_2 = 100 / 10 = 10 \text{ мм}$ ;  $l_2 = \delta_2 / \alpha = 10 / 0,002 = 5000 \text{ мм}$ . Количество срывов (циклов нагружения) за 1 мин на пути  $80 \text{ м}$   $n_1 = L / l_1 = 80 / 10 = 8$  (циклов);  $n_2 = L / l_2 = 80 / 5 = 16$  (циклов).

Энергия упругой деформации моста на 1 цикл  $W_1 = 0,5P_r\delta_1 = 0,5 \cdot 100 \cdot 0,02 = 1 \text{ кДж}$ ;  $W_2 = 0,5P_r\delta_2 = 0,5 \cdot 100 \cdot 0,01 = 0,5 \text{ кДж}$ .

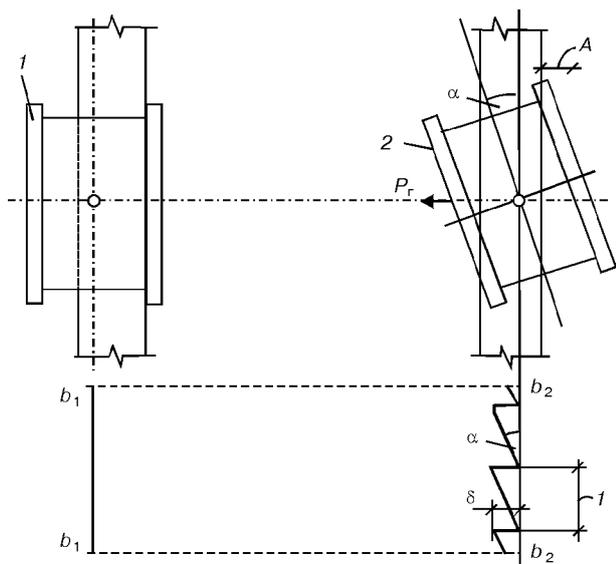


Рис. 4. Влияние суммарного зазора реборда-рельса  $A$  на достижение максимальных значений  $P_r$  и  $W$ : 1 — колесо с прижатой внутренней ребордой; 2 — колесо, совершающее периодические поперечные колебания;  $\alpha$  — угол перекоса колеса;  $\delta$  — наибольшее отклонение центра колеса 2 при срыве зацепления в контакте;  $b_1$ – $b_1$  и  $b_2$ – $b_2$  — траектории движения центров колес 1 и 2.

Затраты энергии на упругую деформацию моста за 1 мин  $W_1 = n_1 W_1 = 851 = 8$  кДж;  $W_2 = n_2 W_2 = 16 \cdot 0,5 = 8$  кДж.

При увеличении жесткости моста частота срывов в зацеплении (количество циклов нагружения) увеличивается в прямо пропорциональной зависимости, а поперечная деформация, длина отрезка пути до срыва и энергия упругой деформации за цикл уменьшаются обратно пропорционально. Величина энергии упругой деформации конструкций с разной жесткостью за одинаковые отрезки времени (при прохождении краном равного пути) остается неизменной, но частота нагружений с увеличением жесткости возрастает.

3. Суммарный зазор  $A$ . Принимаем суммарный зазор между ребордами и рельсами  $A = 2a + e$ , где  $a$  — симметричный допуск на отклонение рельса от продольной оси (рис. 4). Обычно  $a = \pm 15$  мм,  $e = 5$  мм, поэтому  $A = 5 \dots 35$  мм, а отклонение кранового колеса  $\delta$  в этом случае может изменяться в пределах  $0 \dots 35$  мм. Жесткость моста равна  $C = P_{rmax} / \delta_{max}$  и  $\delta_{max} = P_{rmax} / C$ . Если  $\delta_{max} \leq 5$  мм, то изменение ширины пролета может не влиять на достижение максимальных значений  $P_{rmax}$  и  $W_{max}$ .

Если  $\delta_{max} > 5$  мм, то распорная сила  $P_r$  и затраты энергии  $W$  при движении крана могут не достигать максимальных значений вследствие ограничения деформаций  $\delta$  преждевременным упором реборд в местах сужения рельсовой колеи.

Если  $\delta_{max} > 35$  мм, то параметры  $P_r$  и  $W$  не достигают максимальных значений на всей длине пролета, т. к. упор реборд в рельсы будет происходить только после достижения  $\delta_{max}$ .

Распорная сила и энергия, затрачиваемая на упругую деформацию моста, прямо пропорциональны также вертикальной нагрузке на колесо  $P_v$  и коэффициенту трения  $f$ .

Выше было показано, что при очень жестком крановом контуре деформации моста не происходят, т. е. нет чередующихся (циклических) упругих нагружений конструкций (срывов в контактах), а перекошенное колесо в процессе качения непрерывно (упруго) «проползает» поперек рельса, рассеивая энергию на сдвиговые деформации. При  $\alpha = 40 \dots 50'$  упругое проползание переходит в обычное трение скольжения и распорная сила достигает предельного значения  $P_r = P_v f$ . В этом случае за цикл нагружения в горизонтальной плоскости можно принять время движения крана в одном направлении, включая и остановки. Эксперименты и наблюдения за работой кранов показывают, что во время стоянки значение распорной силы не уменьшается. Изменение направления движения приводит к ее уменьшению до нулевого значения и увеличению с обратным знаком — до  $P_{rmax}$ . Реборды перекошенных колес обычно прижаты к рельсам и интенсивно изнашиваются. При нулевой жесткости кранового контура распорная поперечная сила не возникает, а реборды колес, установленных с перекосом, всегда прижаты к боковым поверхностям рельсов. Нулевую жесткость имеют крановые мосты с одной шарнирной опорой на путь, например козловые краны и перегружатели.

Как было сказано выше, боковые распорные силы  $P_r$  зависят от коэффициента трения скольжения колеса поперек рельса:  $P_r = f P_v$ . По нормам  $f = 0,1$  [7] или  $0,15 \dots 0,2$  [8], т. е. нормативная величина боковых сил сравнительно невелика.

Однако, как показывает опыт эксплуатации, распорные силы могут достигать больших значений, при которых ходовые колеса вышползают ребордами на рельс и приподнимают мост. Такая ситуация возможна, если распорная сила, зависящая от углов набегания (перекоса) колес, достигает критического уровня. Этому способствуют: высокая шероховатость покрытых задирками трущихся поверхностей реборд и боковых граней рельсов; снижение вертикальной нагрузки на колесо; зависимость между поперечной и тяговой силами, аналогичная связи существующей между силами, действующими на клин, когда небольшая движущая сила создает большую поперечную силу; отгиб сильно изношенной реборды наружу. Таким образом, перекося колес в горизонтальной плоскости вызывает появление переменных распорных сил не только в горизонтальной плоскости, а в ряде случаев и вертикальных, приводящих к выползанию колес на рельсы, что приводит к увеличению затрат механической энергии, вырабатываемой электродвигателем механизма передвижения крана.

## ВЫВОДЫ

1. Работа различных механизмов, в т. ч. и системы кран-эстакада может быть представлена как передача энергии трением при взаимодействии тела энергоносителя и контртела. Процесс передачи энергии трением (или упругим скольжением) при совместном относительном перемещении систем с упругими звеньями происходит дискретно и сопровождается циклическими упругопластическими де-

формациями как звеньев, так и площадок их контактирования.

2. Если конструкция моста или подкрановой эстакады упругоподатлива в направлении, поперечном к рельсам, то в процессе движения крана перекошенное колесо воздействует на них подобно клину, вызывая упругие поперечные деформации моста и эстакады. Последние тем больше, чем больше угол перекоса  $\alpha$  и путь, пройденный колесом.

С увеличением поперечной деформации увеличивается распорная сила, которая, достигнув максимума  $P_r = f_0 P_v$ , где  $f_0$  — коэффициент трения покоя при скольжении, вызывает проскальзывание колеса поперек рельса, а поперечная сила уменьшается до  $P_r \equiv 0$ , после чего процесс повторяется и т. д.

3. С увеличением жесткости моста и балки путь, проходимый колесом до срыва зацепления в контакт, и поперечная деформация уменьшаются по линейной зависимости. Следовательно, при весьма высокой жесткости балки и моста поперечные деформации будут ничтожно малы, колесо, установленное с перекосом на угол  $\alpha$ , работу по упругой деформации балки и моста не совершает и упругая энергия в ней не накапливается (переходит в вибрацию). Энергия, подводимая в контакты колесо-рельс, будет затрачиваться только на непрерывные сдвиговые поперечные деформации в контактирующих слоях металла колеса и рельса, а поперечные силы скольжения при постоянной вертикальной нагрузке будут зависеть только от угла перекоса. Каждому значению последнего соответствует свой уровень поперечной силы вплоть до  $\alpha = 40...50'$ , после чего начинается неупругое (жесткое) скольжение при максимальной нагрузке  $P_r$ .

4. В процессе взаимодействия колеса с подкрановыми сооружениями контактный контур выпол-

няет роль распределителя механической энергии, вырабатываемой приводом передвижения крана. В зависимости от жесткости кранового и опорного контуров, коэффициентов трения в контактах колесо-рельс, вертикальных нагрузок на колеса и наличия упора реборд в рельсы контактный контур отпускает всем «потребителям» дозированное количество энергии. При этом угол перекоса колеса выступает в качестве регулятора ее распределения.

1. Влияние жесткости конструкций на формирование поперечных нагрузок в контакте крановое колесо-рельс / В. П. Шепотько, О. А. Емельянов, Ю. С. Кунин; Краматор. индустр. ин-т. — Краматорск, 1989. — 33 с. — Деп. в УкрНИИТИ 12.06.89, № 1627. — Ук89.
2. Факторы, вызывающие усталостные повреждения сварных узлов крановых мостов и подкрановых балок / О. А. Емельянов, В. П. Шепотько, В. Д. Чевычелов и др. // Автомат. сварка. — 1991. — № 3. — С. 10–13.
3. Силовое взаимодействие крана с путями. Теоретическое исследование / О. А. Емельянов, Л. М. Топтунова, В. П. Шепотько, М. В. Брус; Донбаск. гос. машиностр. акад. — Краматорск, 1997. — 17 с. — Деп. в УкрНИИТИ 7.07.97, № 502 — Ук97.
4. Липатов А. С. Исследование случайных нагрузок на реборды колес мостовых кранов: Автореф. дис...канд. техн. наук. — М.: ВНИИПТМАШ, 1982. — 16 с.
5. Закономерности формирования поперечных нагрузок при силовом взаимодействии кранового колеса с рельсом / О. А. Емельянов, В. П. Шепотько, В. Д. Чевычелов, и др. Крам. индустр. ин-т. — Краматорск, 1988. — 46 с. — Деп. в УкрНИИТИ 15.08.88, № 1991 — Ук88.
6. Емельянов О. А. Мостовые краны // Сварные строительные конструкции. Справочник. — К.: Наук. думка, 1997. — Т. 2. — С.619–673.
7. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. — 36 с.
8. Балашов В. П., Розенштейн Б. М. Испытания мостового крана грузоподъемностью 12,5 тс, пролетом 23 м // Труды ВНИИПТМАШ. — 1962. — Вып. 9. — С. 32–41.

Донбас. гос. машиностроит. академия

Поступила в редакцию  
02.06.2000

Окончание. Начало на с.20.

14. Белов С. В., Новиков Ю. М. Герметичность разъемных соединений и клапанных пар. Обзорная информация. Серия ХМ-6. Криогенное и вакуумное машиностроение. — М.: ЦИТИХимнефтемап, 1983. — 32 с.
15. Ланис В. А., Левина Л. Е. Техника вакуумных испытаний. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 263 с.
16. Левина Л. Е. Обобщенное эмпирическое уравнение для описания процесса перетекания газов по малым каналам. — Дефектоскопия. — 1980. — №1. — С. 75–80.
17. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
18. Лемберский Б. В., Фишкин Р. В., Домашнев А. Д. Расчет величины утечки через неподвижные разъемные соединения. — Химическое и нефтяное машиностроение. — 1977. — № 4. — С. 10–11.
19. Новиков Ю. М., Белов С. В. Утечки газа через стык шероховатых поверхностей. — Машиностроение. — 1981. — № 11. — С. 70–73.
20. Демкин Н. Б., Алексеев В. А., Лемберский В. Б., Соколов В. И. Расход газа через стык контактирующих поверхностей. — Там же. — 1976. — № 6. — С. 40–44.

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

Поступила в редакцию  
20.03.2001

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОЛЯ ЗАВАДИ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО МОМЕНТУ ЗОНАЛЬНОЇ ГАРМОНІКИ КВАДРУПОЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ПОЛЯ ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТА

**В. В. ДЕГТЯРЬОВ**

Аналіз зовнішнього магнітного поля (ЗМП), що створюється технічним об'єктом в ближній зоні навколишнього простору, пов'язаний з необхідністю проведення вимірювань не тільки дипольних магнітних моментів, значення яких нормовані для промислових зразків електрообладнання [1], але й квадрупольних моментів, за значеннями яких визначається рівень напруженості мультиполя другого порядку. Використання для аналізу ЗМП технічного об'єкта в ближній зоні мультипольної теорії, згідно якої поле в зовнішньому просторі подається як сума окремих просторових мультиполів — диполя, квадруполя, октуполя і т.ін, дозволяє вирішити питання підвищення точності вимірювання параметрів ЗМП в цілому. Такий підхід зумовлений необхідністю застосування адекватної моделі ЗМП джерела в зоні простору, що досліджується і безумовно вимагає урахування впливу параметрів мультиполя другого порядку. Контроль квадрупольних магнітних моментів джерел ЗМП здійснюється точковими магнітометричними пристроями в умовах наявності електромагнітних завад сторонніх джерел. Через те що поле завади неоднорідне, виникає похибка за рахунок неповної компенсації впливу зовнішньої завади на датчики магніточутливого пристрою. Вказана похибка в цілому характеризує ступінь завадозахищеності точкового пристрою при вимірюванні квадрупольних магнітних моментів за умов наявності електромагнітних полів завад зовнішніх джерел. Тому питання оцінки вказаної похибки уявляють практичний інтерес щодо застосування точкових магнітометричних пристроїв не тільки в умовах стаціонарних магнітометричних стелів, але й в умовах експлуатації джерел ЗМП.

В зоні зовнішнього простору скалярний магнітний потенціал, що створюється довільним джерелом, можна подати у вигляді гармонічного ряду [2]:

$$U = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{R}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_{nm} \cos m \varphi + h_{nm} \sin m \varphi) P_n^m(\cos \theta), \quad (1)$$

де  $R, \varphi, \theta$  — сферичні координати;  $g_{nm}, h_{nm}$  — постійні коефіцієнти ряду, які дорівнюють мультипольним магнітним моментам сферичних гармонік;  $P_n^m(\cos \theta)$  — приєднані поліноми Лежандра;  $n$  — номер просторової гармоніки;  $m$  — номер елементарного мультиполя гармоніки  $n$ -го порядку.

Згідно (1) магнітний потенціал квадрупольної складової магнітного поля описується виразом:

$$U_{20} = \frac{1}{4\pi R^3} g_{20} P_2^0(\cos \theta),$$

де  $g_{20}$  — коефіцієнт, який дорівнює осьовому квадрупольному магнітному моменту джерела зовнішнього магнітного поля ( $g_{20} = M_{20}$ );  $P_2^0(\cos \theta)$  — поліном Лежандра другого порядку ( $n = 2$ ) для елементарного мультиполя порядку  $m = 0$ :

$$P_2^0(\cos \theta) = \frac{1}{4} (1 + 3\cos 2\theta).$$

Для джерела ЗМП, що містить ексцентричний довільно орієнтований в робочому просторі джерела дипольний момент, осьовий квадрупольний магнітний момент буде:

$$M_{20} = -M \cos \alpha x_0 - M \cos \beta y_0 + 2M \cos \gamma z_0,$$

де  $M$  — еквівалентний дипольний магнітний момент джерела ЗМП;  $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$  — спрямовуючі косинуси магнітного диполя  $\vec{M}$ ;  $x_0, y_0, z_0$  — координати зміщення еквівалентного дипольного моменту джерела відносно початку прийнятої системи координат.

Вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту  $M_{20}$  здійснюється технічним засобом із використанням системи магніточутливих датчиків. Наявність зовнішньої електромагнітної завади в робочій зоні магнітометричного вимірювального пристрою дає значну похибки вимірювання. Тому виконати якісні вимірювання в ряді випадків, коли завада перевищує корисний сигнал, не уявляється можливим. Застосування пасивних методів захищеності вимірювального каналу магнітометричного пристрою від впливів нестаціонарних зовнішніх електромагнітних полів шляхом стрічного увімкнення котушок магніточутливих датчиків забезпечує достатню для практичних вимог точність вимірювання. Тому виникає потреба в оцінці похибки вимірювання, що зумовлена наявністю електромагнітної завади.

Розглянемо методику визначення похибки вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту джерела ЗМП одноканальним завадозахищеним пристроєм другого порядку ( $n = 2$ ).

Такий пристрій містить систему з чотирьох магніточутливих датчиків, які розміщені навколо досліджуваного джерела ЗМП в екваторіальній площині на колі радіусом  $R$  в точках із значеннями кутової координати, де  $\varphi_i = (i - 1)90^\circ, i = 1 \dots 4$  — номер датчика. Магнітні вісі котушок датчиків вимірювального пристрою радіальні до кола радіусом  $R$ , тому на ці котушки впливає радіальна компонента квадрупольної постійної складової

магнітного поля, яка знаходиться диференціюванням потенціалу  $U_{20}$  по координаті  $R$ :

$$H_{R_{20}} = -\frac{\partial U_{20}}{\partial R} = \frac{3g_{20}}{4\pi R^4} P_2^0(\cos\theta).$$

Радіальні котушки з'єднані по квадрупольному магнітному полю, що пропорційне  $M_{20}$ , електрично послідовно згідно, проте по зовнішній електромагнітній заваді — стрічно. Тому протифазні сигнали завод, що наводяться зовнішнім полем в радіальних котушках вимірювального пристрою, віднімаються, внаслідок чого результуючий сигнал завади на виході вимірювального каналу буде значно зменшений. Цей сигнал завади наводить адитивну похибку

$$\delta_{\Pi_{20}} = \frac{E_{\Pi_{20}}}{E_{20}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

де  $E_{20}$ ,  $E_{\Pi_{20}}$  — результуючий корисний сигнал і сигнал завади відповідно.

Визначимо корисний сигнал і сигнал завади, що наводяться в радіальних котушках магніточутливих датчиків з метою здійснення якісної і кількісної оцінки адитивної похибки вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту джерела ЗМП при наявності зовнішньої електромагнітної завади.

Результуючий корисний сигнал на виході вимірювального каналу, який дорівнює сумі корисних сигналів, що наведені квадрупольною постійною складовою магнітного поля в радіальних котушках магніточутливих датчиків, визначається формулою:

$$E_{20} = \frac{1}{k_f} \sum_{i=1}^4 H_{i_{20}} = -\frac{6M_{20}}{k_f R^4}, \quad (3)$$

де  $k_f$ , мЭ/мВ — постійна магніточутливих датчиків щодо напруженості магнітного поля;  $H_{i_{20}}$  — значення радіальної компоненти напруженості квадрупольної складової магнітного поля в  $i$ -й точці екваторіальної площини ( $\theta = 90^\circ$ ):

$$H_{i_{20}|_{\theta=90^\circ}} = -\frac{3M_{20}}{8\pi R^4}.$$

Рівень сигналу завади, що наводиться зовнішнім електромагнітним полем в радіальних котушках вимірювального пристрою, залежить від місцеположення заводонесучого джерела і орієнтації його магнітного диполя відносно прийнятої системи координат, початок якої суміщений з геометричним центром системи датчиків магнітометричного пристрою.

Розглянемо вирішення загальної задачі, коли джерело зовнішньої завади розміщено в екваторіальній площині на колі радіусом  $R_n$ , а вісь його магнітного диполя  $M_n$  складає з магнітними осями котушок  $1R$ ,  $3R$  кут  $\alpha$ .

В цьому випадку на магнітні осі котушок  $1R$ ,  $3R$  впливає  $x$ -ва складова напруженості заводонесучого магнітного поля:

$$H_{1(3)x} = -\frac{M_n}{4\pi} [(R_n \cos \alpha_{(+)} R)^2 + R_n^2 \sin^2 \alpha]^{-5/2} \times$$

$$\times \{ \cos \alpha [-2(R_n \cos \alpha_{(+)} R)^2 + R_n^2 \sin^2 \alpha] - 3R_n (R_n \cos \alpha_{(+)} R) \sin^2 \alpha \},$$

на котушки  $2R$ ,  $4R$  впливає  $y$ -ва складова поля:

$$H_{2(4)y} = -\frac{M_n}{4\pi} [R_n^2 \cos^2 \alpha + (R_n \sin \alpha_{(+)} R)^2]^{-5/2} \times \\ \times \{ -3 \cos^2 \alpha R_n (R_n \sin \alpha_{(+)} R) + \sin \alpha [R_n^2 \cos^2 \alpha - 2(R_n \sin \alpha_{(+)} R)^2] \}.$$

Тоді результуючий сигнал завади буде:

$$E_{\Pi_{20}} = \frac{1}{k_f} (H_{1x} + H_{2y} - H_{3x} - H_{4y}) = \frac{M_n}{k_f R^3} A_{20}(\lambda, \alpha), \quad (4)$$

де  $\lambda = R_n/R$ ;  $A_{20}(\lambda, \alpha)$  — коефіцієнт, значення якого визначається формулою:

$$A_{20}(\lambda, \alpha) = -[(\lambda \cos \alpha - 1)^2 + \lambda^2 \sin^2 \alpha]^{-5/25} \times \\ \times \{ \cos \alpha [-2(\lambda \cos \alpha - 1)^2 + \lambda^2 \sin^2 \alpha] - 3\lambda \sin^2 \alpha (\lambda \cos \alpha - 1) \} - \\ - [(\lambda^2 \cos^2 \alpha + (\lambda \sin \alpha - 1)^2)]^{-5/2} \{ -3\lambda \cos^2 \alpha (\lambda \sin \alpha - 1) + \sin \alpha \times \\ \times [\lambda^2 \cos^2 \alpha - 2(\lambda \sin \alpha - 1)^2] \} + [(\lambda \cos \alpha + 1)^2 + \lambda^2 \sin^2 \alpha]^{-5/25} \times \\ \times \{ \cos \alpha [-2(\lambda \cos \alpha + 1)^2 + \lambda^2 \sin^2 \alpha] - 3\lambda \sin^2 \alpha (\lambda \cos \alpha + 1) \} + \\ + [\lambda^2 \cos^2 \alpha + (\lambda \sin \alpha + 1)^2]^{-5/2} \{ -3\lambda \cos^2 \alpha (\lambda \sin \alpha + 1) + \sin \alpha \times \\ \times [\lambda^2 \cos^2 \alpha - 2(\lambda \sin \alpha + 1)^2] \}.$$

Аналіз залежності  $A_{20}(\lambda, \alpha)$  виявляє, що за умови  $\alpha = 0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  і  $\lambda = \text{const}$  коефіцієнт  $A_{20}(\lambda, \alpha)$  досягає максимальної величини і, як видно з (4), сигнал завади в цьому випадку буде:

$$E_{\Pi_{20}} = \frac{2M_n}{k_f R^3} A_{20}(\lambda), \quad (5)$$

де  $A_{20}(\lambda)$  — коефіцієнт, максимальне значення якого

$$A_{20}(\lambda) = \frac{2(3\lambda^2 + 1)}{(\lambda^2 - 1)^3} - \frac{3\lambda}{(\lambda^2 + 1)^{5/2}}.$$

Після підстановки до виразу (2) корисного сигналу (3) і сигналу завади (5) для адитивної похибки вимірювання осьового квадрупольного магнітного моменту отримаємо:

$$\delta_{\Pi_{20}} = \frac{M_{\Pi_{20}}}{6M_{20}} \frac{R/L_x}{k_x} A_{20}(\lambda) \cdot 100 \%, \quad (6)$$

де  $M_{\Pi_{20}} = 2M_{\Pi_{20}x_0}$  — еквівалентний квадрупольний магнітний момент джерела зовнішньої завади;  $k_x \leq L_x/2$ ,  $L_x$  — габаритний розмір досліджуваного джерела ЗМП по координатному напрямку  $X$ .

Аналіз виразу (6) виявляє, що за умови  $M_{\Pi_{20}}/M_{20} = 100$ ,  $R/L_x = 2$  і  $k_x = 1/2$ ,  $\lambda = 20$  адитивна похибка вимірювання квадрупольного моменту  $M_{20}$  складає 0,13 %.

При цьому значенні похибки нижня межа вимірюваного осьового квадрупольного магнітного моменту визначається формулою

$$M_{20}^H = \frac{M_{\Pi_{20}}}{6\delta_{\Pi_{20}}} \frac{R/L_x}{k_x} A_{20}(\lambda)$$

і при значенні заводонесучого еквівалентного квадрупольного моменту  $1 \text{ Ам}^3$  дорівнює  $0,01 \text{ Ам}^3$ .

Таким чином, визначено похибку вимірювання осьового квадрупольного моменту, яка зумовлена дією неоднорідних полів зовнішніх завод, а також пороговий рівень вимірюваного моменту, який пов'язаний із моментом зовнішнього джерела ЗМП.

Розглянутий одноканальний чотириточковий магнітометричний пристрій має високу ступінь завадозахищеності від зовнішніх електромагнітних полів і може бути використаний для вимірювання осьових квадрупольних моментів різних технічних об'єктів в промислових умовах за наявності нестационарної зовнішньої електромагнітної завади.

1. ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля. — Введ. 01.07.93. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 5 с.
2. Яновский Б. М. Земной магнетизм. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. — 592 с.

Харків. техн. ун-т радіоелектроніки

Надійшла до редакції  
01.02.2001

21–26 мая  
2001 г.

## «ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДОВ»

г. Москва

### 3-я Международная конференция

#### ТЕМАТИКА

Диагностика линейной части магистральных газо- и нефтепроводов  
Диагностика промышленных трубопроводов  
Диагностика промышленного оборудования  
Диагностика запорной арматуры  
Диагностика оборудования компрессорных, насосных и распределительных станций  
Прочность и оценка остаточного ресурса трубопроводов и оборудования  
Проблемы продления ресурса оборудования и объектов  
Проблемы защиты от коррозии  
Организация мониторинга

Новые разработки в области диагностических средств  
Новые технологии в эксплуатации компрессорных станций  
Внедрение методов и средств технической диагностики, опыт эксплуатации  
Проблемы экологического мониторинга  
Обучение и сертификация персонала  
Сертификация средств контроля  
Стандартизация в области НК и ТД

*В рамках конференции состоится выставка приборов и оборудования, услуг и материалов для диагностики трубопроводов*

#### ОРГАНИЗАТОРЫ ВЫСТАВКИ

*Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике  
Правительство Москвы  
Министерство топлива и энергетики РФ  
Министерство науки и технологии РФ  
Российская академия наук*

*ОАО «Газпром»  
ОАО «Лукойл»  
ОАО «Сибнефтепровод»  
Государственная академия нефти и газа  
ПО «Спецнефтегаз»  
ЗАО «МНПО Спектр»*



По вопросам участия просьба обращаться в оргкомитет по адресу:  
Россия 119048, Москва, ул. Усачева, 35, оргкомитет конференции  
Тел.: (095) 245 57 68 (Филинов В. Н.), (095) 245 51 83 (Войнева Л. Б.), (095) 245 31 94 (Гребенкина Т. Ф.),  
(095) 245 57 17 — выставка (Турбов Б. В.). Факс (095) 224 68 88; E-mail: spectr@co.ru

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ «ДЫШАЩЕЙ» ТРЕЩИНЫ В КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

А. Б. РОЙТМАН, О. А. ТИТОВА

Продолжительное время целью многочисленных исследований является разработка относительно простых и надежных методов неразрушающей диагностики повреждений ответственных и дорогостоящих элементов конструкций. Работа [1] представляет собой обзор (более ста статей) индикаторов повреждений (диагностических функций), которые можно использовать для диагностики трещин в элементах машиностроительных конструкций с указанием их преимуществ и недостатков. Рассмотрены основные типы индикаторов, основанные на использовании: собственных частот; модальных форм; демпфирования; антирезонансных частот; амплитуд вынужденных колебаний; дополнительных резонансных частот; связанных колебаний; фазовых кривых, а также переходные или супергармонические индикаторы. Каждый из них имеет существенные недостатки. Отмечено, что наиболее простым для измерений с относительно высоким уровнем точности является метод собственных частот.

Индикаторы трещины, расположенной на наружной поверхности замкнутой круговой цилиндрической оболочки (рис. 1), приведены в работах [2–7]. В них рассмотрены индикаторы, использующие собственные частоты и модальные формы колебаний.

Результаты, приведенные в работах [2, 3, 5], верны как для случая, когда трещина расположена на наружной поверхности, так и для случая, когда трещина расположена на внутренней поверхности оболочки.

Целью настоящей работы была разработка аналитического подхода, позволяющего получить инженерные выражения для определения параметров колебаний замкнутой цилиндрической оболочки с круговой наружной «дышащей» трещиной, расположенной посередине, с использованием результатов работ [2–7].

**Основные гипотезы.** При исследовании поставленной задачи сделаем некоторые допущения, основанные на известных теоретических и экспериментальных результатах.

Сформулируем предположения о размерах возмущенного поля при малых размерах трещин в оболочке (рис. 1).

1. Коэффициент интенсивности напряжений и величина раскрытия трещины в оболочке совпадают с соответствующими значениями для полосы конечной длины с поперечной краевой трещиной при чистом изгибе, полученными теоретически численными методами и приведенными в [8].

2. Параметры поля напряжений замкнутой круговой цилиндрической оболочки вдоль образующей (ось  $x$ ) соответствуют полю напряжений, возникаю-

щему при растяжении полосы с эллиптическим отверстием вида  $x^2/c^2 + y^2/b^2 = 1$  при  $b \rightarrow \infty$  (ось  $y$  направлена по касательной к срединной поверхности оболочки и перпендикулярна оси  $x$ ) и полученному экспериментально в работе [9].

3. Параметры поля напряжений по толщине оболочки (ось  $z$ ), соответствующие случаю чистого изгиба полосы с прямоугольным вырезом, получены экспериментально в [9].

Предполагаем, что при раскрытии трещины в объеме материала, соответствующем зоне ее влияния, упругая энергия деформации исчезает.

**Индикаторы трещин, расположенных по всей поверхности оболочки.** Положим, что зона влияния трещин распространяется на величину  $h_1$  в глубину оболочки и имеет длину  $l$ .

Согласно [10] уравнения свободных осесимметричных изгибных колебаний для круговых цилиндрических оболочек без трещин можно записать в виде

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - k_T^4 w = 0; \quad k_T^4 = \frac{\rho h \omega^2 l^4}{D} - \frac{12(1-\nu^2)l^4}{h^2 a^2}. \quad (1)$$

Здесь  $\rho = \gamma/g$ , где  $\gamma$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>,  $g$  — ускорение земного тяготения, м/с<sup>2</sup>;  $\omega$  — круговая частота колебаний, рад/с;  $D$  — цилиндрическая жесткость, кг·м;  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Рассмотрим форму колебаний оболочки, при которой [10]

$$w = A \sin \frac{\pi x}{l} \cos \omega t, \quad (2)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний, м;  $t$  — время колебаний, с.

Предположим, что колебания оболочки начнутся из положения, в котором она находилась под действием наружного давления, а затем нагрузка мгновенно снимается. В этот момент времени слои оболочки, в которых расположена трещина, сжаты. Совершая изгибные колебания, оболочка проходит нейтральное положение, трещина раскрывается. Затем оболочка снова проходит нейтральное поло-

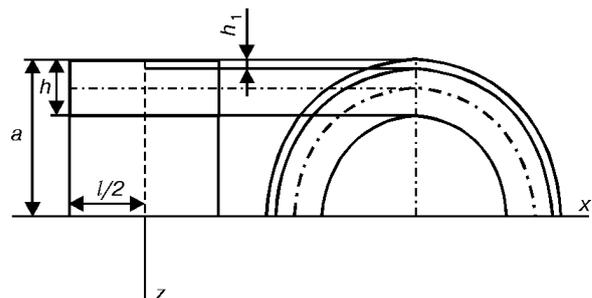


Рис. 1. Схема оболочки с трещиной.

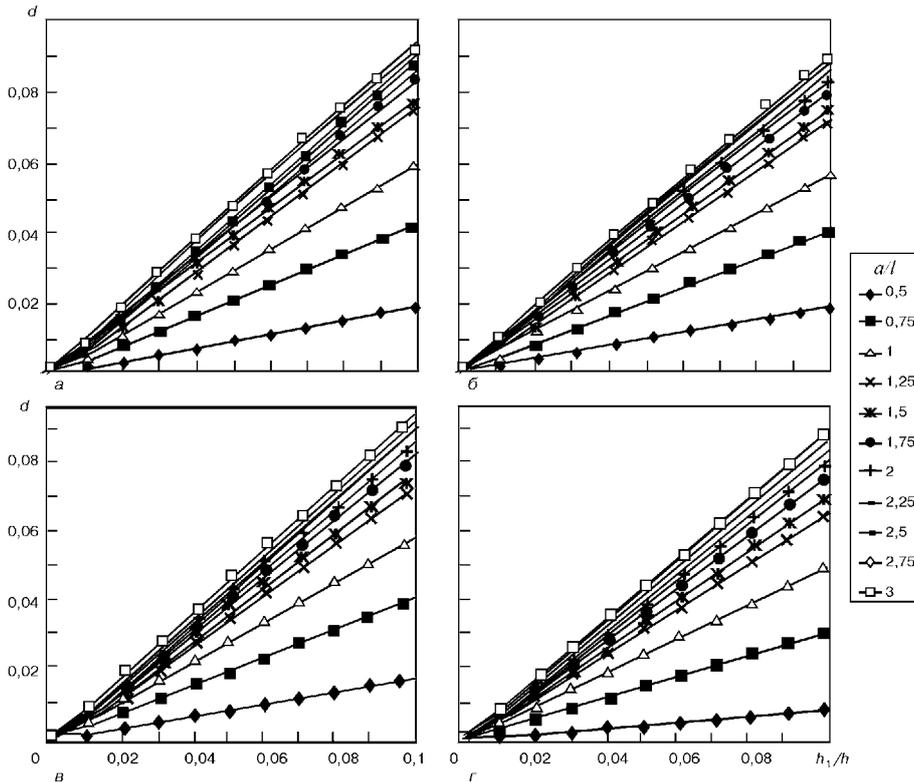


Рис. 2. Зависимости диагностической функции  $d$  от  $h_1/h$  в случае разных  $a/l$  для меди (а), чугуна (б), бетона (е) и стекла (з).

жение, трещина закрывается, и оболочка достигает исходного положения.

В работах [2, 3] использован следующий подход для определения параметров колебаний оболочки. Нахождение частоты колебаний оболочки сводится к решению алгебраического уравнения относительно  $\nabla$ :

$$\nabla^3 - K_2 \nabla^2 + K_1 \nabla - K_0 = 0, \quad (3)$$

где  $\nabla = 4(1 - \nu^2 \pi^2 f^2 a^2 / g)$ ;  $f = \omega / 2\pi$ ;  $E$  — модуль Юнга, Па;

$$K_0 = \frac{1}{2} (1 - \nu^2)(1 + \nu) \lambda^4 + \frac{(1 - \nu)}{2} b [\lambda^8 + 4(1 - \nu^2) \lambda^4];$$

$$K_1 = \frac{(1 - \nu)}{2} \lambda^4 + \frac{1}{2} (3 - \nu - 2\nu^2) \lambda^2 + b \left[ \frac{1}{2} (3 - \nu) \lambda^6 + 2(1 - \nu) \lambda^4 + 2(1 - \nu) \lambda^2 \right]; \quad (4)$$

$$K_2 = 1 + \frac{3 - \nu}{2} \lambda^2 + b [\lambda^4 + 2(1 - \nu) \lambda^2]; \quad \lambda = \frac{\pi a}{l}; \quad b = \frac{h^2}{12a^2}.$$

Наинизший корень уравнения (3) приближенно находится по формуле

$$\nabla \approx \frac{K_0}{K_1} + \left( \frac{K_0}{K_1} \right)^2 \frac{K_2}{K_1}. \quad (5)$$

Предполагалось, что за полный период цикла колебаний проявляются две частоты, соответствующие закрытой ( $\omega_0$ ) и открытой ( $\omega_1$ ) трещинам. Для нахождения этих частот параметры  $\omega$  и  $h$  имеют вид:

$$\omega = \begin{cases} \omega_0, & \text{трещина закрыта,} \\ \omega_1, & \text{трещина открыта,} \end{cases} \quad (6)$$

$$h = \begin{cases} h, & \text{трещина закрыта,} \\ h - h_1, & \text{трещина открыта.} \end{cases}$$

Полный период колебаний можно записать в виде

$$T = \frac{\pi}{\omega_0} + \frac{\pi}{\omega_1} = \frac{\pi (\omega_1 + \omega_0)}{\omega_1 \omega_0}. \quad (7)$$

Колебания проходят с усредненной частотой  $\bar{\omega} = 2\pi / T = 2\omega_1 \omega_0 / (\omega_1 + \omega_0)$ .

Для различных временных промежутков цикла  $\omega$  запишем в виде

$$\omega = \begin{cases} A_2 \sin \frac{\pi x}{l} \cos \omega_0 t, & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{2\omega_0} \quad (а), \\ A_1 \sin \frac{\pi x}{l} \cos \omega_1 t, & \frac{\pi}{2\omega_1} \leq t \leq \frac{3\pi}{2\omega_1} \quad (б), \\ A_2 \sin \frac{\pi x}{l} \cos \omega_0 (t - \frac{2\pi}{\omega_1} + \frac{2\pi}{\omega_0}), & \frac{2\pi}{\omega_1} - \frac{\pi}{2\omega_0} \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega_1} \quad (а). \end{cases} \quad (8)$$

Здесь  $A_1, A_2$  — амплитуды колебаний соответственно с  $a$  — закрытой трещиной;  $b$  — открытой трещиной.

Предположим, что полное открытие (закрытие) трещины при переходе нейтрального положения происходит за малый промежуток времени  $\Delta t = \pi / 2\omega_1 - \pi / 2\omega_0$ . При небольших трещинах  $\omega_1 \approx \omega_0$  и  $\Delta t \approx 0$ , а процесс описывается выражением (8). Разложим последнее в ряд Фурье, приняв  $A_1 = A_2 = A$ :

$$w(x, t) = A \sin \frac{\pi x}{l} \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos k\bar{\omega}t + b_k \sin k\bar{\omega}t) \right], \quad (9)$$

где

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T w(x, t) \cos k\bar{\omega}t dt, \quad k \in [0, \infty]; \quad (10)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T w(x, t) \sin k\bar{\omega}t dt, \quad k \in [1, \infty].$$

В данном случае индикатором трещины могут быть значения диагностической функции

$$d = \frac{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \quad (11)$$

Значения коэффициентов  $a_1, a_2, b_1, b_2$  приведены в [2].

Построены графики зависимости диагностической функции  $d$  от  $h_1/h$  и  $a/l$ . В работе [2] приведены результаты для магниевых сплавов и цинка, в [3] — для стали 25 и алюминия, в настоящей работе — для меди, чугуна, бетона и стекла (рис. 2).

**Собственные частоты колебаний оболочки с трещиной (см. рис. 1).** Имитация возмущенного поля напряжений в случае изгиба цилиндрической оболочки с трещиной приведена на рис. 3.

В статье [11] показано, что при малых значениях трещины оценка параметра  $\Delta$ , описывающего зону влияния раскрытой поперечной краевой трещины, может быть реализована с незначительным отклонением с помощью любой формулы из работ [8, 12–14]. По мнению авторов, наиболее удобное для инженерной практики соотношение

$$\Delta = 2,5Pl(1 - \nu)h_1/Gh^2b. \quad (12)$$

Для определения частот колебаний оболочки с трещиной и без нее используем следующий энергетический подход. Считаем, что система консервативна, т. е.  $K + \Pi = \text{const}$ , где  $K, \Pi$  — соответственно кинетическая и потенциальная энергия колебаний оболочки. Совершая колебания, оболочка проходит положения, в одном из которых  $K = K_{\text{max}}, \Pi = 0$ , а в другом  $K = 0, \Pi = \Pi_{\text{max}}$ . Исходя из консервативности системы, получаем

$$K_{\text{max}} = \Pi_{\text{max}}. \quad (13)$$

Вычислив  $K_{\text{max}}$  и  $\Pi_{\text{max}}$  по формулам из работы [10], для колебаний оболочки без трещины получим частоту колебаний

$$\omega_0 = \left[ \frac{D}{\rho(1 - \nu^2)} \left( \frac{h^2 \pi^4}{12l^4} + \frac{1}{a^2} \right) \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Для оболочки с трещиной максимальная кинетическая энергия колебаний оболочки с трещиной имеет вид

$$K = \frac{1}{2} \rho \omega_0^2 \pi A_1^2 h l. \quad (15)$$

Максимальную потенциальную энергию колебаний оболочки для различных имитаций открытия трещины вычислим по формуле [10]

$$\Pi = \frac{E}{2(1 - \nu^2)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{h}{2} - \delta} \left[ \left( z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{w}{a} \right)^2 + 2\nu z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{w}{a} \right] dz d\beta dx. \quad (16)$$

Здесь  $\delta$  — параметр, определяющий глубину трещины в зависимости от момента времени и значения  $x, m$ ;  $\beta$  — угол поворота, который отсчитывается в плоскости, проходящей через точку оболочки перпендикулярно оси симметрии срединной поверхности оболочки, рад.

Например, для случая, изображенного на рис. 3, а,

$$\delta = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \frac{l - \Delta}{2}; \\ \frac{4}{3}h_1, & \frac{l - \Delta}{2} \leq x \leq \frac{l + \Delta}{2}; \\ 0, & \frac{l + \Delta}{2} \leq x \leq l. \end{cases} \quad (17)$$

Для определения частоты колебаний оболочки с трещиной, т. е. имитации трещины, показанной на рис. 3, а, с помощью формул (15) и (16) получим следующее выражение:

$$\omega_1^2 = \frac{2D}{\rho(1 - \nu^2)hl} \left\{ \left( \frac{\pi^4 h^3}{12l^4} + \frac{h}{a^2} \right) \left( \frac{l - \Delta}{2} - \frac{l}{2\pi} \sin \frac{\pi \Delta}{l} \right) + \left[ \frac{\pi^4}{l^4} \frac{(h/2 - h_1)^3 + h^3/8}{3} + \frac{h - h_1}{a^2} - 2\nu \frac{\pi^2}{l^2 a} \frac{(h/2 - h_1)^2 - h^2/4}{2} \right] \right\} \left( \frac{\Delta}{2} + \frac{l}{2\pi} \sin \frac{\pi \Delta}{l} \right). \quad (18)$$

Аналогичны результаты и для других имитаций, которые из-за громоздкости не приводятся.

Графики зависимости отношения  $\omega_0/\omega_1$  от относительной глубины трещины приведены на рис. 4.

В работе [15] рассмотрен способ нахождения экспериментальных значений функции  $\tau_2/\tau_1$  при колебаниях элементов конструкций с трещинами, которая совпадает с рассмотренным в данной работе аналитическим индикатором трещин  $\omega_0/\omega_1$ .

**Амплитудные индикаторы трещины (см. рис. 1).** В работах [2, 6] предлагалось использовать в качестве признака существования трещины (из-за наличия открытой и закрытой) величину асимметрии цикла колебаний, под которой подразумевалось отношение амплитуд колебаний оболочки с трещиной и без нее.

В работе [2] найдены отношения амплитуд колебаний оболочки с трещиной и без нее для имитации эффекта открытия трещины в виде, изображенном на рис. 3, а, б.

Для отношения амплитуд колебаний оболочки с трещиной и без нее, изображенной на рис. 3, в, г, получены формулы, которые из-за громоздкости не приводятся.

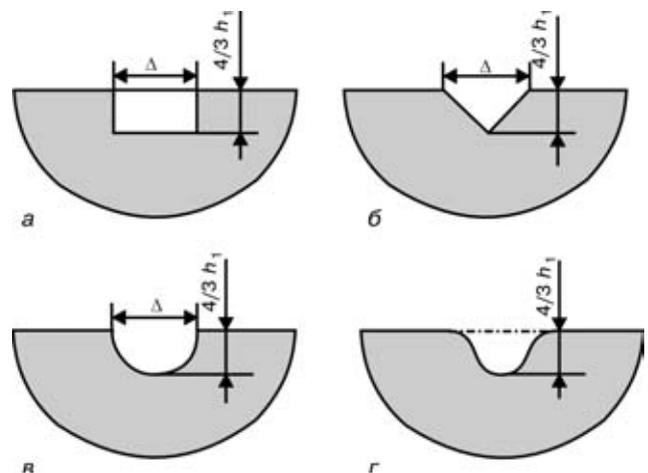


Рис. 3. Имитация зоны влияния трещины: прямоугольником (а), треугольником (б), эллипсом (в) и функцией вида  $f(x) = \alpha e^{-x^2/\sigma^2}$  (г).

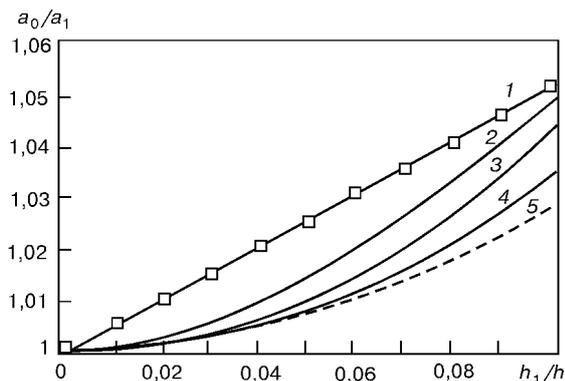


Рис. 4. Зависимость отношения частот колебаний для имитации влияния раскрытой трещины: 1 — по всей длине оболочки; 2-4 — изображенной соответственно на рис. 3, а, в, г, б.

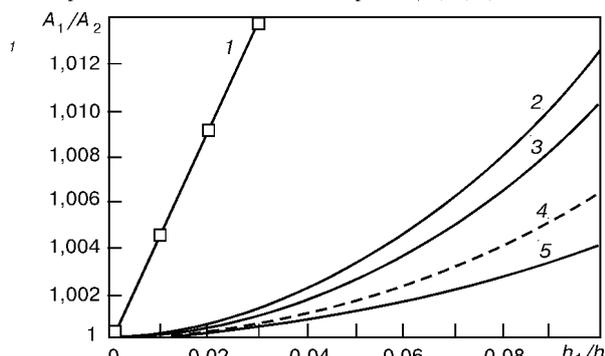


Рис. 5. Отношение амплитуд колебаний оболочки с трещиной и без нее для имитации влияния раскрытой трещины: 1 — по всей длине оболочки; 2-4 — изображенной соответственно на рис. 3, а-г.

На рис. 5 приведены графики зависимости отношения амплитуд от относительной глубины трещины  $h_1/h$ . Размер зоны влияния трещины выбирался по уравнению (12).

Из рисунка следует, что выбор типа имитации раскрытия трещины (см. рис. 3) является несущественным при  $h_1/h \leq 0,02$ . В этом случае следует различать  $A_1/A_2$  с точностью до 1 %, а экспериментатор для диагностики малых трещин может надежно использовать указанный участок рис. 4. Для больших размеров  $h_1/h$  следует использовать другие критерии.

1. *Krawczuk M., Ostachowicz W.* Damage indicators for diagnostic of fatigue cracks in structures by vibration measurements

Запорожский гос. ун-т

— a survey // J. of Theoret. and Appl. Mech. — 1996. — 34, № 2. — P. 307-326.

2. *Ройтман А. Б., Титова О. А.* Амплитудно-частотные характеристики и диагностика цилиндрической оболочки с круговой «дышащей» трещиной // Пробл. обчисл. механіки і міцності конструкцій. — Дніпропетровськ, 1999. — Т. 5. — С. 168-182.
3. *Ройтман А. Б., Титова О. А.* Колебания цилиндрической оболочки с круговой поперечной трещиной // Механика оболочек и пластин: Сб. докл. XIX Междунар. конф. по теории оболочек и пластин. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 1999. — С. 164-168.
4. *Титова О. А.* Диагностика трещин в цилиндрической оболочке // II Всеукр. молодіжна наук.-практ. конф. з міжнародною участю «Людина і космос»: 36. тез. — Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2000. — С. 97.
5. *Шушканова С. Ф., Титова О. О.* Імітація відкриття тріщини при коливаннях циліндричної оболонки з пошкодженнями // Вісник Запорізьк. держ. ун-ту: Збірн. наук. статей. Фізико-математичні науки. — 2000. — № 1. — С. 157-159.
6. *Roytman A., Shamrovsky A., Titova O.* Diagnostics of longitudinal crack in the closed cylinder shell // Proc. of the intern. conf. «Mechanika-2000». — Kaunas: Technologija, 2000. — P. 323-328.
7. *Ройтман А. Б., Александрова Н. Б., Христенко Т. А.* Вибрационная диагностика «дышащих» трещин в изделиях // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 1. — С. 58-67.
8. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2 т. / Под ред. Ю. Мураками. Пер. с англ. — М.: Мир. — 1990. — Т.2. — С. 453-1016.*
9. *Савин Г. Н.* Распределение напряжений около отверстий. — Киев: Наук. думка, 1968. — 888 с.
10. *Гонткевич В. С.* Собственные колебания пластинок и оболочек. Справ. пособие. — Киев: Наук. думка, 1964. — 288 с.
11. *Ройтман А. Б., Титова О. А.* Обоснование аналитических моделей диагностирования «дышащих» трещин в элементах конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 3. — С. 27-33.
12. *Грабовски Б.* Вибрационные свойства ротора турбины с поперечной трещиной // Тр. Амер. О-ва инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. — 1980. — 102, №1. — С. 98-104.
13. *Матвеев В. В., Бовсуновский А. П.* К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщение 2. Изгибные колебания. Аналитическое решение // Пробл. прочности. — 1998. — № 6. — С. 9-22.
14. *Бовсуновский А. П.* К вопросу об определении собственной частоты поперечных и продольных колебаний стержня с трещиной. Сообщение 1. Аналитический подход // Там же. — 1999. — № 2. — С. 35-44.
15. *Ройтман А. Б.* Экспериментальная оценка асимметрии цикла поперечных колебаний образцов с поперечными вырезами // Там же. — 2000. — № 3. — С. 120-124.

Поступила в редакцию  
14.09.2000

# СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ШВОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

А. Н. КОЗИН, Е. А. ДАВЫДОВ

При определении типа дефекта и измерении его высоты в кольцевых сварных швах толщиной 10...18 мм возникает ряд трудностей, которые вызваны геометрией зоны контроля. Поэтому нормативный документ ВСН 012-88 «Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ» не регламентирует определение типа и высоты дефектов. К тому же положения этого документа предназначены для использования при строительстве или ремонте магистральных трубопроводов, т.е. когда есть возможность при обнаружении дефектов произвести ремонт с выборкой дефектного участка сварного шва, возможно, и не представляющего особой опасности.

При эксплуатации часто такой возможности нет, так как остановка участка магистрального трубопровода несет большой экономический и экологический ущерб. Поэтому необходимы точные данные о характере дефекта, его длине и высоте, которые используются для расчета на прочность сварного шва и принятия решения о его ремонте.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины по заказу ЦТД «Диаскан» АК «Транснефть» проведены исследования возможности определения высоты трещиноподобных дефектов на модельных сварных швах с искусственными дефектами. Результаты исследований были использованы при УЗ контроле кольцевых сварных швов магистрального нефтепровода «Дружба», которые выбраны по данным прогнозов внутритрубного магнитного снаряда высокого разрешения фирмы РП (Великобритания), позволяющего проводить грубую оценку типа и высоты дефектов в кольцевых сварных швах.

**Объект исследований.** Для УЗ контроля выбрана обечайка, изготовленная из стали 17ГС1, с кольцевым сварным швом, выполненным ручной электродуговой сваркой. Диаметр обечайки 800 мм,

толщина 11,7 мм. Разделка сварного шва имела переменную по высоте V-образную геометрию, которая изменялась вдоль шва.

На обечайке реализована одно- и двухсторонняя сварка, что позволило создать модели плоскостных дефектов различной высоты в нижней и средней части сварного шва. Сварной шов в некоторых местах имел смещение кромок до 2,5–3 мм, что соответствует реальной практике изготовления трубопроводов.

**Результаты УЗ контроля эхо-методом.** УЗ контроль проводился системой P-scan (Дания) путем одновременного поперечно-продольного сканирования с обеих сторон сварного шва двумя наклонными УЗ преобразователями Krautkramer MWB 4 (частота 4 МГц) с углами ввода поперечных УЗ волн в металл 60° и 70°. Использовались схемы контроля прямым и однократно отраженным лучом с углом ввода 70° и одно- и двукратно отраженным лучом с углом ввода 60°.

Для оценки результатов УЗ контроля использовался документ «ВСН 012-88. Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ». Для классификации отражателей по типу использовались положения «ГОСТ 14782–86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые».

На основании анализа результатов УЗ контроля сварного шва выбраны участки, на которых амплитуда отраженного сигнала от несплошностей превышала браковочный уровень, и тип этих несплошностей был определен как плоскостной. На этих участках для выбранных поперечных сечений измерялась высота дефектов по правилу «–6 дБ».

Для определения ошибок измерения выполнены металлографические исследования макрошлифов поперечных сечений кольцевого сварного шва, в которых проводилось измерение высоты дефектов

Таблица 1. Сопоставление данных ультразвукового контроля (эхо-метод) и металлографических исследований

Номер дефекта	Координата по длине, мм	Описание дефекта по данным УЗК			Описание дефекта по данным металлографии		Ошибка УЗ измерений			
		Тип дефекта	Высота, мм		Тип дефекта	Высота, мм	мм		%	
			70°	60°			70°	60°	70°	60°
1	905	Протяженный, плоскостной в корне	3,7	5,6	Непровар в корне	2,5	1,2	3,1	48	124
2	1360	«	5,7	3,9	«	5,9	–0,2	–2,0	3	34
3	1752	«	4,2	9,4	«	1,8	2,4	7,6	133	422
4	1980	«	4,7	4,3	«	3,1	1,6	1,2	51	39
5	2210	«	5,0	7,7	«	4,0	1,0	3,3	25	92
Средняя ошибка									43	118

Таблица 2. Сопоставление данных УЗ контроля волнами дифракции и металлографических исследований

Номер дефекта	Координата, мм	Описание дефекта по данным УЗК		Описание дефекта по данным металлографии		Ошибка УЗ измерений	
		Тип дефекта	Высота, мм	Тип дефекта	Высота, мм	мм	%
1	905	Протяженный, плоскостной в корне	2,7	Непровар в корне	2,5	0,2	8
2	1360	«	5,5	«	5,9	-0,4	7
3	1752	«	2,3	«	1,8	0,5	27
4	1980	«	3,7	«	3,1	0,6	19
5	2210	«	3,8	«	4,0	-0,2	5
Средняя ошибка						0,38	11

ультразвуковым методом. Высота дефектов измерялась инструментальным микроскопом с точностью  $\pm 0,1$  мм.

В табл. 1 приведены сравнительные результаты УЗ контроля эхо-методом и металлографических исследований.

Поскольку все дефекты расположены в прикорневой части сварного шва, то их высота определяется как разность между толщиной стенки обечайки и минимальной глубиной расположения отражателя. Из таблицы видно, что достигнута сопоставимая, по сравнению с другими литературными источниками, точность измерения высоты дефектов.

Данные об ошибках измерения высоты дефектов УЗ эхо-методом показывают, что их использование неприемлемо для прочностных методов расчета, кроме того, при контроле на реальных объектах ошибки измерения высоты могут достигать значительно больших величин.

**Результаты УЗ контроля волнами дифракции.**

Для определения высоты дефектов также использовался метод волн дифракции (TOFD), реализованный на системе P-scan. Этот метод использовался в поперечных сечениях участков сварного шва, где на первом этапе эхо-методом были обнаружены дефекты. Поперечное сканирование проводилось двумя преобразователями, развернутыми навстречу друг другу и размещенными с обеих сторон сварного шва. Использовались УЗ преобразователи фирмы Panametrics (10 МГц) с углом ввода продольных УЗ волн 60°. Для определения точности измерения высоты дефектов проводили металлографию образцов (фактически металлографический анализ проводился один раз после проведения всех работ по УЗК). Результаты УЗ контроля и данные металлографии приведены в табл. 2.

Из данных таблицы видно, что ошибки измерения высоты дефектов методом волн дифракции значительно меньше, чем при использовании традиционных амплитудных измерений эхо-методом. Среднее абсолютное отклонение высоты дефектов для метода волн дифракции составило 11 % против 43 % и 118 % при использовании амплитудного метода «-6дБ».

Сравнение результатов УЗ контроля эхо-методом и методом волн дифракции с данными металлографических исследований приведено на рис. 1 в графической форме.

Проведенные исследования обнаружения и измерения размеров плоскостных дефектов позволили разработать методику УЗ контроля кольцевых швов магистральных трубопроводов, которая состоит из двухэтапного контроля — на первом этапе с помощью УЗ амплитудных эхо-методов проводится обнаружение несплошностей, определяются размеры по длине, затем проводится их первичная классификация. На втором этапе — с использованием временных методов, в частности метода волн дифракции проводится измерение высоты дефектов и их повторная классификация, которая позволяет уточнить тип дефекта.

**УЗ контроль магистрального трубопровода.**

Разработанная методика испытана при экспертном УЗ контроле отдельных участков линейной части нефтепровода «Дружба» диаметром 1020 и 1220 мм. Работа была направлена на перепроверку результатов НК, полученных при магнитном контроле внутритрубными приборами высокого разрешения английской фирмы РП. По результатам магнитного контроля отобрано 29 участков в 18 сварных швах, которые были классифицированы, как имеющие плоскостные дефекты высотой от 40 до 90% толщи-

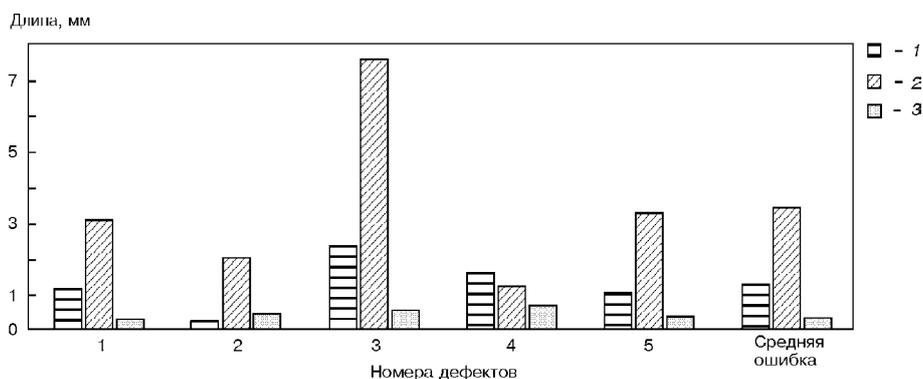


Рис. 1. Сравнение результатов измерений, выполненных амплитудным методом («-6 дБ») и методом волн дифракции с данными металлографии: 1 — ошибка УЗК (60); 2 — ошибка УЗК (70); 3 — ошибка УЗК (волны дифракции).

ны стенки трубопровода (номинальная толщина стенки 12 мм).

Экспертный контроль на ряде сварных швов, также проводили специалисты других организаций: «Оргтехдиагностика» (система «Скаруч», механизированный контроль по ВСН 012-88), ЦТД «ДИ-АСКАН» (дефектоскоп USN 50, ручной контроль по ВСН 012-88), фирма РП (дефектоскоп USL-38, ручной контроль по британскому стандарту).

Во многих случаях результаты магнитного контроля внутритрубным снарядом не были подтверждены при УЗ контроле, причем большинство оценок высоты дефектов по результатам УЗ контроля были существенно меньшими.

Для определения показателей достоверности магнитного и УЗ контроля и оценки точности определения высоты дефектов по результатам УЗ контроля некоторые сварные швы были вырезаны для проведения разрушающих испытаний, что дало возможность выполнить металлографические исследования в местах проведения НК.

На рис.2 приведена гистограмма результатов измерений в сравнении с данными металлографических исследований. Величины средней абсолютной ошибки измерений между данными НК и металлографии представлены на рис. 3. Как следует из таблицы, результаты, полученные специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины по разработанной методике хорошо совпадают с результатами металлографии. К сожалению, ограниченный объем металлографических исследований не позволяет корректно рассчитать показатели достоверности выполненных УЗ измерений.

Результаты измерений, выполненные различными способами, сильно отличаются. На основании приведенных данных следует отметить, что ошибки в измерении высоты дефектов амплитудными методами могут достигать сотни процентов. Точность измерений зависит не только от характера и осо-

бенностей несплошности, но и от критериев самой процедуры оценки высоты.

Средняя абсолютная ошибка измерения высоты трещиноподобных дефектов магнитным внутритрубным снарядом достигает 6,7 мм, что свидетельствует о необходимости перепроверки данных о высоте дефектов другими методами НК.

Средняя абсолютная ошибка измерения высоты дефектов амплитудными методами (по данным РП и Оргтехдиагностика) колебалась в пределах от 2 до 3,7 мм, что неприемлемо на толщине 10...12 мм.

Средняя ошибка измерения высоты обнаруженных дефектов методом волн дифракции составила 0,4 мм. Максимальная ошибка определения высоты дефектов методом TOFD по данным металлографии достигала 1 мм, что является вполне допустимым при проведении прочностных расчетов.

**ВЫВОДЫ**

Экспериментально подтверждено, что УЗ контроль кольцевых сварных швов по ВСН 012-88 «Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ» приводит к недопустимым ошибкам при определении типа и высоты дефектов.

Проведена экспериментальная проверка классификации и определения высоты дефектов методом волн дифракции, которая подтвердила эффективность применения систем типа Р-scan для этих целей.

Разработана методика двухэтапного УЗ контроля кольцевых сварных швов магистральных трубопроводов, которая позволяет существенно повысить вероятность определения типа дефектов и уменьшить погрешность измерения его высоты.

Показано, что НК с определением размеров дефектов магнитными внутритрубными снарядами, в большинстве случаев имеет существенную перебраковку как по обнаружению дефектов, так и по измерению их высоты. В большинстве случаев переб-

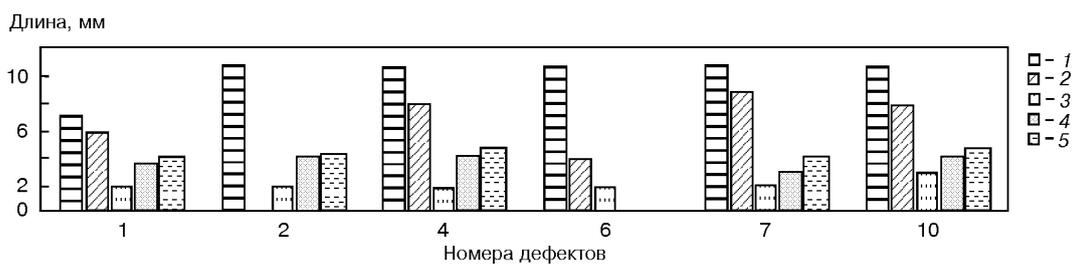


Рис. 2. Сравнение результатов измерений высоты плоскостных дефектов магнитным и УЗ методами с данными металлографии: 1 – МК; 2 – УЗК I; 3 – УЗК II; 4 – УЗК III; 5 – металлография.

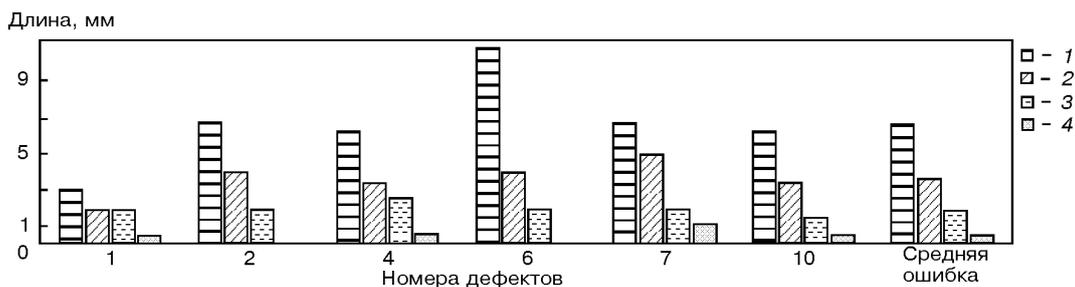


Рис. 3. Абсолютная ошибка измерений высоты плоскостных дефектов магнитным и УЗ методами: 1 – МК; 2 – УЗК I; 3 – УЗК II; 4 – УЗК III.

раковка вызвана нарушениями формы сварного шва за счет смещения кромок, овальности и разнотолщинности труб, превышения норм высоты облицовочного валика и др.

Во всех случаях проведения металлографических исследований сварных швов магистрального трубопровода было подтверждено наличие или отсутствие дефектов, обнаруженных и образмеренных методом волн дифракции, что свидетельствует о высокой достоверности этого метода.

Показана высокая эффективность применения метода волн дифракции для измерения высоты трещиноподных дефектов в сварных швах в диапазоне

толщины 10...18 мм, что дает возможность использовать эти данные для расчетов на прочность и прогнозирования остаточного ресурса.

Таким образом, появляется возможность объективно определить риск дальнейшей эксплуатации кольцевых сварных швов с дефектами и обоснованно разработать программу ремонтных работ.

Более подробную информацию по контролю сварных швов трубопроводов можно получить по адресу:

03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11,

Институт электросварки им. Е. О. Патона.

Тел.: (044) 261-51-96, факс: (044) 220-94-82.

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

*Поступила в редакцию  
15.03.2001*

**УКРАИНСКАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
МОНТАЖНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ  
«УКРМОНТАЖСПЕЦСТРОЙ»**

**Открытое Акционерное Общество  
«ДОНБАССАНТЕХМОНТАЖ»**

Открытое Акционерное Общество «Донбассантехмонтаж» располагает современным оборудованием с энергосберегающими технологиями, которые с успехом применяются специалистами предприятия при монтаже, ремонте и наладке санитарно-технических систем жилых и промышленных зданий, тепловых сетей, котельных, тепловых пунктов, насосных и др. энергетического оборудования.

**Предприятие осуществляет:**

- ✓ разработку проектно-технической документации по строительству и реконструкции: котельных с паровыми котлами (рабочее давление до 4,0 МПа) и водогрейными котлами (температура теплоносителя до 150 °С); инженерных сетей и систем, ГРП (ГРУ), систем газоснабжения до 1,2 МПа, систем газоснабжения промпредприятий, КБО, ж/а с установкой счетчиков расхода газа;
- ✓ пуско-наладочные работы, наладочные работы тепловых режимов, КИП и А, водохимических режимов паровых котлов с рабочим давлением до 4,0 МПа и водогрейных котлов с температурой нагрева воды до 150 °С;
- ✓ изготовление котельного оборудования, тепловых и водогрейных узлов, циклонов, скрубберов, грязевиков, расширительных баков, емкостей любого объема и др. изделий;
- ✓ ремонт водогрейных котлов с температурой нагрева до 150 °С и элементов трубных поверхностей нагрева паровых котлов давлением до 1,3 МПа;
- ✓ инвентаризацию вредных выбросов и проведение эколого-теплотехнических испытаний топливоиспользующих установок;
- ✓ монтаж наружных и внутренних систем газоснабжения, водоснабжения, отопления и канализации;
- ✓ проектирование, изготовление и монтаж систем вентиляции, аспирации, кондиционирования, пневмотранспорта;
- ✓ контроль качества сварных соединений трубопроводов;
- ✓ изготовление стальных оцинкованных труб со спирально-замковым швом, применяемых в качестве оболочки изолированных пенополиуретаном труб систем теплоснабжения;
- ✓ изоляцию трубопроводов полуцилиндрами из пенополиуретана, зарекомендовавших себя как ремонтно-пригодные при ремонте трубопроводов;
- ✓ изоляцию пенополиуретаном наружных поверхностей сосудов, емкостей, стен зданий и внутренней поверхности кровель любой конфигурации;
- ✓ изготовление и монтаж всех видов металлических конструкций;
- ✓ обмуровку и футеровку котлов и печей;
- ✓ все виды общестроительных работ;
- ✓ автотранспортные услуги (автоперевозки грузов, представление стоянки для всех видов автотранспорта, мелкий ремонт).

**340086, УКРАИНА, г. Донецк, ул. Артема, 27, тел.: (0622) 92-64-42  
87532, УКРАИНА, г. Мариуполь, пр. Ленина, 5/7, тел./факс: (0629) 33-13-94, 33-75-00**

## ИССЛЕДОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА

В. А. БАГРОВ

Штамповочное производство является одним из основных в металлообрабатывающих отраслях промышленности. Качество поковок и штампованных деталей в значительной мере определяется стойкостью инструмента-штампа. Анализ условий его работы показывает, что причинами его износа являются истирание, схватывание первого и второго рода, образование разгарных трещин, хрупкое разрушение, смятие и т. д. Одним из распространенных методов восстановления штамповочного инструмента является наплавка. Основными требованиями, предъявляемыми при этом к наплавочным сплавам являются износостойкость, разгаростойкость, теплостойкость, технологичность нанесения этих сплавов и последующей обработки. Высокая надежность и эффективность работы штамповочного инструмента в значительной мере зависит от своевременной и правильной оценки свойств как металла инструмента, так и восстановленных наплавкой рабочих поверхностей. В практике не уделяется должного внимания диагностике структурного состояния металла рабочей зоны, хотя в течение всего периода эксплуатации происходят непрерывные накапливающиеся структурные изменения, вызванные температурными и механическими воздействиями и влияющие на износостойкость и долговечность штамповочного инструмента.

При формировании полной и достоверной картины о структуре, механических свойствах и напряженном состоянии наплавленного металла с учетом зоны проплавления все большее применение получают физические методы контроля качества, среди которых предпочтение отдается неразрушающим [1]. Высокой чувствительностью к изменению структуры и напряженного состояния в металлах обладают методы коэрцитивной силы, контактной разности потенциалов, экзoeлектронной эмиссии, термоэлектрический и др.

Целью данной работы являлось повышение долговечности штамповочного инструмента путём восстановительной наплавки и установление взаимосвязи между электрофизическими свойствами и износостойкостью изучаемых сплавов.

Исследования производились на мартенситно-старееющих безникелевых сплавах системы Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ti–Si (сплав А), ограниченно легированных хромом. В качестве эталонов использовали мартенситно-старееющий сплав 08X6H8M7C и серийно применяемую при изготовлении штамповочного инструмента сталь 5ХНМ. Наплавка опытными порошковыми проволоками производилась на сварочном тракторе ТС-17 с подачей обесточенной порошковой проволоки в головную часть сварочной ванны на сталь 20 [2]. Образцы для исследования

износостойкости вырезались из верхней части наплавленного металла и подвергались термической обработке (выдержке в печи в течение 2 ч при температуре 873 К с последующим остыванием на воздухе). Подготовка поверхностей трения для исследования износостойкости сплавов и стали 5ХНМ проводилась шлифовкой на абразивной шкурке зернистостью М40 с последующей тонкой шлифовкой на ватмане с применением алмазной пасты АС 60/40. Твердость измерялась на приборе ТК-2 по шкале С. Лабораторные испытания износостойкости проводились на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме диск – колодка. При этом использовали следующие режимы трения: нагрузка на образец 50 Н; материал контртела – сталь 45 термообработанная твердостью HRC 48; скорость вращения контртела 0,5 м/с; длина пути трения 300 м. Определяли как линейный, так и массовый износ. Для установления взаимосвязи между износостойкостью и электрофизическими характеристиками сплавов был применен термоэлектрический метод, основанный на эффекте Зеебека [3], который базируется на взаимосвязи электрических и тепловых явлениях горячего спая. Сущность его заключается в том, что при подогреве спая двух разнородных металлов и наличии разности температур между ними в месте контакта наблюдается движение электронов и возникает термоэдс описываемая выражением

$$d\varepsilon = (\alpha_1 + \alpha_2)dT, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — термоэдс в цепи, мкВ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты термоэдс пары материалов, находящихся в контуре, мкВ/К;  $T$  — средняя температура контакта, К.

Измерение коэффициента термоэдс осуществлялось с помощью прибора, разработанного в лаборатории неразрушающего контроля Украинской инженерно-педагогической академии. Общий вид и блок-схема прибора приведены на рис. 1. В основу его работы положен принцип дифференциального контура, сущность которого состоит в измерении разности термоэдс, возникающей в местах контакта контролируемого образца с горячим электродом, а также последнего с эталоном. В данном приборе в качестве эталона применена медь М1. В связи с тем, что между термоэдс и температурой спая нет прямой зависимости, в приборе регистрируется коэффициент термоэдс. Его измерение осуществлялось следующим образом. Контролируемый металл 1 (рис. 1, б) устанавливался между холодным 2 и горячим 3 электродом. Термопара 4 и регулятор температуры 5 поддерживали температуру горячего электрода равной 343 К с помощью нагревателя 6. Таким образом, в цепи холодный электрод–образец — горячий электрод возникла термоэдс, значения

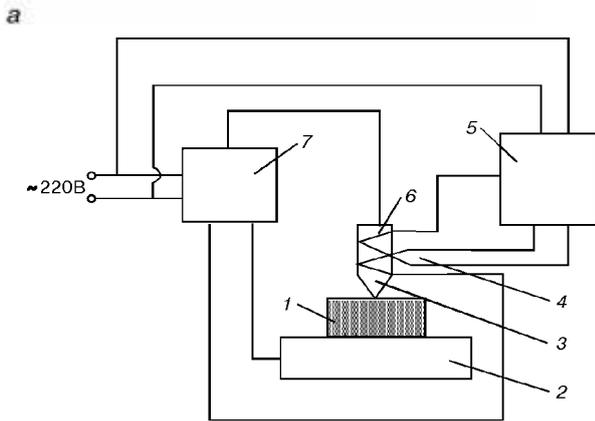


Рис. 1. Общий вид (а) и блок-схема (б) устройства для измерения коэффициента термоэдс (обозначения в тексте).

коэффициента которой снималось с цифрового измерительного устройства 7. Расчет суммарных термоэдс в контуре медь–сталь 45 и исследуемый сплав–медь проводился исходя из правила аддитивности с учетом знаков [3] по выражению

$$\epsilon_{1,3} = \epsilon_{1,2} + \epsilon_{2,3}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_{1,3}$ ,  $\epsilon_{1,2}$ ,  $\epsilon_{2,3}$  — термоэдс соответственно стали 45 и исследуемого сплава, стали 45 и горячего электрода, горячего электрода и исследуемого сплава.

В процессе измерений получены следующие значения коэффициентов термоэдс для исследуемых материалов: +3,7 — стали 5ХНМ; +3,8 — стали 45; +3,19 — сплава 08Х6Н8М7С; +5,9 — 35 ХГСА; -6,4 — сплава А. При этом положительные значения указывают на то, что ток протекает от исследуемого материала к горячему электроду, а отрицательные — в противоположном направлении.

Обработка результатов исследования износостойкости исследуемых сплавов на установке трения 2070 СМТ-1 показала, что мартенситностаряющие сплавы системы Fe–C–Cr–Mn–Mo–Ti–Si, имея приблизительно одинаковую твердость с эталонными материалами (сталью 5ХНМ и сплавом 08Х6Н8М7С), не уступают им по износостойкости (рис. 2), что можно объяснить наличием значительного количества карбидов титана и интерметаллических соединений [2, 4].

Анализ полученных результатов показывает, что значения коэффициентов термоэдс колеблются

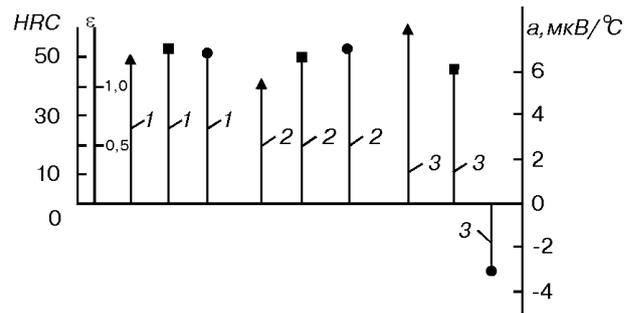


Рис. 2. Твердость (1), относительная износостойкость (2) и коэффициент термоэдс (3) относительно стали 45 сплавов: ● — А; ■ — 08Х6Н8М7С; ▲ — стали 5ХНМ.

в небольших пределах, и по ним с учетом разницы температур исследуемые сплавы можно разложить в термоэлектрический ряд: сплав А — с термоэдс -4,48 мВ; 08Х6Н8М7С — +2,23 мВ; 5ХНМ — +2,29 мВ; сталь 45 — +2,6 мВ; 35ХГСА — +4,13 мВ. Расчеты суммарных термоэдс в контуре сталь 45–исследуемый сплав показали, что термоток минимален в контуре сталь 45–сплав А (рис. 2).

Производственные испытания восстановленных наплавкой обесечных матриц горячего деформирования деталей из стали 35ХГСА подтвердили полученные результаты лабораторных исследований по установлению корреляции между износостойкостью и суммарным термоэлектрическим контактирующим материалов.

## ВЫВОДЫ

1. Для повышения износостойкости и долговечности гравюр штамповочного инструмента восстановительной наплавкой желательно применять сплавы, у которых в сочетании с маркой обрабатываемого материала суммарный коэффициент термоэдс стремится к нулю, что согласуется с положениями из работы [5].
2. Показана возможность применения термоэлектрического метода для подбора контактирующих пар с повышенной износостойкостью и долговечностью.

1. Троцкий В. А. Неразрушающий контроль сварных соединений — М.: Машиностроение. 1988. — 109 с.
2. Багров В. А., Кальянов В. Н. Дуговая наплавка сплавов системы Fe–C–Cr–Mn–Mn–Ti–Si с применением дополнительной присадки // Автомат. сварка. — 1999. — № 5. — С. 62–63.
3. Денель А. К. Дефектоскопия металлов — М.: Металлургия. 1972. — 304 с.
4. Багров В. А., Кальянов В. Н. Влияние обесеченной присадки на энергетические характеристики процессов дуговой наплавки и структуру наплавленного металла // Нов. решения в соврем. технологиях. Вестник ХГПУ. — 1999. — № 75. — С. 76–85.
5. Постников С. Н. Электрические явления при трении и резании. — Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1975. — 280 с.

## НОВЫЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ ПРИ ТЕПЛОВИМ КОНТРОЛЕ ТРУБОПРОВОДОВ

В. А. СТОРОЖЕНКО, С. И. МЕЛЬНИК, Ю. А. КУХАРЕВ

Несмотря на впечатляющие достижения конца XX века, у трубопроводного транспорта еще есть проблемы, которые не имеют научного и технического решения. Ученые наметили около семисот задач, которые нужно решить в первой половине столетия для процветания человечества. В их число вошли и проблемы трубопроводного транспорта.

Сегодня требуется выявлять следующие дефекты трубопроводов: расслоения в витых трубах, трещины из-за непроваров, коррозии или других причин, утечки, отклонения диаметра и толщины стенок трубы от заданных в нормативной документации (например, вследствие коррозии или отложений пыли), незаконные врезки в трубопровод. Часто требуется нанесение на карту места расположения (трассировка) трубопровода. Специфической проблемой погруженных трубопроводов в болотистой местности является их всплытие. Дело в том, что грунт не может зафиксировать трубу на нужной глубине, что приводит к изгибам в вертикальной плоскости, возникновению напряжений и в конечном счете — к разрыву трубы [1].

Развитие трубопроводного транспорта выдвигает новые требования к информативности проводимого контроля. Условно можно наметить два основных направления: упреждение возможности аварий (выявление дефектов на ранних стадиях развития) и оценку параметров дефекта в процессе контроля, его природы и причин возникновения, а также наносимого дефектом ущерба. Второе направление является диагностикой трубопроводов.

В настоящее время для определения дефектов в трубопроводах наиболее часто используются следующие методы: ультразвуковой, тепловой, визуальный, магнитовихревой, акустической эмиссии [2]. Каждый из них в отдельности не лишен недостатков, поэтому наиболее эффективной является комбинация методов. Например, в условиях производства для контроля трубы можно использовать ультразвуковой метод при предварительном выявлении внутренних дефектов с последующим рентгенографическим контролем аномальных мест для уточнения результатов [2]. Для контроля больших участков газопровода рационально применять тепловой метод с использованием лазерного анализатора спектра. При утечке газа из подземного трубопровода происходит охлаждение этого участка, которое можно зарегистрировать тепловизором. Но в то же время такую же температурную аномалию может вызвать и неоднородность грунта. Чтобы избежать неоднозначности, применяется газоанализатор, который с высокой точностью регистрирует наличие метана в атмосфере. Работы в этом направ-

лении успешно проводятся в Харьковском филиале УкрНИИгаза, а также и в России.

**Сущность задач тепловой диагностики трубопроводов.** По формальным признакам тепловая диагностика отличается от дефектотрии тем, что в первом случае требуется не только определение наличия дефекта и его параметров, но и заключение о работоспособности, остаточном ресурсе работы системы, ее опасности для окружающих и об ущербе, который наносит данный дефект. Эффективное проведение тепловой диагностики невозможно без глубокого анализа тепловых процессов, протекающих в объекте контроля (ОК), оптимизации на этой основе процесса контроля и создания моделей, адекватных протекающим в ОК процессам. Заключение о работоспособности системы невозможно сделать без знания теории прочности и усталостных разрушений. Физическая сущность метода тепловой диагностики основывается на фундаментальных положениях теплофизики, теории обработки и передачи информации, метрологии. Процедура проведения тепловой диагностики можно условно разделить на следующие этапы:

1. Получение необходимой исходной априорной информации об объекте контроля (параметры грунта, объекта контроля).

2. Получение данных с регистрирующих устройств (тепловизора, газоанализатора) и их первичная обработка (выявление наличия аномалии); обработка полученной информации и заключение о характере и параметрах дефекта и о работоспособности системы.

Априорную информацию получают перед началом проведения непосредственных измерений. К ней относится предварительное расположение трубопровода, его диаметр, давление и характер транспортируемого вещества, параметры грунта и многое другое. На втором этапе регистрируют тепловое поле на поверхности грунта при помощи тепловизора. Схема проведения второго этапа диагностики представлена на рис. 1. Трубопровод является источником первой составляющей теплового потока с поверхности грунта. Вторая составляющая обусловлена взаимодействием атмосферы с грунтом. Совместно эти два потока формируют температурное поле на поверхности. В случае утечки появляется третья составляющая, вызванная наличием вытекающего вещества. Через некоторое время в системе устанавливается тепловой баланс, то есть система входит в стационарный режим (рис. 2).

При проведении тепловой диагностики требуется решать обратную задачу теплопроводности: по температурному распределению на поверхности искать параметры объекта контроля. Данная задача является неустойчивой по отношению к малым ко-

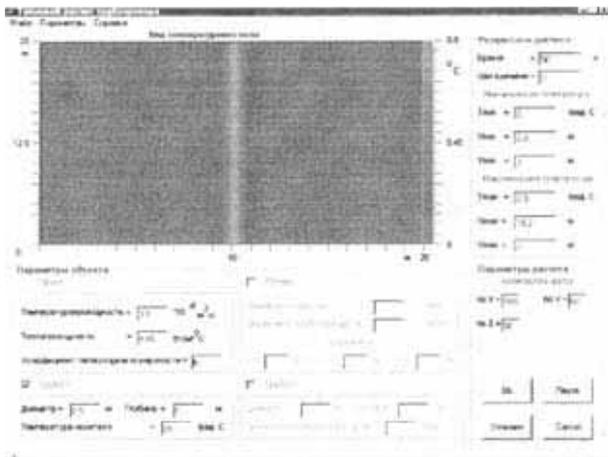


Рис. 2. Пример расчета температурного поля при помощи компьютерного моделирования.

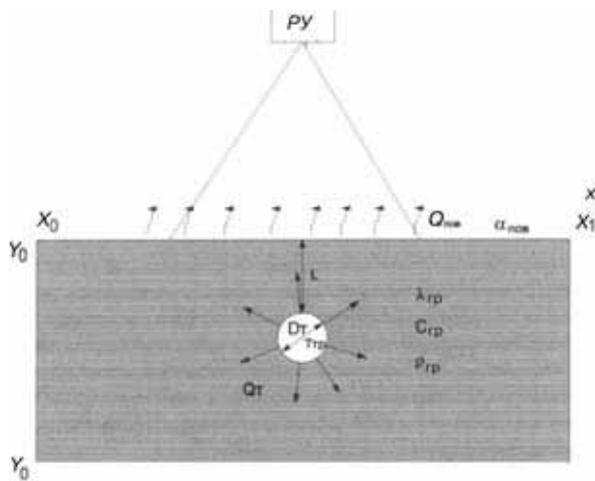


Рис. 1. Схема проведения второго этапа контроля трубопровода (РУ — регистрирующее устройство;  $D_t, T_{tr}$  — диаметр и температура трубы;  $Q_t, Q_{пов}$  — мощность теплового потока, выделяемого трубой и поверхностью;  $\lambda_{гр}, C_{гр}, \rho_{гр}$  — соответственно коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность грунта;  $\alpha_{пов}$  — коэффициент теплоотдачи поверхности).

лебаниям входного параметра (температуры). Так, например, причиной одного и того же распределения температуры могут служить две трубы с разным диаметром и температурой, проложенные на различной глубине, то есть имеющие различные параметры. В настоящее время существует два основных подхода к решению обратных задач теплопроводности:

1. Использование способов, основанных на аппроксимации геометрического распределения ТФХ в дефектных структурах гладкими функциями с последующей заменой исходного дифференциального уравнения более простым.
2. Решение группы прямых задач с последующим сближением экспериментальных и расчетных данных [4].

Аналитическое прямое решение задачи возможно только для ограниченного круга простых объектов. Найти его для данного случая достаточно затруднительно. Вторым способом для решения задачи являются численные методы (например, метод конечных разностей). В нашей лаборатории разработана компьютерная программа под Windows «Тру-

бопровод», позволяющая по задаваемым параметрам трубопровода, дефекта и грунта определять температурное распределение на поверхности грунта. В программе можно также задать начальное распределение температуры в грунте. Она также позволяет просматривать распределение температуры на различной глубине, в различных плоскостях и моментах времени. В программе также можно использовать точечные источники тепла, которые моделируют утечки жидких продуктов. Но такая модель не подходит для моделирования утечек газа из газопроводов большого давления, поэтому для такого дефекта она была разработана в УкрНИИГаза, где были проведены исследования в области определения утечек в газопроводах.

Программа «Трубопровод» тоже позволяет решать обратную задачу используя градиентный метод минимизации функционала. Проведена также работа по минимизации функционала с учетом шумов и характеристик объекта, что позволяет сократить количество итераций решений прямой задачи.

Как показал опыт использования компьютерной программы, точность ее результатов ограничена количеством шагов при проведении расчетов. В нашей программе использовалась сетка с количеством шагов  $100 \times 50 \times 50$ . Устойчивая работа программы при этом наблюдается на компьютере не ниже Pentium-I-200 с ОЗУ не ниже 32 МБ. Желательно наличие ОЗУ с объемом 64 МБ. На один шаг расчета при этом уходит около 7 мин, что, естественно, исключает работу программы в реальном режиме. Точность вычислений можно повысить используя симметричность тепловой модели. Проводя расчет только одной половины модели и используя соответствующие граничные условия, можно увеличить либо точность, либо скорость измерений. Однако такое упрощение возможно только в отдельных случаях.

Вторым ограничением решения обратных задач методом перебора прямых решений является невозможность варьирования более 1–2 исходными параметрами, что ограничивает возможность учета всех параметров и нахождения решений. В связи с этим остаются нерешенными такие проблемы, как оценка границ применимости тепловых методов к различным объектам трубопроводного транспорта и различным видам дефектов, а также определение минимальных размеров дефектов, выявляемых тепловыми методами.

Перспективными методами решения обратных задач, которые в последнее время находят все большее признание, являются численно-аналитические. Они во многом свободны от недостатков, свойственных численным методам. Большой опыт в решении задач теплопроводности накоплен в лаборатории теплового контроля Харьковского государственного технического университета радиоэлектроники. При помощи численно-аналитического метода решена задача определения дефектов в материалах в случае двух- и трехмерной модели при активном тепловом контроле [3].

При решении обратной задачи для учета теплоотдачи с поверхности по закону Ньютона нами предложена методика адаптации модели ОК. Ее сущ-

ность заключается в том, чтобы влияние поверхности смоделировать дополнительным распределенным по ней источником тепла с поверхностной плотностью

$$Q_{\text{пов}}(r, t) = 2\alpha_{\text{ст}}[T_{\text{ст}}(r, t) - T_{\text{о.с}}],$$

где  $T_{\text{о.с}}$  — температура окружающей среды.

Таким образом, используемая модель ОК, которая включает дополнительный распределенный источник тепла на наблюдаемой поверхности, адаптируется в зависимости от результатов измерений (схема с обратной связью). Используя данный метод, получено уравнение, аналитически связывающее тепловое распределение на поверхности грунта с параметрами трубопровода.

## ВЫВОДЫ

1. При контроле трубопроводов наиболее эффективной является комбинация нескольких методов контроля. Тепловой является важной составной частью контроля, имеющей большие перспективы развития ввиду возможности эффективного выявления дефектов в трубопроводах большой протяженности.

2. В настоящее время разработаны тепловые модели бездефектного трубопровода и дефекта типа утечка, реализована компьютерная программа, позволяющая решать обратную задачу при тепловом контроле методом конечных разностей с использованием градиентного метода минимизации функционала.

3. До сих пор не решены многие проблемы, связанные с решением обратной задачи теплового контроля, что требует создания новых методик как альтернативы численным методам (например, численно-аналитических).

1. *Иванцов О.* Время идет — проблемы остаются // Нефтегазовая вертикаль. — 1998. — № 4.
2. *Сергеев А. В., Мозговой А. В.* Комплексный подход к поиску утечек воды // III Укр. научно-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»: Зб. наук. праць. — Дніпропетровськ, 2000. — С. 201.
3. *Шевченко И. Я.* Неразрушающий контроль труб большого диаметра // II Укр. научно-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»: Зб. наук. праць. — Дніпропетровськ, 1997. — С.181.
4. *Орел Р. П.* Тепловая дефектометрия и томография изделий с локальными неоднородностями. — Дис. ... канд. техн. наук. — Харьков, 2000. — 154 с.

Харьков. гос. техн. ун-т радиотехники

Поступила в редакцию  
11.12.2000



## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ 24–28 сентября 2001 Россия, Волгоград СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ-2001

### Т е м а т и к а

- Физико-химические основы соединения разнородных материалов
- Математическое моделирование и механика композиционных материалов
- Автоматизированные методы проектирования композиционных материалов, узлов
- Структура и свойства слоистых композиционных материалов
- Технология получения слоистых композиционных материалов
- Технологическое оборудование и методы контроля

Тел.: (8442) 349941, 340642, 341600  
Факс: (8442) 349941, E-mail: lysak@vstu.zu, weld@vstu.zu

## ПІДСУМКИ РОБОТИ УТ НКТД ЗА 2000 РІК

Рік, що минув, був особливим не лише як останній рік століття і тисячоліття. Він був визначним і в історії Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. В цьому році ми відзначили 10-у річницю від дня його утворення. 16 листопада 1990 року Установча конференція прийняла Статут, обрала правління та голову, проголосивши тим самим про створення УТ НКТД.

Серед основних подій, що відбулися в 2000 році, були:

- **лютий** — семінар "Фізичні методи та засоби контролю середовища, матеріалів та виробів: ЛЕО-ТЕСТ" у с. Славське Львівської області;

- **лютий** — реєстрація в Держстандарті України Органу із сертифікації "НАКУНК" і початок сертифікації персоналу за системою УТ НКТД;

- **березень-травень** — професійний конкурс УТ НКТД у шести номінаціях з нагоди 10-річчя УТ НКТД;

- **травень** — 3-я Українська конференція "Неруйнівний контроль та технічна діагностика-2000" у м. Дніпропетровську;

- **травень** — звітна конференція УТ НКТД;

- **вересень** — 8-й Міжнародний семінар-виставка "Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики" в м. Ялта;

- **жовтень** — організація поїздки і участь делегації УТ НКТД зі своїм виставочним стендом в 15-й Всесвітній конференції з неруйнівного контролю в м. Римі (Італія);

- **жовтень** — реєстрація в Держстандарті України і введення в дію стандарту СТТУ УТНКТД 01-2000 "Система сертифікації персоналу, зайнятого в неруйнівному контролі. Основні положення";

- **січень-грудень** — видання науково-технічного журналу "Неруйнівний контроль та технічна діагностика" та Бюлетеня УТ НКТД.

На жаль, із різних причин не всі наші плани здійснилися. Не підготовлена процедура професійної підготовки і сертифікації спеціалістів з неруйнівного контролю на базі спеціалізованих кафедр вузів. Не підготовлено звернення до Міністерства праці та соціальної політики з пропозицією про прирівнення персоналу, який працює з імпульсними рентгенапаратами, до персоналу категорії А, який працює з гама-дефектоскопами, та про відповідне корегування нормативних документів.

В 2000 році в УТ НКТД прийнято 30 нових колективних членів:

1. Львівський авіаційно-ремонтний завод, м. Львів

2. ВАТ «Південтеплоенергомонтаж», м. Київ

3. ВО «Кремнійполімер», м. Запоріжжя

4. ТОВ «Сереп», м. Маріуполь

5. ВАТ «Запоріжгідросталь», м. Запоріжжя

6. ВАТ «Донецький металургійний завод», м. Донецьк

7. ТОВ «Дніпродіагностика», м. Дніпропетровськ

8. Черкаський експертно-технічний центр, м. Черкаси

9. Авдіївський експериментальний завод нестандартизованого обладнання Донецької залізниці, м. Авдіївка Донецької обл.

10. СКБ «Полісвіт», м. Харків

11. ТОВ «Промприлад», м. Київ

12. Центр «Леотест Медіум», м. Львів

13. Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю НТТУ «КПІ», м. Київ

14. ДК «Укртрансгаз», м. Київ

15. УДВП «Ізотоп», м. Київ

16. ДККБ «Луч», м. Київ

17. Придніпровський центр діагностики об'єктів і споруд, м. Дніпропетровськ

18. ДАК «Титан», м. Запоріжжя

19. АТ «Насосенергомаш», м. Суми

20. ТОВ «Енергомонтажналадка», м. Донецьк

21. Сумський ЕТЦ, м. Суми

22. Запорізький державний авіаційний ремонтний завод «МІГРЕМОНТ», м. Запоріжжя

23. Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Дніпродзержинськ

24. ВТ «Науково-виробничий діагностичний центр», м. Кривий Ріг

25. ВАТ «Енергосервіс», м. Харків

26. Український НДІ природних газів, м. Харків

27. ПО «Ремпроект», м. Одеса

28. ВАТ «Нижньодніпровський трубний завод», м. Дніпропетровськ

29. ДП Інженерно-технічний центр «Діагностика», м. Харків

30. НВФ «ФЕРТА», м. Харків

На завершення хочеться подякувати всім членам УТ НКТД за співпрацю і особливо: Білому М.Г., Єлізарову І.Г., Зінчаку Я.М., Карпашу О.М., Козіну О.М., Луценку Г.Г., Мозговому О.В., Павлію І.В., Павлію О.В., Посипайку Ю.М., Учаніну В.М., Шевченку І.Я., Шевченку С.Г., Шекеро А.Л. і багатьом іншим спеціалістам, хто своєю повсякденною роботою по розробці і впровадженню сучасних технологій і засобів, підготовці кадрів, створенню нормативної бази з НК і ТД сприяє підняттю авторитету УТ НКТД в Україні і за кордоном.

Голова УТ НКТД, проф.  
В.О.Троїцький

## ПЕРШИЙ СТАНДАРТ СТТУ УТНКТД

Держстандарт України зареєстрував стандарт СТТУ УТНКТД 01-2000 «Система сертифікації персоналу з неруйнівного контролю. Основні положення», що був розроблений Українським товариством неруйнівного контролю та технічної діагностики, Інститутом електрозварювання ім.Є.О. Патона НАН України і Науково-виробничою фірмою «ЗОНД». Таким чином, завершилася одна з найбільш важливих розробок УТ НКТД за останній час. Головна мета створення цього стандарту — гармонізація процедури сертифікації персоналу з неруйнівного контролю, що діє в Україні, з європейською системою сертифікації. Першим кроком в цьому напрямі було введення в дію в Україні міждержавних стандартів із сертифікації персоналу ГОСТ 30489-97 «Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля» (аналог європейського стандарту EN 473-92) і ГОСТ 30488-97 «Органы по сертификации персонала. Общие требования» (аналог європейського стандарту EN 45013-89), що створили правове поле в Україні для європейської системи сертифікації. В той же час в Європі вже готувалася нова редакція стандарту EN 473, що в значній мірі змінювала і доповнювала редакцію 1992 р. Розуміючи, що після введення нової редакції знадобиться значний час для гармонізації цього стандарту в Україні, УТ НКТД вирішило зробити крок на випередження і розробити стандарт, що враховував ці зміни. Така тактика виявилася вірною.

З 01.10.2000 року в Європейському союзі був введений стандарт EN 473-00, а вже з 01.11.2000 року в Україні введено в дію стандарт СТТУ УТНКТД 01-2000, що базується на положеннях EN 473-00. Таким чином, сертифікація персоналу в Україні буде виконуватися за тими ж правилами, що і в більшості країн Європи.

УТ НКТД висловлює подяку Троїцькому В.О., Козіну О.М., Шекеро А.Л., Карпашу О.М., Зінчаку Я.М., Бондаренку Ю.К., Мозговому О.В. за їх плідну працю, а також Білокуру І.П., Білому М.Г., Деречі А.Я., Дубровіну В.Г., Єлізарову І.Г., Пекеру В.М., Посипайку Ю.М., Проценку П.П., Шевченко І.Я. за їх пропозиції і зауваження. Значний внесок в випуск стандарту зробив Український науково-дослідний інститут стандартизації, сертифікації та інформатики і особисто Ковязін М.С. і Малишко О.Ф. Звичайно, що в процесі роботи за цим стандартом можуть з'являтися зауваження до його тексту, нові пропозиції з корегування його положень. Але це нормальний процес. Після кількарічного відпрацювання стандарту всі зауваження, які ви надішлете до УТ НКТД, будуть обговорені і підготовлена нова редакція.

Зазначимо, що СТТУ УТНКТД 01-2000 — це перший стандарт Українського товариства неруйнівного контролю і технічної діагностики. УТ НКТД планує продовжити роботу в напрямку розробки стандартів та іншої нормативної бази з неруйнівного контролю.

З приводу прийняття Держстандартом України та введення в дію стандарту СТТУ УТНКТД 01-2000 Президент Національної академії наук України, академік Б.Є.Патон надіслав в органи виконавчої влади листа з рекомендацією сприяти введенню в дію стандарту. Таким чином, в Україні збудовано ще одне підґрунтя, яке дасть змогу запровадити всеукраїнську систему сертифікації персоналу, який виконує роботи з неруйнівного контролю. Досягнення цієї мети дозволить українській промисловості випускати більш конкурентноздатну продукцію, а також забезпечить визнання результатів неруйнівного контролю з боку компаній, що імпортують українську продукцію.

## СЕРТИФІКАЦІЯ В НАКУНК

В соответствии с решением Государственного комитета Украины по стандартизации, метрологии и сертификации Орган по сертификации Национальный аттестационный комитет Украины по НК (ОС НАКУНК) проводит сертификацию персонала, выполняющего работы с использованием следующих методов неразрушающего контроля: ультразвукового, радиографического, магнитопорошкового, капиллярного, визуального, вихретокового и контроля герметичности.

Сертификация проводится в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 30389-97 (EN 473-92) «Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля. Общие требования» и стандартом СТТУ УТНКТД 01-2000 «Система сертификации персонала неразрушающего контроля. Основные положения».

Сертификация персонала предусматривает обучение, приобретение практического опыта и сдачу

экзаменов по следующим производственным секторам.

**Сектора по технологии изготовления:** 1 — литье; 2 — поковки; 3 — сварные соединения; 4 — трубы и патрубки; 5 — прокат.

**Мульти-сектора:** 6 — производство металлоконструкций (разные комбинации секторов 1-5); 7 — эксплуатационный контроль (разные комбинации секторов 1-5).

**Специализированные сектора:** 8 — авиакосмическая техника; 9 — изделия для железнодорожного транспорта; 10 — буровое оборудование; 11 — оборудование для атомной энергетики; 12 — продукция судостроения.

Подробное разделение объектов неразрушающего контроля соответствует новой редакции международного стандарта ISO 9712:99 «Неразрушающий контроль — Квалификация и сертификация персонала» и европейского стандарта EN 473:00

«Квалификация и сертификация персонала, занятого в неразрушающем контроле. — Общие принципы».

Введены два новых для отечественной системы сертификации производственных секторов, по которым в европейских странах уже многие годы сертифицируется большинство специалистов — производство металлоконструкций и эксплуатационный контроль.

Теперь большинство специалистов по НК будут проходить сертификацию по одному или двум производственным секторам, что резко снизит затраты работодателя на сертификацию. Причем проверка будет направлена на выяснение умения обнаруживать и классифицировать дефекты, которые обусловлены различными технологиями изготовления продукции, а не тем, в какой отрасли промышленности эта продукция используется.

Для начала процедуры сертификации работодатель должен направить в ОС НАКУНК заявку, которую можно получить по одному из нижеприведенных адресов. К заявке прилагаются копии документов, подтверждающие сведения, приведенные в заявке: документ об образовании, свидетельства о прохождении курса подготовки по соответствующему методу, справку об остроте зрения и цветовосприятии, копию документа о ранее пройденной аттестации (сертификации), данные, подтверждающие наличие необходимого стажа по соответствующему методу, три фотокарточки размером 3Х4 см, сделанные накануне подачи заявки.

Срок действия сертификации для специалистов 1 и 2 уровней квалификации — 3 года, 3 уровня — 5 лет.

Экзамены на 3 уровень квалификации проводит ОС НАКУНК. В настоящее время продолжается работа по подготовке программ обучения специалистов на 1 и 2 уровни квалификации, вопросов специального экзамена, номенклатуры экзаменационных образцов для сектора промышленности «Эксплуатационный контроль», так как до настоящего времени в Украине не существовало систем сертификации, которые удовлетворяли бы требованиям по подготовке и экзаменам в этом секторе.

Стандарты ГОСТ 30489-92 и СТТУ УТНКТД 01-2000 можно приобрести в секретариате УТНКТД по адресу: 03680, г.Киев-150, ул.Боженко,11, тел.: (044) 227-26-66, тел./факс: (044) 220-94-82.

**Организации, заинтересованные в сертификации своего персонала, могут обращаться в следующие центры:**

Аттестационный центр неразрушающего контроля при Институте электросварки им.Е.О.Патона НАНУ — 03680, г.Киев-150, ул.Боженко,11, тел.: (044) 261-51-75, тел./факс: (044) 220-94-82;

НТЦ «Сич Серт» — 69006, г.Запорожье, ул.Трегубенко,18, тел./факс: (0612) 61-44-46;

НПФ «ЗОНД» — 284002, г.Ивано-Франковск, ул.Микитинецкая, 5А, тел. (03422) 2-47-28, 5-25-81, факс: (03422) 2-42-80;

Приднепровский аттестационный центр неразрушающего контроля и технической диагностики — 320054, г.Днепропетровск, пр.Кирова, 46, тел./факс: (0562) 34-24-93.

**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
объявляет ежегодный набор в**

**АСПИРАНТУРУ по специальностям:**

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

**ДОКТОРАНТУРУ по специальностям:**

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится дважды в год (апрель, сентябрь)

Контактный телефон: 227-89-54

Документы направлять по адресу:

03680, Украина, Киев-150, МПС, ул. Боженко, 11,

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, аспирантура



## 15-я ВСЕМИРНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

А. Н. КОЗИН

С 15 по 21 октября 2000 г. в Риме (Италия) состоялась 15-я Всемирная конференция по неразрушающему контролю. Подобные конференции один раз в четыре года проводит Международный комитет по неразрушающему контролю (ICNDT).

В конференции приняли участие представители 54 стран, которые представили более 750 докладов.

Параллельно с конференцией проходили другие мероприятия:

- выставка средств НК, вызвавшая огромный интерес большинства участников конференции. Более 100 компаний представили свои достижения по разработке и производству средств НК, а также различные услуги в этой области;

- Генеральная Ассамблея Европейской Федерации обществ неразрушающего контроля (EFNDT);

- два собрания международного комитета по НК (ICNDT). Обсуждались общемировые проблемы сообщества специалистов НК, принятие нового Устава, прошли выборы руководящих органов Комитета и др.;

- собрание Рабочей группы EFNDT по сертификации и квалификации персонала, занятого в НК;

- семинар ICNDT по вопросам широкого внедрения в практику системы сертификации персонала, занятого в НК, в соответствии с новой редакцией международного стандарта ISO 9712- 99;

- заседание комитета и рабочих групп европейской организации по стандартизации (EN);

- посещение Центра НК Итальянских военно-воздушных сил.

Конференция была разделена на 20 секций:

Пленарные лекции (количество докладов)	10
Авиация и космонавтика	42
Строительство	40
Компьютерная обработка и моделирование	48
Сохранение памятников архитектуры и искусства	32
Обучение, подготовка и сертификация	15
Общие вопросы	44
Промышленность и конструкции	65
Определение характеристик материалов и испытания	132
Методы и аппаратура	201
Деятельность международных организаций	8
Атомная промышленность	39
Надежность и верификация процедур	14
Стандартизация	6
Наземный и морской транспорт	14
Рабочая группа — Достоверность оценки результатов контроля	9
Рабочая группа — Подповерхностные волны	6
Рабочая группа — Обнаружение противопехотных мин	11
Рабочая группа — Нейтронная радиография	19
Рабочая группа — Визуальный контроль	6

© А. Н. Козин, 2001

Во время проведения конференции утренние заседания в большом зале открывались получасовыми пленарными лекциями особо авторитетных в неразрушающем контроле специалистов, которые собирали довольно большое количество слушателей.

Абсолютными лидерами по количеству докладов стали секции «Методы и аппаратура» и «Определение характеристик материалов и испытания». В этих секциях было собрано почти половина всех докладов. Секция «Методы и аппаратура» делилась на целый ряд подсекций по методам и их отдельным разделам. Подсекция «Ультразвук» была разделена на разделы: общий, оборудование, оборудование и параметры преобразователей, преобразователи и связь с объектом контроля, обработка сигналов и классификация дефектов, применение фазированных антенных решеток, приложения, обнаружение трещин и TOFD.

Из приведенной диаграммы распределения докладов по методам НК видно, что наибольшее внимание по-прежнему сосредоточено на совершенствовании средств и методик ультразвукового контроля (UT). По сравнению с 7-й Европейской конференцией в Копенгагене удельный вес докладов по ультразвуковой тематике возрос в 1,6 раза, а соотношение с докладами на радиационную тематику увеличилось до 2 раз, что свидетельствует об усилении тенденции развития этого метода. Как и на конференции в Копенгагене сохраняется равенство между радиационными (RT) и электромагнитными методами (ET), в которые входят различные приложения вихревого, магнитного, электрического, радиоволнового и др. методов. Уменьшился удельный вес капиллярного (PT), магнитопорошкового (MT), теплового (IRT) и контроля герметичности (LT). А интерес к вопросам акустической эмиссии (AE) вырос с 2 до 5 %, так как все большее внимание уделяется подходам, позволяющим получить информацию о состоянии конструкции в целом.

Большое внимание уделялось общим вопросам применения НК, что вызвано новой фазой развития

Процентное соотношение докладов по основным методам НК

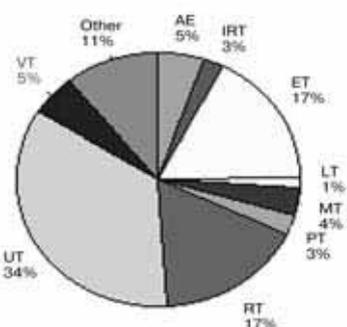




Рис. 1. Портативное устройство АСFM контроля сварных швов.

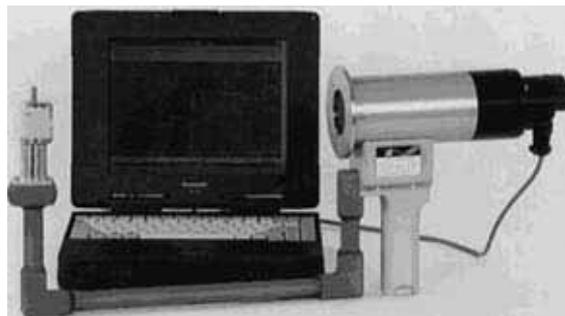


Рис. 2. Радиометрическая система измерения остаточной толщины металла через слой теплозащитной изоляции фирмы Lixi.



Рис. 3. Сканер для измерения остаточной толщины стенки трубы методом магнитных полей рассеивания.



Рис. 4. Система преобразователей и устройство Wavemaker 16 фирмы The Guided Ultrasonics Ltd на трубе 3".

НК — многие разработчики оборудования и технологий перешли на новый уровень применения НК — решают задачи по минимизации затрат на проведение НК.

Пути решения этих задач могут быть совершенно разными, например, начало широко использоваться оборудование, реализующее АСFM (Alternating Current Field Measurement) магнитный метод (рис. 1), который при новых потребительских свойствах — определении размеров дефектов, выходящих на поверхность, — позволяет многократно повысить производительность контроля и заменить магнитопорошковый метод при контроле сварных швов.

При достаточно больших первоначальных затратах на приобретение оборудования достигается существенный выигрыш за счет повышения производительности, причем одновременно решается задача определения размеров обнаруженных дефектов, что принципиально важно.

Французские специалисты из Института сварки предлагают в четыре раза сократить временной фактор, заменив рентгенографию подводных трубопроводов на подводную рентгеноскопию, работающую на глубине до 300 м. Кстати, необходимо отметить огромный всеобщий интерес к замене рентгенографии на рентгеноскопию и томографию. Вопросам разработки и применения безплёночных устройств посвящено 52 доклада.

Целый ряд докладов посвящен применению радиометрических систем для измерения остаточной толщины металла. Эти разработки уже прошли исследовательскую стадию и на рынке дефектоскопической аппаратуры уже появились первые образцы

мобильных малогабаритных устройств, которые позволяют измерять остаточную толщину труб малого и среднего диаметра без удаления теплозащитной изоляции (рис. 2). Это очень актуально для технического диагностирования в энергетике, производствах, использующих нагретые или охлажденные среды.

Продолжает совершенствоваться оборудование для контроля с использованием измерения магнитного потока рассеивания. Фирма RTD довела предельные параметры своего нового устройства, работающего по этому принципу, до толщины 30 мм по стали при толщине защитного покрытия до 10 мм. Создан целый ряд сканирующих устройств, работающих по этому принципу, для измерения остаточной толщины труб малого и среднего диаметра через слой антикоррозионного покрытия (рис. 3). Эти устройства превосходят ультразвуковые и по другим причинам: нет необходимости в подготовке поверхности к контролю и дальнейшем восстановлении антикоррозионного покрытия, наличие отслаивания антикоррозионного покрытия и расслоений металла не влияет на результаты измерений, нет необходимости в подаче контактной жидкости.

Еще дальше пошли разработчики метода, использующего волны лэмбовского типа для высокопроизводительного контроля трубопроводов малого и среднего диаметров. Действующее оборудование фирмы Guided Ultrasonics Ltd (рис. 4) выполняет контроль трубопровода длиной до 50 м на наличие коррозии за одну установку. Этот метод трудно сравнивать с эхо-импульсным методом по информативности и точности измерений размеров дефек-

тов, но производительность открывает огромные возможности по широкому его использованию для контроля в труднодоступных местах и сплошного контроля трубопроводов без удаления различного рода покрытий, что было возможно только при использовании метода акустической эмиссии. Этот метод превосходит метод акустической эмиссии по точности определения местоположения макродефектов, по достоверности контроля, оперативности, так как требуется однократная установка обоймы с датчиками и всего несколько секунд на сам контроль, при этом нет необходимости в нагружении трубопровода избыточным давлением, что часто не представляется возможным.

К сожалению, у нас в стране многие потребители НК до сих пор не знают о существовании и возможностях применения метода TOFD (11 докладов) или о том, как использовать данные о форме и реальных размерах несплошности. Европейские же дефектоскописты уже используют оборудование, обеспечивающее параллельно амплитудный и временно́й методы с полной записью результатов контроля при автоматизированном УЗК (P-scan 4 FORCE Institut) или раздельно амплитудный и временно́й методы при ручном УЗК с представлением результатов контроля в трех проекциях (рис. 5). Конкуренция в этом секторе оборудования НК ведет к постоянному снижению цен и, если раньше высокая цена на комплект P-scan сдерживала энтузиазм руководителей служб НК, то сегодня стоимость подобного набора снизилась в 3...5 раз.

Все более широко распространение получают фазированные антенные решетки (15 докладов), которые уже производятся в промышленных масштабах. Это сложнейшее оборудование, управляемое мощным компьютером, позволяет производить динамическую фокусировку и наклон УЗ пучка на различной глубине, что дает возможность выполнять поперечное сканирование без перемещения преобразователя или с небольшим перемещением в ограниченных зонах. Возможности фокусирования УЗ пучка все шире используются для классификации, измерения размеров и формы дефектов, повышения отношения сигнал/шум, что дает дополнительные возможности для контроля крупнозернистых сталей и других «сильношумящих» материалов и повышения достоверности контроля.

Большое внимание уделено вопросам моделирования почти во всех методах НК, за исключением, возможно, визуального — 74 доклада. Такое пристальное внимание к вопросам моделирования основано на прагматическом подходе к применению НК — моделирование позволяет существенно сократить затраты при проведении реального НК и расшифровке его результатов.

На заседании секции «Надежность и верификация процедур» обсуждались проблемы сертификации методик, оборудования для НК и получаемых с его помощью результатов контроля, аккредитации сервисных организаций, выполняющих работы по НК. Этим вопросам уделяется большое внимание, так как доверие к результатам НК непосредственно связано с организацией НК, которая зависит от технологии контроля, используемой аппаратуры, ал-



Рис. 5. Прибор, реализующий TOFD метод, производства фирмы RTD.

горитмов обработки результатов НК и принятия решений, квалификацией персонала и др.

Впервые материалы конференции изданы с помощью современных технологий, которые будут доминировать в наступающем новом тысячелетии — на стандартном лазерном диске (CD-ROM) разместились все доклады конференции. Кроме компактности, современные компьютерные технологии, которые были использованы при издании материалов конференции, позволяют легко сортировать доклады по интересующим читателя вопросам, производить быстрый поиск по ключевым словам, представлять материалы докладов (иллюстрации, рисунки, схемы, графики и т.п.) в цветном изображении и многое другое.

**УТ НКТД предлагает заинтересованным организациям заключить договора на информационное обслуживание по предоставлению ксерокопий материалов конференции.**

## ВЫСТАВКА

Как уже упомянуто ранее, в выставке приняло участие более 100 организаций. На самом деле на стендах представлено оборудование и материалы для НК значительно большего количества компаний, чем это указано в каталоге выставки, в связи с тем, что многие участники выставки одновременно представляли другие компании, особенно американские. Наибольшее количество участников выставки было из Италии — 32, Франции — 15, Германии — 11, США — 11, Великобритании — 8, Нидерланды — 4. Бельгию, Швецию, Данию, Швейцарию, Россию, Японию, Канаду, Израиль, Испанию, Норвегию, Китай представляли от 3 до 1 компаний. Все более активно на мировых форумах заявляют о себе российские компании — МНПО «Спектр», НПФ Политест, АО «Нординкрафт». Еще с сожалением приходится констатировать, что украинские производители средств НК пока не могут предложить конкурентные идеи и продукцию мирового уровня.

Продолжается миниатюризация оборудования НК и расширяется его автономность.

Резко расширился круг компаний, выпускающих малогабаритные цифровые УЗ дефектоскопы и толщиномеры с А-разверткой. Появился целый ряд новых компаний, производящих системы УЗ контроля для эксплуатационного контроля в полевых условиях. Существенно сократилось энергопот-

ребление такого оборудования. Например, новый комплекс P-scan 4 Lite фирмы FORCE Institute способен обеспечивать работу по четырем независимым каналам с одновременной записью полных данных контроля эхо- и TOFD методом, полученных при автоматизированном сканировании объекта контроля и подаче контактной жидкости, при полной независимости от источников питания в течение 8 ч работы. Вес комплекса — всего 4,5 кг (без сканера и помпы для подачи контактной жидкости).

В связи с разработкой малогабаритных высокоемких источников постоянного тока созданы беспроводные намагничивающие устройства для магнитопорошкового контроля. Такие намагничивающие устройства питаются от батареи аккумуляторов, удобным тем, что используются в автономных дрелях.

Созданы тепловизионные камеры, напоминающие бытовые видеокамеры по внешнему виду и габаритам. Вес таких тепловизоров не превышает 2 кг при полной автономности и возможностях, присутствующим цифровым видеокамерам.

Аналогичные процессы присущи вихретоковым приборам. Всемирно известная фирма Zetec разработала универсальный вихретоковый дефектоскоп MIZ-21A на диапазон частот 50 Гц...8 МГц, имеющий вес 1,6 кг.

В радиационном контроле эти процессы отражаются только на устройствах, связанных с обработкой и анализом данных, так как возможности миниатюризации источников рентгеновского излучения и блоков для них на сегодняшний день исчерпаны.

Практически весь НК в процессе производства становится автоматизированным, позволяющим собирать, обрабатывать, хранить и использовать данные для коррекции технологических процессов изготовления. Таким образом, создается постоянная обратная связь, которая является одним из обязательных условий стандартов серии ISO 9000.

## СОБРАНИЕ ICNDT

На заседаниях Международного комитета по неразрушающему контролю (ICNDT), в которых приняли участие делегаты от 53 стран, в том числе и Украины, принят новый Устав ICNDT, существенно изменяющий роль этой организации в НК.

В Уставе сформулированы следующие цели.

1. Развивать международное сотрудничество во всех областях, связанных с НК.

2. Поддерживать финансирование, развитие, разработки и кооперацию национальных и региональных обществ НК.

3. Определять место и организацию для проведения Всемирных конференций по НК (один раз в четыре года).

4. Выдвигать с континентальными объединениями обществ НК инициативы для обеспечения политики ICNDT.

5. Поддерживать разработку международных стандартов по НК в сотрудничестве с Международной организацией по стандартизации (ISO) и другими организациями по стандартизации.

Для реализации этих масштабных целей изменена организационная структура ICNDT: создан постоянно действующий секретариат, непосредственно не связанный с подготовкой мировых конференций, а также Комитет по политике и общим задачам, который будет создавать рабочие группы, ответственные за разработку и решение конкретных задач. Президентом ICNDT избран г-н Джузеппе Нардони, внесший огромный вклад в изменение роли ICNDT и проведение 15-й Всемирной конференции по НК.

Принято решение 17-ю Всемирную конференцию по НК в 2008 г. провести в г. Шанхае (Китай). 16-я Всемирная конференция по НК состоится в 2004 г. в г. Монреале (Канада).

Утверждены процедуры присуждения наград ICNDT за особые достижения в области НК.

## ГЕНЕРАЛЬНАЯ АССАМБЛЕЯ EFNDT

На Генеральной ассамблее Европейской Федерации по неразрушающему контролю (EFNDT) состоялись выборы руководящих органов Федерации:

Президентом Федерации избран г-н Р.Рош (Франция), выполнявший до этого функции руководителя Консультативного совета;

Вице-президентом — М.Фэрли (Великобритания), входивший в Совет директоров EFNDT и продолжающий руководить Рабочей группой по квалификации и сертификации персонала;

члены Совета директоров — Б.Ларсен (Дания), Р.Линк (Германия), Ф.Дельеж (Бельгия), В.Клюев (Россия), Д.Нардони (Италия), Э.Ромеро (Испания).

В соответствии с Уставом, секретариат EFNDT в ближайшие два года будет работать на базе Французского общества НК.

Установлен размер членского взноса на 2001 в размере 300 Евро.

Ирландское общество неразрушающего контроля принято полным членом EFNDT.

Рассмотрен вопрос подготовки Договора между членами EFNDT о профессиональном сотрудничестве, который предусматривает принятие на себя сторонами, подписавшими Договор следующих обязательств:

- в области информации — каждое Общество информирует членов Договора о конференциях, образовательных программах, датах и местах будущих собраний, представляющих взаимный интерес;

- в выставочной деятельности — каждое Общество предоставляет другим Обществам на взаимной основе выставочную стендовую площадь для целей содействия их деятельности;

- в области конференций и собраний — члены Обществ должны предоставлять возможности участия в конференциях, образовательных программах и общих собраниях членам других Обществ на тех же условиях и за ту же регистрационную плату, как и членам своего Общества;

- в области публикаций — каждое Общество соглашается предоставлять другому Обществу одну копию своего периодического издания бесплатно. Все издания должны предоставляться членам дру-

гого Общества по цене, как для членов Общества-издателя;

- в области членства — все индивидуальные члены одного Общества могут обращаться с заявлениями о вступлении в другие Общества; одно бесплатное приглашение на ежегодные конференции предоставляется правлению каждого из Обществ;

- в области идентификации — обязанность каждого индивидуального члена любого Общества, для применения описанных выше преимуществ данного Договора, предоставить соответствующие свидетельства членства в своем Обществе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все участники высоко оценили уровень конференции. На конференции, выставке, в кулуарах, на различных приемах они смогли познакомиться с

тенденциями развития средств НК, своими глазами увидеть последние разработки оборудования в действии, установить прямые контакты с разработчиками и производителями оборудования и методов НК, познакомиться с культурой и достопримечательностями Италии, а также просто приятно провести время со своими коллегами.

Поездки членов УТ НКТД на крупнейшие мероприятия по НК становятся хорошей традицией, которая позволяет понять тенденции и уровень современного НК, представить собственные разработки, завести полезные контакты с производителями оборудования, подписать контракты или протоколы об их подготовке. К сожалению, деловых встреч проводится не так много, но они есть, и по мере роста украинской экономики их число будет расти.

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

*Поступила в редакцию  
15.03.2001*

## ДЕФЕКТОСКОПИЯ 2001

3–6 сентября

Санкт-Петербург, Михайловский манеж

### ***II Международная специализированная выставка приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля***

В историческом здании Санкт-Петербургского Михайловского манежа 3–6 сентября 2001 года будет проходить II Международная выставка приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля ДЕФЕКТОСКОПИЯ 2001.

- Контроль методом акустической эмиссии
- Ультразвуковой контроль
- Визуальный и оптический контроль
- Цветная капиллярная дефектоскопия
- Магнитопорошковый контроль
- Электромагнитный контроль
- Инфракрасный и термический контроль
- Радиографический контроль
- Контроль герметичности (течеискание)
- Обучение и сертификация персонала, аттестация лабораторий

### **На выставке будут представлены :**

ДЕФЕКТОСКОПИЯ 2001 представляет широкий спектр приборов и средств неразрушающего контроля и диагностики для различных отраслей промышленности, познакомит с новейшими техническими разработками в области методов исследования объектов и материалов.

Одновременно с выставкой пройдут практические семинары и конкурсы, победители получают дипломы и подарки. Официальные посетители ДЕФЕКТОСКОПИЯ 2001 бесплатно получают каталог выставки и один номер журнала «В мире НК».

#### **Организаторы:**

Выставочное объединение «Рестэк»  
197110, Санкт-Петербург, а/я 268

тел.: +7(812) 320 80 92; 235 04 92  
факс: +7(812) 329 80 90

e-mail: sci&ind@restec.spb.su  
Internet: WWW.restec.ru

#### **Информационное обеспечение:**

Журнал «В мире НК»  
95220, Санкт-Петербург, а/я 277

тел.: +7(812) 324 06 68  
факс: +7(812) 324 06 69

e-mail: expo@ndtworld.com  
Internet: www.ndtworld.com

## УЧЕНЫЕ И СПЕЦИАЛИСТЫ УКРАИНЫ НА 15-Й ВСЕМИРНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

Ю. Н. ПОСЫПАЙКО

В программу 15-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю, которая проходила 15-21 октября 2000 г. в Риме были включены 43 доклада ученых и специалистов Украины. Это восьмой результат после Германии, России, Китая, Италии, Франции, США и Индии, что говорит о значительных потенциальных возможностях наших специалистов и организаций, которые они представляют. Следует отметить, что после 10-й Всемирной конференции, которая проходила в 1982 г. в Москве, наши ученые практически не участвовали в подобных форумах.

Кто же подготовил доклады в Рим?

Называем организации и авторов докладов.

• **Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев** — 11 докладов: В. Троицкий (6), В. Загребельный (2), В. Радько (2), А. Шекеро (2), Н. Белый, Е. Давыдов, А. Козин, Л. Лобанов, В. Пивторак, Е. Олейник, И. Киянец, Ю. Посыпайко, И. Шевченко, П. Федоряка, Н. Кувшинский.

• **Днепропетровский государственный университет** — 8 докладов: А. Мозговой (5), А. Рудаков (3), В. Малайчук, О. Дробакин, В. Хандецкий, И. Антоняк, Н. Твердоступ, А. Бурый.

• **Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов** — 5 докладов: З. Назарчук (3), В. Кошовый (3), И. Романышын (3), А. Гудко, В. Учанин, О. Бухало, Б. Клим, Г. Мыкытын, Е. Почапский, Р. Федорив.

• **Институт физической химии им. Л. В. Писаржевского НАН Украины, г. Киев** — 3 доклада: А. Шульженко (2), М. Казакевич, Н. Бурлаенко, Л. Погорила, Н. Сидорова, А. Телятник.

• **Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев** — 3 доклада: Н. Бурау, П. Марчик, А. Тяпченко, О. Верцанова, С. Денбовецкий, А. Лецишин, С. Михайлов.

• **НТЦ радиационного приборостроения Института монокристаллов, г. Харьков** — 2 доклада: В. Рыжиков (2), Н. Старжинский (2), Е. Лисецкая (2), Л. Гальчинецкий, Д. Козин, В. Соснин, В. Свищ, А. Ополонин, В. Черников, Л. Нагорная, Е. Данчин.

• **Институт проблем прочности, г. Киев** — 2 доклада: М. Синьков (2), А. Чапар (2), Т. Синькова (2), Я. Калиновский, А. Закидальский.

• **Восточно-украинский государственный университет, г. Луганск** — 2 доклада: В. Невзлин (2), О. Губаревич, М. Загирняк, А. Сырцов, Ю. Дяченко, П. Захарченко.

• **Кировоградский технический университет** — 2 доклада: В. Гамалий (2), М. Гамалий, О. Теленкова, Д. Трушаков.

• **Криворожский технический университет** — 2 доклада: В. Моркун (2), В. Бызов, С. Мироненко, Г. Губин, Н. Моркун.

• **Государственное конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, г. Днепропетровск** — соавторство в 2-х докладах ФМИ: В. Тихий (2), В. Ситало.

• **НПФ «Зонд», г. Ивано-Франковск** — 1 доклад: О. Карпаш, П. Крынычный, Л. Кийко.

• **НИИАЧермет, г. Днепропетровск** — 1 доклад: И. Ободан, В. Ободан.

• **УкрНИИпроект, г. Киев** — 1 доклад: В. Кулиш, Э. Крылов.

• **НПФ «Специальные научные разработки», г. Харьков** — 1 доклад: Г. Безлюдько;

• **ООО «Энергия-сервис», г. Киев** — 1 доклад: В. Давиденко;

• **ЭлектроДепартамент** — 1 доклад: А. Азарьян.

IC NDT предоставил информационные стенды ряду национальных обществ неразрушающего контроля. Среди них было и Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики (УТ НКТД), которому 16 ноября 2000 года исполнилось 10 лет.

Во время конференции проведены заседания IC NDT, EF NDT, различных рабочих групп и комитетов. В их работе участвовала делегация УТ НКТД (В. Троицкий, А. Шекеро, А. Козин).

В работе 15-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю приняла участие большая группа ученых и специалистов Украины — более 40 человек из Киева, Днепропетровска, Донецка, Ивано-Франковска, Львова, Луганска, Одессы и Харькова. Это стало возможным после вступления УТ НКТД в члены IC NDT (в 1995 г.) и установление тесных контактов с его Президентом госп. G. Nardoni и Оргкомитетом конференции. Поездка украинских специалистов была организована УТ НКТД благодаря усилиям А. Козина и помогавших ему на отдельных этапах канд. техн. наук В. Загребельного и А. Шекеро.

Подробную информацию о конференции можно получить в секретариате УТ НКТД — мы располагаем полной программой конференции, сборником тезисов, сборником докладов на CD-диске, каталогом выставки и проспектами. Информация также размещена в Интернете на сайтах: [www.ndt.net](http://www.ndt.net) и [www.aipnd.it](http://www.aipnd.it).

Кроме участия в работе конференции и знакомства с выставкой, наших коллег ожидала незабываемая поездка по Италии. Началось путешествие во Львове, где собралась вся группа, утром 13 октября 2000 г. За окном комфортабельного автобуса остались украинские Карпаты и Чоп, равнинные просторы Венгрии, вечерний красавец-Будапешт, где-то

в стороне остался Балатон, а в конце Венгрии, почти на границе с Австрией, в городке Керменд, ожидал небольшой отель, чтобы снять усталость и подготовить путешественников к следующему дню.

Утром за окном автобуса опять закружил калейдоскоп пейзажей: аккуратные австрийские дворички вдоль дороги, суперавтобан, мягко стелющийся под колеса, Адриатические Альпы, подернутые октябрьской желтизной, промелькнул за окном простой дорожный указатель с большим смыслом — ITALIA. Дорога покатила вниз, неожиданно открылась зеленая Северо-Итальянская равнина, а через несколько часов автобус свернул к Адриатическому морю, к Венеции.

Расположенная на 118 островах, связанных между собой сетью каналов, Венеция, золотые ворота Италии, является прекрасным миражом, уникальным городом, в котором всегда полно туристов. И мы влились в него маленькой капелькой. Лучше всего бродить по Венеции пешком наугад, переходя через мосты, наблюдая за скользящими гондолами, двигаясь по «фон дамента» — венецианским набережным, идущим вдоль каналов, бродя по «калли» — узким улочкам, выходящими на площади, с прекрасными церквями и элегантными палаццо. Но начали мы прогулку по центру венецианской жизни — Большому каналу и пьядца Сан Марко. Впечатляют дворцы вдоль канала, впечатляет пятикупольная величественная базилика Сан Марко, построенная в XI веке для хранения мощей евангелиста святого Марка, впечатляет Дворец Дожей — шедевр готического венецианского стиля. Неповторима атмосфера площади, особенно вечером и ночью, когда состязания ведут оркестры соседних ресторанчиков, расположившихся прямо на площади. Последним вапоретто, около 12 часов ночи, мы возвращаемся по каналу на остров-гараж к автобусу. Впереди ночной переезд в Рим.

В Риме за пять дней мы посмотрели практически все, что показывают туристам — да простит такое высказывание Вечный город. От одного перечня всемирно известных памятников старины захватывает дух: Колизей, Римский форум, Капитолий, Пантеон, собор св. Петра, пьядца Венеция, лестница Тринита деи Монти на пьядца ди Спанья, фонтан де Треви, пьядца Навона и пьядца дель Пополо, церковь Санта Мария Маджоре, вилла Боргезе и сады Ватикана, виа дель Корсо и виа дель Фори Имперали и многое-многое другое.

Огромное эмоциональное впечатление осталось после величайшего в мире комплекса Ватиканских музеев с несравненными Сикстинской капеллой, лоджиями Рафаэля, апартаментами Борджа и пинакотекой — собранием картин.

Многие участники поездки посетили папскую аудиенцию на площади перед собором св. Петра, которую проводит Папа римский каждую среду и воскресенье для пилигримов со всего мира.

Весь день 20 сентября был отдан поездке в Неаполь и Помпеи. Южный город-порт красиво расположился на холмах вокруг Неаполитанского залива. В морской дымке виден легендарный Капри. Нельзя удержаться от купания в море. Прогулка по городу оставила в памяти пьядца Плебишито, галерею Гумберта, Капель Нуово, базилику Сан Франциско ди Паола, Королевский дворец и Капель дель Ово, фонтаны, набережные, молы. В городе много музеев. Но они, к сожалению, остались на «следующий раз». Как и Везувий, расположившийся невдалеке, но постоянно притягивающий взгляд, — где бы ты ни находился в Неаполе, невольно ищешь конусообразный силуэт единственного ныне действующего вулкана континентальной Европы высотой 1270 м.

На его склонах со II века до н.э. на площади более 60 га располагался процветающий город, погибший под пеплом Везувия в 79 году н.э. Раскопанные археологами, Помпеи донесли до нас облик начальной эпохи Римской Империи, уровень ее развития: дворцы и храмы, площади и театры, термы и лечебницы, фрески, мозаики и скульптуры, водопровод и канализацию. Восхищенные увиденным, мы долго бродили по древним мощеным улицами со следами колесниц в разноязычной пестрой толпе туристов со всего мира.

21 октября утром мы покинули Рим и всего на 2 часа заехали во Флоренцию. Но что такое 2 часа для города, созданного руками талантливых архитекторов и строителей, несравненный дух которого на протяжении многих веков растил гениев искусств и наук. В церкви Санта Кроче покоятся около 300 знаменитых флорентийцев, среди них Микеланджело, Россини, Галилео Галилей. Спринтерский забег по Флоренции прерывали Кафедральный собор Санта Мария дель Фиоре (четвертый в мире по величине), Баптистерий, колокольня Джотто, палаццо Беккио, церковь Санта Кроче, площадь Синьории, лоджия Ланци, понте Веккио. За программой остались величайшие музеи мира Уффици, Академия, Дом Буанаротти, дворец и усыпальница Медичи и многое другое. Во Флоренцию надо вернуться!

И снова дорога, но в обратном порядке.

Одним из признаков успеха поездки являются разговоры о будущей поездке, начавшиеся прямо в автобусе. А она совсем недалеко — 17–21 июня 2002 г. в Барселоне будет проходить 8-я Европейская конференция по неразрушающему контролю.

До встречи в Барселоне!