

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

**Издатель:** Международная ассоциация  
«Сварка»

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор**  
**Б. Е. ПАТОН**

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),  
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),  
З. А. Майдан (отв. секр.),  
Н. П. Алешин, В. Л. Венгринович,  
Э. Ф. Гарф, А. А. Грузд,  
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко, М. Л.  
Казакевич, О. М. Карпаш,  
В. В. Ключев, А. А. Лебедев,  
Л. М. Лобанов, З. Т. Назарчук,  
Н. В. Новиков, Ю. Н. Посыпайко,  
Г. И. Прокопенко, В. А. Стороженко, В. А.  
Стрижало, В. Н. Учанин,  
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,  
Е. В. Шаповалов, В. Е. Щербинин

#### Адрес редакции

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

#### Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

#### Редактор

Т. В. Юштина

#### Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серета

#### Свидетельство

о государственной регистрации  
КВ4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень  
утвержденных ВАК Украины  
изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степеней.

При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- ЛОБАНОВ Л.М., НЕХОТЯЩИЙ В.А., РАБКИНА М.Д., ПАЛИЕНКО А.Л., БЕЗЛЮДЬКО Г.Я.** Новые возможности обнаружения эксплуатационных повреждений в трубопроводах и сосудах давления..... 3
- НЕДОСЕКА С.А., ОВСИЕНКО М.А.** Особенности обработки данных акустической эмиссии при использовании сложных и множественных локационных антенн..... 7
- УЧАНИН В.Н., СЁМОЧКИН С.В., ЛОГИНОВ А.О.** Выявление усталостных трещин в зоне отверстий при эксплуатационном контроле самолетов фирмы «Боинг» ..... 13
- СУЧКОВ Г.М., ПЕТРИЦЕВ О.Н., ХАЩИНА С.В.** Развитие концепций создания ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа. Режим возбуждения. Ч. 2. .... 18
- НАЙДА С.А., КОРЖИК А.В., ЖЕЛЯСКОВА Т.Н.** Методы возбуждения коротких акустических импульсов в пьезоэлектрическом преобразователе с согласующими слоями..... 24
- МИНДЮК В.Д., КАРПАШ М.О., ЯВОРСЬКИЙ А. В., РИБИЦЬКИЙ І.В., ДОЦЕНКО Є.Р.** Досвід оцінки деградації матеріалу труб аміакопроводу за результатами неруйнівного контролю їх механічних характеристик ..... 30

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- ГАРФ Э.Ф., ДМИТРИЕНКО Р.И., ПЕРЕПЕЧАЙ А.А., ДЕНЬГИН А.П., ПЛЕТНЕВ В.А.** Надежность и экономичность производимых в Украине баллонов высокого давления для технических газов ..... 36
- РАЙТЕР П.М.** Прогнозування корозійних пошкоджень нафтогазопроводів на основі моніторингу структури та фазового складу газорідного потоку ..... 42
- БЕРНАЦКИЙ А.В., ДМИТРИЕНКО Р.И.** Оценка склонности конструкционных сталей к слоистым разрушениям. Развитие новых подходов ..... 49

### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- 11-я Международная выставка NDT RUSSIA 2012 «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности»..... 54
- З.Т. Назарчуку – 60 ..... 55
- Достоверная идентификация материалов с помощью спектрохимического анализа ..... 59

#### ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» ТК-78  
Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

**Publisher:** *International Association «Welding»*

**EDITORIAL BOARD**

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

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

**Address**

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

**Scientific editors**

N. G. Bely, A. A. Gruzd

**Editors**

T. V. Ushtina

**Electron galley**

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

State Registration Certificate  
KV 4787 of 09.01.2001.  
All rights reserved

This publication and each of the articles  
contained here in are protected by copyright.

Permission to reproduce material contained  
in this journal must be obtained  
in writing from the Publisher

*«Tekhnicheskaya diagnostika  
i nerazrushayushchiy kontrol»*

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

**CONTENT**

**SCIENTIFIC-TECHNICAL**

*LOBANOV L.M., NEKHOTYASHCHII V.A., RABKINA M.D.,  
PALIENKO A.L., BEZLYUDKO G.Ya.* New capabilities  
for detection of in-service damage in pipelines and pressure vessels ..... 3

*NEDOSEKA S.A., OVSIENKO M.A.* Features of processing  
acoustic emission data at application of complex and multiple  
location arrays ..... 7

*UCHANIN V.N., SYEMOCHKIN S.V., LOGINOV A.O.*  
Detection of fatigue cracks in the hole zone  
at in-service inspection of Boeing aircraft ..... 13

*SUCHKOV G.M., PERTISHCHEV O.N., KHASHCHINA S.V.*  
Development of concepts of designing ultrasonic transducers of  
electromagnetic type. Excitation mode. P.2 ..... 18

*NAIDA S.A., KORZHIK A.V., ZHEL'YASKOVA T.N.* Methods  
of excitation of short acoustic pulses in piezoelectric transducer  
with matching layers. .... 24

*MINSYUK V.D., KARPASH M.O., YAVORSKAYA A.V.,  
RIBITSKII I.V., DOTSENKO E.R.* Experience of assessment of  
degradation of materials of ammonia line pipe by the results of  
non-destructive testing of their mechanical characteristics ..... 30

**INDUSTRIAL**

*GARF E.F., DMITRIENKO R.I., PEREPECHAJ A.A.,  
DENGIN A.P., PLETNYOV V.A.* Reliability and cost-effectiveness  
of high-pressure vessels for technical gases, produced in Ukraine ..... 36

*RAITER P.M.* Prediction of corrosion damage of oil and gas  
pipelines based on monitoring the structure and phase  
composition of gas-liquid flow from the well..... 42

*BERNATSKII A.V., DMITRIENKO R.I.*  
Assessment of susceptibility of structural steels  
to lamellar fractures. Development of new approaches ..... 49

**NEWS AND INFORMATION**

11<sup>th</sup> International Exhibition NDT RUSSIA 2012 «Non-Destructive  
Testing and Technical Diagnostic in Industry» ..... 54

Z.T. Nazarchuk is 60..... 55

Reliable material identification using spectrochemical analysis..... 59

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:  
Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics  
and Non-Destructive Testing» TC-78  
Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic



## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ И СОСУДАХ ДАВЛЕНИЯ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **В. А. НЕХОТЯЩИЙ**, инж., **М. Д. РАБКИНА**, д-р техн. наук,  
**А. Л. ПАЛИЕНКО**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины), **Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО**, канд. техн. наук  
(НПФ «Специальные Научные Разработки»)

*Представлены результаты исследования новых возможностей обнаружения эксплуатационных повреждений с внутренней поверхности стенки сосудов бесконтактной ультразвуковой толщинометрией, основанной на электромагнитно-акустическом методе, с помощью прибора УТ-04 ЭМА. Дистанционное измерение толщины стенки — на примере баллонов для сжатых газов — этот метод позволяет дифференцированно подойти к оценке воздействия коррозии на металл и может рассматриваться как эффективное средство по предотвращению аварийных ситуаций во время эксплуатации.*

*The paper presents the results of investigation of new capabilities for detection of in-service damage from the inner surface of vessel wall by contactless ultrasonic thickness measurement, based on electromagneto-acoustic method, using UT-04 EMA instrument. Remote measurement of wall thickness in the case of compressed gas cylinders - this method allows a differentiated approach to assessment of corrosion impact on the metal, and it can be regarded as an effective means to prevent emergency situations in service.*

В настоящее время в Украине повышенное внимание обращено на баллоны среднего объема для сжатых газов [1–3]. Причина кроется в участившихся случаях взрывов кислородных баллонов, сопровождающихся человеческими жертвами [2, 3]. Согласно экспертным заключениям, происходящее — результат нарушений действующего нормативного документа [4]. Львиная доля нарушений приходится на «человеческий» фактор. Но, как показывает анализ, выполнение требований [4] не гарантирует безопасную эксплуатацию баллонов из-за отсутствия эффективных методов контроля их технического состояния. Это усугубляется долгосрочной, свыше 30 лет, и по сути бесконтрольной (в части деградации свойств металла) эксплуатацией подавляющей части многотысячного парка баллонов для сжатых газов [5].

Одной из основных операций при экспертном освидетельствовании является осмотр наружной и внутренней поверхностей с целью обнаружения дефектов, которые потенциально могли бы снизить прочность баллона. Речь идет о трещинах, пленах, раковинах, а также вмятинах, рисках и коррозионных повреждениях глубиной более 10 % номинальной толщины стенки на наружной поверхности, при выявлении которых баллон бракуется. В случае ремонта дефектов остаточная толщина стенки не должна быть ниже минимально допустимого значения по ГОСТ 949–73, т. е. 6,8 мм [6].

Наибольшую сложность представляет осмотр внутренней поверхности. В процессе эксплуа-

тации баллоны вследствие коррозии теряют массу. Коррозией повреждается преимущественно их внутренняя поверхность под воздействием влаги, содержащейся в газах. Масса баллона контролируется при освидетельствовании с помощью взвешивания.

В работе [4] установлена интегральная норма потери массы, при превышении которой баллон переводится на пониженное рабочее давление, либо бракуется. К примеру, при уменьшении массы на 10 % баллон переводится на давление, сниженное против первоначально установленного на 15% [4]. Даже если удастся заметить снижение массы баллона из-за интегральности показателя нельзя установить за счет общей или локальной коррозии оно произошло.

Таким образом, при освидетельствовании баллона согласно действующим нормам [4], нельзя обнаружить участок стенки, поврежденный локальной коррозией, который может отрицательно повлиять на эксплуатацию баллона.

**Выбор метода контроля внутренней поверхности баллона.** Сложность контроля внутренней поверхности баллона состоит в том, что повреждения, как уже отмечалось, находятся на поверхности, обзор которой через отверстие в горловине даже с помощью видеозендоскопа ограничен. Кроме того, поврежденные участки могут располагаться в любом месте внутренней поверхности. В противоположность внутренней, наружная поверхность баллона, находящегося в эксплуатации, не подвержена коррозии, так как она окрашена.

Исходя из трудностей, с которыми связан осмотр внутренней поверхности баллона с целью контроля его состояния на уровне рядовой экспертизы, предпринята попытка заменить или дополнить этот визуальный контроль сплошной толщинометрией оболочки. Выбор остановили на УЗ измерении толщины стенки с использованием электромагнитно-акустического (ЭМА) метода как наиболее практичном. Приняв за базу для отсчета наружную поверхность, которая при эксплуатации не подвергается коррозии, измеряя толщину стенки через краску дискретно в отдельных точках или непрерывно, представляется возможным отобразить профиль внутренней поверхности баллона. Полнота отображения профиля и возможность обнаружения изменений, связанных с коррозией, зависит от количества и частоты размещения точек измерения. В связи с этим предпочтительно измерение толщины проводить сканированием.

Преимущество ЭМА-метода в сравнении с контактными УЗ методами толщинометрии в том, что он обеспечивает контроль по неподготовленной (окрашенной) поверхности без промежуточной среды (воды, масла, глицерина и т. п.). Контакт преобразователя с поверхностью изделия осуществляется за счет электромагнитного взаимодействия.

Особенность метода заключается в бесконтактном возбуждении УЗ волн в металле, т. е. датчик не касается поверхности, работая через слой воздуха и краски. С помощью ЭМА-преобразователя в поверхностном слое контролируемого металла создается сильное магнитное поле. Как только в катушку, смонтированную на магните, подается импульс переменного тока УЗ частоты, в поверхностном слое образуются вихревые токи. В результате их взаимодействия с полем магнита возбуждается УЗ волна, импульс которой направлен перпендикулярно поверхности металла, инициируя при этом колебания так называемого поперечного вида. Войдя в металл, импульс УЗ-волны достигает противоположной поверхности, отражается от нее и возвращается к месту контакта с катушкой, откуда он был подан. Вернувшийся импульс УЗ-волны взаимодействует с магнитным полем (создаваемым постоянным магнитом), в результате чего в поверхностном слое контролируемого металла снова возникают вихревые токи, электромагнитное поле которых наводит в катушке (которая смонтирована на постоянном магните) импульсы тока. Импульсы тока обрабатываются в значения толщины контролируемого металла.

Цель работы состояла в исследовании возможностей ЭМА-метода с помощью измерений толщины стенки установить контроль состояния внутренней поверхности баллона и в разработке предложений по его практическому использованию.

**Материалы и методика проведения.** Для выполнения работы применен УЗ толщиномер УТ-04 ЭМА (Дельта), созданный фирмой «Специальные Научные Разработки». Исследование возможностей контроля внутренней поверхности осуществлялось в два этапа: на контрольном образце, а затем на стандартных кислородных баллонах.

При проведении эксперимента на образце стояла задача установить достоверность отображения рельефа поверхности по измерениям толщины стенки с противоположной поверхности. Для этого был взят лист металла толщиной 5 мм прямоугольной формы (240×440 мм), имитирующий развертку фрагмента цилиндрической стенки баллона. На его лицевую и обратную поверхности наносились соответствующие друг другу координатные сетки с шагом 20×20 мм. Механически обратная поверхность листа на двух участках была модельно повреждена. А затем УЗ толщиномером ТУЗ-3 в узлах координатной сетки с лицевой поверхности проведен обмер образца.

На основании проведенных измерений построены диаграммы распределения толщин в образце для координатных сеток 40×40 и 20×20 мм. Как показали результаты, распределение толщин практически полностью соответствовало повреждению на обратной поверхности образца. При этом результаты измерений с координатной сеткой 20×20 мм более информативны.

Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил потенциально правильность решения об использовании толщинометрии со сканированием для отслеживания состояния внутренней поверхности баллона.

**Проведение исследования.** Исследование ЭМА-методом на стандартных кислородных баллонах проводилось на специализированном стенде толщиномером УТ-04 ЭМА с преобразователем, установленным на тележке с датчиком пути (рис. 1). Стенд оснащен простым приводом как для непрерывного перемещения тележки, так и для работы с остановками, на которых проводилось измерение толщины стенки баллона.

Измерениям была подвергнута партия баллонов с разным сроком службы, в том числе три новых баллона и семь снятых с эксплуатации (таблица). Зазор между преобразователем и окрашенной поверхностью баллона составил 0,5 мм. Измерение толщины осуществлялось последовательно по мере перемещения тележки с преобразователем в 28 точках на каждой из 16 образующих наружной поверхности. Управление процессом измерения было ручным. Следует отметить, что возможности прибора позволяют надежно работать с зазором до 2 мм.

Таким образом, толщина цилиндрической стенки баллона была измерена в 448 точках, равномерно

размещенных на наружной поверхности. Результаты измерений по каждому баллону были сохранены в памяти толщиномера, а затем с помощью программы «Толщиномер» преобразованы в удобный для практического использования вид.

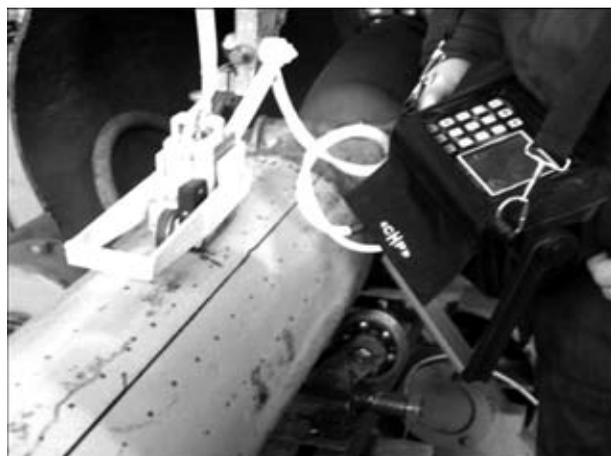


Рис. 1. Измерение толщины стенки прибором УТ-04 ЭМА

Измерения показали, что реальная толщина стенок изменяется в широких пределах независимо от срока службы исследуемых баллонов (см. таблицу). При этом диаграммы распределения толщин (рис. 2) отражают состояние внутренней поверхности баллонов и указывают на потенциально опасные участки цилиндрической стенки. В связи с неопределенностью места расположения таких участков в баллоне их наиболее вероятно обнаружить с помощью измерений со сканированием.

Свидетельством отсутствия надежного способа контроля состояния стенки баллонов явились результаты выполненных измерений: из пятнадцати эксплуатируемых три баллона подлежат отбраковке, а из семи снятых с эксплуатации в четырех толщина стенки соответствует требованиям [6].

Следует заметить, что технология производства баллонов и правила их освидетельствования формировались на определенном уровне возможностей и пониманий много лет назад. Сейчас с уверенностью можно утверждать, что не каждое утонение стенки баллона является несомненным

**Характеристика исследуемых баллонов по результатам толщинометрии**

Номер п/п	Заводской номер	Срок эксплуатации, год	Толщина стенки $\delta$ , мм		Нормативная пригодность к эксплуатации
			мин.	макс.	
Сдаваемые в эксплуатацию					
1	25	0	7,3	8,9	Пригоден
2	785	0	7,5	9,8	-«-
3	15365	0	7,3	8,8	-«-
Находящиеся в эксплуатации					
4	93636	18	6,9	9,1	-«-
5	467838	19	8,2	9,3	-«-
6	56607	21	6,8	8,6	-«-
7	1345	22	7,6	8,9	-«-
8	252557	27	8,0	9,7	-«-
9	224582	28	7,4	9,4	-«-
10	130503	30	7,2	9,1	-«-
11	112671	35	6,6	8,3	не пригоден
12	116264	33	6,8	8,7	пригоден
13	115181	36	6,0	9,7	не пригоден
14	286897	36	8,0	9,8	пригоден
15	30013	48	6,0	10,8	не пригоден
Снятые с эксплуатации					
16	269418	36	6,6	8,5	не пригоден
17	89952	48	6,1	10,3	-«-
18	91200	45	5,6	9,0	-«-
19	86482	48	6,9	8,2	пригоден
20	49607	49	7,4	8,0	-«-
21	147710	52	7,3	9,2	-«-
22	153737	56	7,8	9,6	-«-

*Примечание.* Минимально допустимая толщина стенки 6,8 мм согласно ГОСТ 949–73.

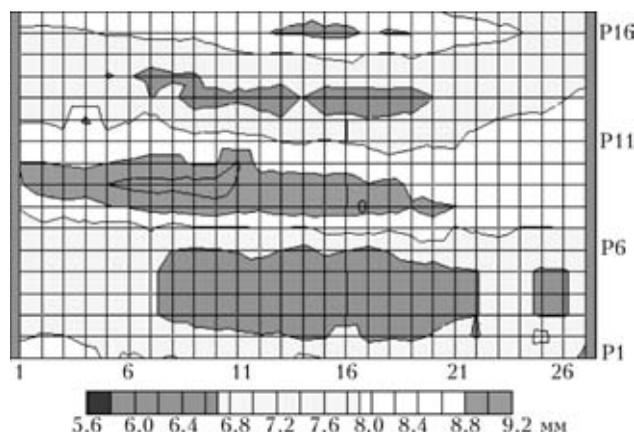


Рис. 2. Диаграмма распределения толщины стенки в баллоне № 13

поводом для его отбраковки. И здесь эффективным подтверждающим приемом могла бы быть сопутствующая коэрцитиметрия металла в области утонения. Если в такой зоне за время службы коэрцитивная сила металла не возросла по сравнению со средним значением по баллону, то это является доказательством того, что концентрации напряжений здесь не происходит. За счет перераспределения напряжений с соседними областями ускоренного накопления поврежденности в области локального утонения нет.

Технически несложно изготовить прибор, который одновременно одним и тем же датчиком измерял бы и толщину, и коэрцитивную силу металла. Изготовить простой механический стенд для оперативного 100 % контроля оболочки каждого баллона перед или в процессе его заправки сегодня и вовсе несложно и недорого. Такой контроль с базой данных по каждому баллону позволит существенно повысить безопасность эксплуатации парка баллонов [7].

### Выводы

Для повышения требований к техническому освидетельствованию эксплуатируемых баллонов показана необходимость отказа от интегрального

показателя потери массы от коррозии (п. 10.2.18 НПА ОП 0.00–1.07).

Бесконтактное измерение толщины стенки УЗ методом дает возможность дифференцированно подойти к оценке воздействия коррозии на металл баллона и может рассматриваться как эффективное средство по предотвращению аварийных ситуаций во время эксплуатации.

Выполненная работа показала, что с помощью измерения толщины стенок возможен эффективный контроль внутренней поверхности, являющийся составной частью оценки пригодности баллона к эксплуатации.

Для повышения разрешающей способности предложенного контроля следует рекомендовать увеличение точек измерения и применение сканирования.

Предложенный способ контроля состояния труднодоступных внутренних поверхностей с помощью УЗ толщиномера УТ-04 ЭМА должен найти широкое применение при диагностике металлоконструкций.

1. *Магнитный контроль и структурно-текстурные особенности металла кислородных баллонов* / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2011. — № 1. — С. 7–12.
2. *Чижиченко В. П.* Взрывобезопасность кислородных баллонов // Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 64–65.
3. *Белосточный А. В., Троцан А. И., Коротич И. К.* Исследование металла цельнометаллических баллонов для сжатых газов, разрушившихся при эксплуатации // Вестн. Приазов. держ. техн. ун-ту. — 2009. — Вып. № 19. — С. 91–94.
4. *НПА ОП 0.00-1.07-94.* Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (с изм. и доп.).
5. *Рубан А. Г.* Международный опыт обновления газобаллонного парка производителей промышленных газов // Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 54–63.
6. *ГОСТ 949-73.* Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на Рр Г 1 9,6 МПа.
7. *Безлюдько Г. Я., Елкина Е. И., Попов Б. Е.* Радикальное улучшение оценки текущего состояния кислородных баллонов применением метода коэрцитивной силы (по результатам исследований 1990–2000 гг.) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2011. — № 3. — С. 34–35.

Поступила в редакцию  
16.04.2012



# ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЛОЖНЫХ И МНОЖЕСТВЕННЫХ ЛОКАЦИОННЫХ АНТЕНН

С. А. НЕДОСЕКА, д-р техн. наук, М. А. ОВСИЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Рассмотрены вопросы формирования событий АЭ и надежности локации при использовании сложных и множественных локационных антенн. Показано влияние избыточности данных на получение достоверной АЭ информации. Показана важность и возможности оптимизации алгоритмов обработки АЭ информации при больших потоках данных.*

*The paper deals with formation of AE events and reliability of their location using complex and multiple location arrays. Influence of redundant data on obtaining valid AE information is shown. Importance and possibility of optimizing the algorithms of AE data processing at large data flows are shown.*

Использование метода акустической эмиссии (АЭ) на разнообразных промышленных объектах, внедрение систем непрерывного АЭ мониторинга на различных, в первую очередь потенциально опасных, производствах ставит новые задачи перед разработчиками программного обеспечения для систем АЭ контроля [1]. В частности, контроль оборудования газонефтехимических производств, барабанов котлов, технологических трубопроводов сложных конфигураций требует повышения достоверности получения данных об истинных источниках АЭ и отбраковки случайных технологических шумов, формирующих ложные источники, особенно при необходимости использования произвольной расстановки датчиков АЭ на объектах. Внедрение многоканальных систем АЭ с независимой работой каналов позволило перейти к принципиально новому способу работы — контролю и оценке состояния нескольких независимых объектов одновременно. Для такой работы АЭ систем требуется формирование нескольких локационных антенн различного типа с разделением обработки информации, поступающей от каждой антенны (группы датчиков АЭ, относящихся к одному объекту контроля, поступающая информация с которых обрабатывается как единый блок данных).

Требуется решить ряд методических вопросов при обработке данных АЭ в упомянутых случаях, а именно:

- выбор в реальном времени из очень большого потока тех данных, которые относятся к развитию повреждений и разрушению материала;
- обеспечение достоверности определения координат источников АЭ уже после фильтрации первоначальной информации;
- кластеризация данных по выбранным признакам, а затем оценка опасности и прогноз разрушения для каждого кластера отдельно.

© С. А. Недосека, М. А. Овсиенко, 2012

Для систем АЭ с независимой работой каналов существуют некоторые особенности, требующие внимания и аккуратности при обработке поступающей первоначальной информации. В работе [2] была представлена общая схема обработки непрерывного АЭ сигнала (рис. 1). При пересечении установленного порога принимающая аппаратура фиксирует время начала срабатывания  $t$ . При завершении срабатывания датчика данные отправляются на обработку. Это произойдет по окончании времени  $W$ . При возникновении события АЭ, которое вызовет  $N$  срабатываний различных датчиков, каждое из них будет характеризоваться своим временем начала  $t_1, t_2, \dots, t_n$  и длительностью  $W_1, W_2, \dots, W_n$ .

Опыт показывает, что в зависимости от конфигурации объекта контроля, его акустических характеристик и ряда других факторов указанные длительности могут быть достаточно произвольными. Таким образом, при всегда упорядоченности последовательности начала срабатываний  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$  во многих случаях будет нарушен порядок отправки данных срабатываний на обработку, поскольку условие  $W_1 < W_2 < \dots < W_n$  не соблюдается. Это может привести к неправильному объединению полученных срабатываний в общее

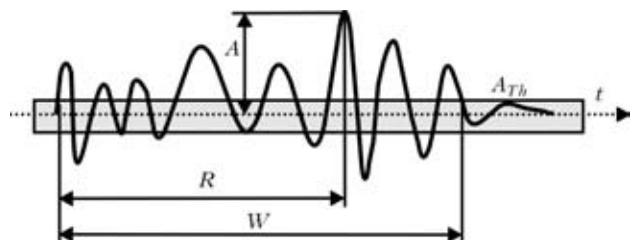


Рис. 1. Выделение единичного срабатывания датчика из непрерывного АЭ сигнала. Началом события считается превышение амплитудой сигнала порога дискриминации  $A_{Th}$ , завершением — снижение амплитуды до уровня ниже порога ( $A$  — максимальная амплитуда;  $W$  — полная длительность события;  $R$  — время нарастания сигнала до максимума; число осцилляций  $C$  соответствует числу выбросов сигнала над порогом)



событие АЭ, отбраковке корректных данных, ошибкам при проведении расчета координат источников событий.

Решением данной проблемы может быть установка определенного времени для накопления поступающих срабатываний, анализа их временной последовательности и, при необходимости, сортировка. Для этого создается временный массив поступающих данных, так называемый пул. Условиями очистки массива и передачи его данных на последующую обработку служат либо наполнение массива до указанного числа элементов, либо завершение установленного времени ожидания. Тем не менее, при множественной конфигурации локационных антенн либо при работе одной антенны с неравномерным расположением датчиков или большим их числом случайность временной последовательности срабатываний и необходимость ее упорядочивания приводят к некоторым особенностям, связанным с последующим программным повтором уже записанной информации. Особенность заключается в том, что первоначальный порядок поступления данных не может быть точно воспроизведен, если применен алгоритм сортировки. Это сказывается на общем числе сформированных событий АЭ и, соответственно, на результатах их кластеризации.

Таким образом, возникает выбор: получать в результате проведенных измерений гарантированно правильно сформированные события, но с различием картины в процессе измерений и после компьютерного повтора, или же обеспечивать полную тождественность данных при повторе, но с риском неправильного формирования отдельных событий. Представляется, что применительно к каждому конкретному объекту контроля должен быть индивидуальный подход в данном вопросе, а решение об использовании того или иного алгоритма следует основывать на предварительном АЭ обследовании объекта, проводимом до начала его испытаний.

Как уже отмечалось в работе [2], существует два основных подхода к формированию событий АЭ на основе пришедших на датчики и вызвавших их срабатывание сигналов:

– включение в событие всех срабатываний, зарегистрированных в установленный, достаточно малый промежуток времени;

– включение в событие фиксированного числа срабатываний на основании заранее заданного признака.

Были показаны преимущества и недостатки обоих подходов, но вопрос достаточности числа срабатываний, вошедших в событие, для надежной его локации не рассматривался. В простейших случаях теоретически достаточно срабатываний двух датчиков для линейной и трех для плоскостной локации, чтобы по разности времен прихода

определить координаты источника сигнала АЭ. На практике для надежной локации этого не всегда достаточно. В конструкциях и конструктивных элементах конечных размеров происходят изменения спектральных, амплитудных и частотных характеристик волн АЭ, их взаимодействие и переотражение. Это сказывается на локальных скоростях волн на конкретных участках материала, регистрируемых временах прихода сигнала на датчики, расчете временных задержек и определении координат источника.

Проведенные исследования показали, что избыточность информации, вошедшей в сформированное событие АЭ, положительно влияет на определение координат источника. Если использовать в качестве фильтра минимальное число срабатываний, на основе которых формируются события АЭ, то установка некоторой избыточности данного параметра позволяет получить более достоверные координаты источника [3]. Для примера приведем результаты тестов, проведенных при помощи встроенного генератора сигналов системы ЕМА-3 (рис. 2). Излучателем служил один из установленных на металлическом листе датчиков АЭ (№ 12). При выбранном режиме плоскостной локации и признаке формирования события, равном минимум трем срабатываниям, периодически образовывались события АЭ, координаты которых не соответствовали местоположению датчика. Проведенный анализ показал, что все эти события были сформированы из трех срабатываний (причины, по которым не срабатывал четвертый датчик в антенне или его срабатывание не удовлетворяло установленным критериям фильтрации, могут быть самыми различными — от взаимного влияния волн вследствие переотражения или слабой амплитуды сигнала до плохого акустического контакта датчика с поверхностью изделия). Изменение критерия набора события — до четырех срабатываний — позволило получить картину, полностью соответствующую физическому эксперименту (рис. 2, з). Все зарегистрированные события АЭ имели координаты, соответствующие местоположению датчика-излучателя.

Для полноты эксперимента при локации использовали различные алгоритмы расчета координат событий АЭ, прежде всего так называемую простую формулу:

$$X = B/2 \pm C\Delta t_i/2; Y = B/2 \pm C \Delta t_j/2,$$

где  $C$  — скорость распространения звуковой волны в материале;  $\Delta t_{i,j}$  — разность времен прихода (РВП) волны на ближайшие к источнику пары датчиков, расстояние между которыми равно  $B$ .

В качестве второго расчетного алгоритма применяли «метод пересекающихся окружностей» (далее просто «метод окружностей»), приведенный, в частности, в работе [4]. На основании имеющихся

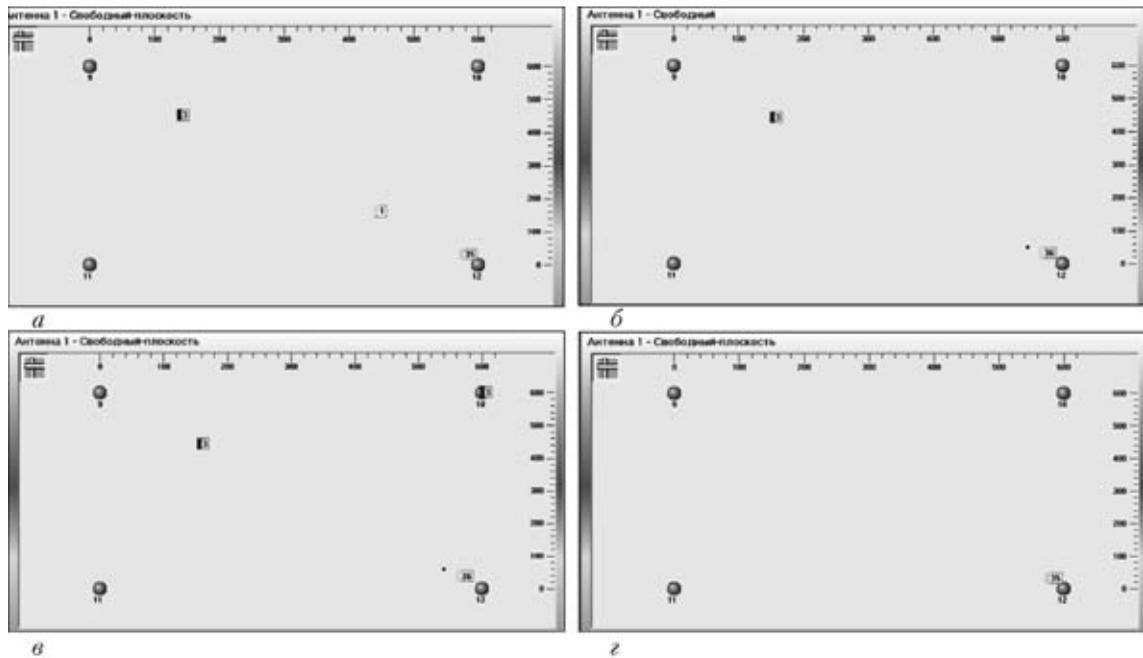


Рис. 2. Экран плоскостной локации системы ЕМА-3 при наборе событий из минимум трех (а–в) и четырех (г) срабатываний (а, г — «простая формула» определения координат; б — «метод окружностей»; в — «матричная локация»)

данных по временным задержкам прихода сигнала на разнесенные датчики строится набор пересекающихся окружностей, координаты источника определяют из системы общих уравнений.

Третий алгоритм представлял собой «матричную локацию», при которой координаты источника определяют по заранее теоретически рассчитанным временным задержкам, из которых составлена матрица. Правильными считаются тот набор задержек и соответствующие ему координаты источника, которые дают наименьшую невязку с данными, полученными при измерениях.

Как видим, во всех случаях, кроме последнего (рис. 2, г), формировались лишние события АЭ, не соответствующие реальному расположению источника. Отметим также, что при заданных значениях скорости звука «простая формула» дала наиболее точный расчет координат в условиях проводимого эксперимента.

Таким образом, помимо уточнения вопроса о принципах формирования событий АЭ было проведено сравнение двух принципиально разных способов определения координат источников АЭ по разности времен прихода сигнала на различные датчики. Первый основан на расчетных формулах, которые зависят от расположения датчиков и имеют высокое быстродействие, но разную точность расчета координат источников АЭ для разных участков объектов контроля. Второй базируется на предварительном расчете задержек в определенных точках объекта контроля и сравнении полученных при измерениях реальных задержек с заранее составленной матрицей. Точность его одинакова для всей поверхности объекта и зависит от шага, с которым задана матрица, а быст-

родействие обратно пропорционально количеству элементов матрицы. Весьма желательным представляется наличие в современных системах АЭ диагностики обоих методов расчета координат, которые можно использовать в зависимости от решаемой задачи.

Значительное число объектов АЭ контроля представляет собой протяженные конструкции или конструктивные элементы. К таким объектам относятся, в частности, балки, рельсы, трубы, арматура, крановые и фермовые конструкции. Первоочередной задачей при проведении контроля таких объектов является определение местоположения потенциально опасного сечения, в котором происходит процесс накопления повреждений и развитие разрушения [5].

Наиболее простой и однозначной, с точки зрения определения координат дефектов, на линейных объектах является схема, при которой датчики АЭ расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Такое расположение датчиков гарантирует, что при возникновении развивающегося дефекта первыми сработают два ближайших к нему датчика и расчет координаты источника может быть выполнен по приведенной выше формуле.

Формула может применяться и при неравномерном расположении  $N$  датчиков при соблюдении условия  $t_1 < t_i$  и  $t_2 < t_i$ , где  $i \neq 1, 2$  — индекс в наборе  $N$  времен прихода сигнала на датчики. Как только данное условие перестает выполняться, требуется использование специального алгоритма выбора данных для расчета координат, поскольку ближайшие к источнику датчики могут оказаться по одну и ту же сторону от него, и формула становится некорректной.

Неравномерное расположение датчиков на объектах контроля чаще всего диктуется конкретными производственными условиями — отсутствием доступа к отдельным участкам объекта контроля, наличием дополнительных элементов, требующих установки датчиков в непосредственной близости от них, сложной конфигурацией самого объекта (например, трубы со множественными гнибами, переходами сечения, наличием фланцевых соединений) и целым рядом других причин.

Пример расположения датчиков, при котором вначале сработают те из них, которые расположены по одну сторону от источника, приведен на рис. 1.

Схема размещения датчиков на рис. 3 такова, что при включении в событие фиксированного числа срабатываний, равному двум, в зависимости от расположения источника может возникнуть ошибка при определении координат по формуле, поскольку первыми сработают датчики с номерами 2 и 3, находящиеся по одну сторону от дефекта, и расчетная координата окажется между ними.

Следовательно, при неравномерном размещении датчиков на поверхности контролируемого изделия необходимо учитывать соотношение расстояний между датчиками, и событие АЭ должно состоять как минимум из трех срабатываний, причем обязательно расположенных по разные стороны от источника. Для этого необходимо применять специальный алгоритм, отслеживающий не только порядок расположения сработавших датчиков, но и расстояния между ними. Расчет координат затем можно выполнять по формуле, но по той паре срабатываний датчиков из минимум трех, которая соответствует физически правильному расположению дефекта, с учетом скорости распространения волны в материале и рассчитанных на этом основании значений макси-

мальных задержек для датчиков, расположенных по разные стороны от первого сработавшего.

Вопрос об избыточности данных для формирования события при линейной локации столь же актуален, сколь и при плоскостной. Помимо того, что для расчета координат в условиях неравномерного размещения датчиков требуется объединять в событие не менее трех срабатываний, важными критериями достоверности получаемой АЭ информации могут служить также число и порядок срабатывания всех датчиков локационной антенны. При наиболее жестком варианте условии формирования события АЭ является срабатывание всех без исключения датчиков в правильном порядке. Пропуск срабатывания одного из датчиков за установленный интервал времени или же нарушение последовательности прихода на датчик сигнала АЭ служит основанием для отбраковки такого события. Это гарантирует (рис. 4, б) отбраковку событий АЭ с неверно рассчитанной координатой (рис. 4, а, возле датчика № 5).

Причины упомянутых нарушений порядка срабатывания датчиков, как уже говорилось, могут быть самыми разными. Поэтому, проводя измерения на конкретном объекте, следует понимать, повлияет ли ужесточение критериев формирования событий на их конечное число таким образом, чтобы полученной информации было достаточно для оценки состояния объекта контроля. Например, при обследовании методом АЭ протяженных трубопроводов или других крупногабаритных объектов перед установкой критерия формирования события следует убедиться, что сигнал АЭ не затухает на больших расстояниях таким образом, что его получают только ближайšie к источнику датчики. Если же таковая ситуация обнаружена, следует понизить требования к форми-

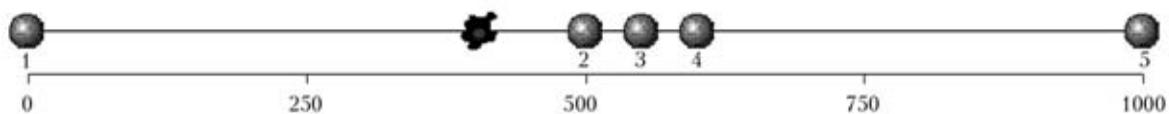


Рис. 3. Локационная антенна из пяти датчиков АЭ (при возникновении источника с координатой  $X = 400$  мм порядок срабатывания датчиков: 2, 3, 4, 1, 5)

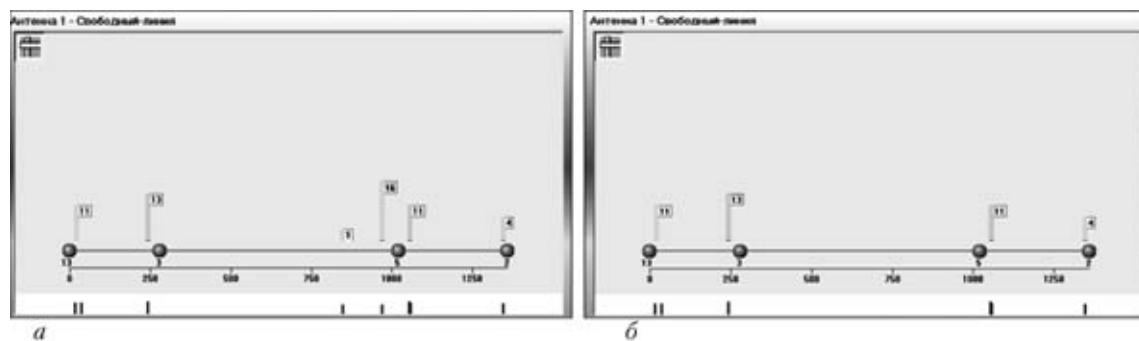


Рис. 4. Экран линейной локации системы ЕМА-3 при наборе событий из трех (а) и четырех (б) срабатываний (генератор сигналов АЭ устанавливали последовательно возле каждого датчика)



рованию событий, исходя из реальных условий проведения измерения.

Следует отметить, что в программном обеспечении систем ЕМА предусмотрена возможность проведения компьютерного повтора выполненных измерений с изменением настроек, в том числе критериев формирования событий (рис. 5) и способа расчета координат источников АЭ. Поэтому, в случае неоптимальной настройки системы перед началом измерения, ситуация может быть скорректирована при анализе полученной информации, за исключением невозможности восстановления предварительно отфильтрованных данных, которые при проведении измерения не сохраняются.

Использование множественных антенн АЭ с большим количеством каналов, одновременный анализ состояния нескольких объектов контроля предъявляют высокие требования к быстродействию используемых алгоритмов. Наиболее критичной частью по быстродействию является взаимодействие с жестким диском при записи больших объемов информации. Поэтому оптимизация программ с точки зрения выбора алгоритмов фильтрации, обработки поступающей информации и сохранения только тех данных, которые соответствуют реальным физическим процессам в материале, позволяет существенно повлиять на работоспособность АЭ систем, отсутствие задержек и зависаний при работе с большими потоками информации. В частности, применение научно обоснованной фильтрации на входе позволяет снизить число сохраняемых на диске данных срабатываний датчиков в десять и более раз.

Относительно спорным вопросом является расширение возможностей по тонкой настройке параметров АЭ измерений. Несмотря на риск, связанный с возможностью ошибок пользователей вследствие невнимательности или недостаточной квалификации (требования к персоналу изложены в документе [6]), следует признать наличие ре-

жима более углубленной настройки полезным. В частности, проведенный в данной работе анализ вариантов формирования событий АЭ и особенностей задания параметров и режимов, влияющих на точность расчета координат, стал возможен именно в связи с открытием в программном обеспечении систем ЕМА доступа к настройкам, которые ранее были жестко защищены в программе и не позволяли внесения изменений.

Реализованный расширенный вариант настройки системы АЭ контроля крайне полезен для углубленного изучения явления АЭ, разработке новых алгоритмов и программ обработки поступающей с объектов контроля соответствующей информации, а также при автоматизации процесса оценки технического состояния контролируемых объектов, что является одним из этапов реализации интеллектуальных систем контроля [7].

## Выводы

Программное задание минимального числа срабатываний датчиков АЭ при формировании событий позволяет регулировать достоверность и полноту получаемой информации.

Избыточность числа вошедших в событие АЭ срабатываний датчиков по сравнению с минимально необходимым повышает достоверность и точность определения координат источников сигналов АЭ.

Определение координат источников АЭ при линейной локации в условиях неравномерного расположения датчиков требует включения в событие АЭ минимум трех срабатываний и специального алгоритма выбора нужных для расчета задержек времен прихода. Данный алгоритм позволяет более гибко использовать линейные акустические антенны при проведении АЭ контроля сложных объектов.

Возможность программного регулирования критериев формирования событий АЭ позволяет повысить быстродействие программного обеспечения в условиях использования множественных локационных антенн.

Наличие в программном обеспечении расширенной настройки измерений и обработки данных позволяет более глубоко изучать явление АЭ, совершенствовать применяемые алгоритмы и методы оценки технического состояния сложных промышленных объектов.



Рис. 5. Экран мастера настроек системы ЕМА-3. Реализована возможность управления формированием событий (флажки для включения-выключения и поле ввода для установки минимального и максимального числа срабатываний)

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностика сварных конструкций. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
2. Недосека С. А., Недосека А. Я., Овсиенко М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2011. — № 2. — С. 7–17.
3. Недосека А. Я., Бойчук О. И., Овсиенко М. А. К вопросу об оценке погрешности определения источников акусти-



- ко-емиссионной информации на линейных объектах // Там же. — 1999. — № 1. — С. 68–70.
4. Грешиников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия для испытанных материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 273 с.
  5. Особенности распространения акустико-эмиссионных волн на поверхности трубно-оболочечных конструкций / А. Я. Недосека, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко, М. А. Яременко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2005. — № 2. — С. 24–27.
  6. СТД 50.06–2006. Технічна діагностика. Вимоги до підготовки і атестації персоналу з акустико-емісійного контролю та діагностування промислових об'єктів / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд та ін // Стандарт техн. комітету стандартизації України ТКУ 78 «ТДНК». — Київ, 2006. — 28 с.
  7. Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2012. — № 1. — С. 7–22.

Поступила в редакцию  
13.04.2012



## Промислові виставки ПАТОН ЕКСПО 2012

**17-19 квітня 2012 р.** в виставковому центрі «КиївЕкспоПлаза» відбувся Міжнародний промисловий форум ПАТОН ЕКСПО 2012, який кожного року навесні проводить НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України». В рамках форуму працювали виставки «Зварювання. Споріднені технології», «Трубопровідний транспорт» та «Неруйнівний контроль».

У виставці «Неруйнівний контроль» прийняли участь компанії, що входять до Асоціації «ОКО» («Ультракон-Сервіс», «Промприлад», «УкрНДІНК»), ТОВ НТЦ «Промтехнології» («Новотест»), ТОВ «Шерл» («Олімпус»), ТОВ «Телеоптік», ТОВ «Колізей XXI», УО НКТД, компанії «Оніко», «Інтрон-СЕТ», «Ультракон», «ДП-Тест».

В рамках виставки «Неруйнівний контроль» відбувся семінар «Неруйнівний контроль в трубопровідному транспорті», організаторами якого є Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, Дочірня компанія «Укртрансгаз» та НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України».

На семінарі, в якому прийняло участь біля 60 спеціалістів з різних наукових закладів України та фірм-розробників засобів НК, розглянуто актуальні питання неруйнівного контролю та діагностики технічного стану трубопровідних систем різного призначення:

- діагностування та моніторинг стрес-корозійних пошкоджень магістральних трубопроводів;
- контроль напружено-деформованого стану трубопровідних систем;
- діагностування технічного стану трубопровідних систем низькочастотними ультразвуковими хвилями без сканування поверхні труб;
- застосування рентгентелевізійного та тепловізійного методів контролю для оцінки технічного стану трубопровідних систем тощо.

В цілому семінар пройшов в діловій атмосфері, доповіді викликали багато питань та жваву дискусію. Учасники схвально відгукнулись щодо організації та проведення семінару. Матеріали семінару будуть опубліковані у збірці доповідей.

Спілкування фахівців з неруйнівного контролю на виставці та семінарі дасть змогу розширити ділові контакти, набути нових партнерів, домовитися про співробітництво на майбутнє.



## ВЫЯВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ЗОНЕ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ САМОЛЕТОВ ФИРМЫ «БОИНГ»

**В. Н. УЧАНИН**, канд. техн. наук (Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов),  
**С. В. СЕМОЧКИН, А. О. ЛОГИНОВ**, инженеры (Авиакомпания «Международные авиалинии Украины», г. Киев)

*Представлен опыт эксплуатационного контроля самолетов с помощью отечественных вихретоковых преобразователей и дефектоскопов, разработанных в результате анализа требований фирмы «Боинг», в частности: высокочастотные преобразователи локального типа для выявления поверхностных дефектов в зоне заклепок, на боковой стенке отверстий и в зоне зенковок; кольцевой низкочастотный преобразователь для выявления подповерхностных дефектов под обшивкой толщиной 1,8 мм; низкочастотный преобразователь скользящего типа для выявления поперечных подповерхностных трещин в зоне заклепок в третьем и четвертом слоях пятислойного узла.*

*The experience of operational aircraft inspection with eddy current probe and flaw detectors developed as the result of Boeing requirements analyzing is presented. Particularly next probes were developed: high frequency local type eddy current probes for detection for surface flaws in rivet zone, on the hole side wall and on the countersink zone; low frequency ring probe for detection of the subsurface flaws under 1,8 mm thickness plating; low frequency slide probe for detection of the subsurface flaws in rivet zone in 3-d and 4-th layers of the 5-layer unit.*

Для выполнения регулярных рейсов авиакомпании «Международные авиалинии Украины» уже более 18 лет использует самолеты фирмы «Боинг» различных модификаций. Контроль узлов самолетов проводится в соответствии с эксплуатационными бюллетенями этой фирмы. При этом особое внимание уделяется зоне отверстий для установки заклепок, которые относятся к критическим зонам, так как являются конструктивными концентраторами напряжений. Во многих случаях предполагается контроль без удаления заклепок, что требует более сложной интерпретации результатов контроля, поскольку необходимо отделить сигнал от трещины от сигнала самой заклепки, которая по существу тоже является нарушением сплошности материала.

Требования к средствам НК, стандартным образцам (СО) и порядок их применения изложены в соответствующем руководстве по НК самолета «Боинг 737» (NDT Manual). Методики расписаны по отдельным узлам самолета и рекомендуют, как правило, не один прибор, а дают перечень нескольких приборов и вихретоковых преобразователей (ВТП) известных западных производителей, которые обеспечивают требования, необходимые для реализации данной методики. Более того, отличительной особенностью методик фирмы «Боинг» является возможность применять средства, которых нет в перечне, но которые должны удовлетворять заданным требованиям по диапазону рабочих частот и чувствительности к дефектам при контроле конкретных узлов. При этом в каждой методике указаны годографы сигналов от де-

фектов и влияния мешающих факторов в комплексной плоскости, которые необходимо получить на соответствующем СО. Эта особенность методик позволяет их совершенствование путем разработки новых ВТП при условии доказательства их высоких технических характеристик при решении поставленной задачи. Заметим, что в большинство методик НК в регламентах по техническому обслуживанию самолетов российских и украинских производителей «закладывается» применение конкретного прибора. Такой подход исключает возможность применения авиакомпаниями современных средств НК. В этом случае методики НК устаревают вместе с техническим и моральным старением приборов, хотя заложенные в них процедуры контроля не изменяются.

В настоящей работе представлен опыт эффективной реализации методик контроля фирмы «Боинг» с помощью новых отечественных ВТП. При этом все новые ВТП трансформаторного типа были адаптированы к вихретоковым дефектоскопам ELOTIP 65.1 и ELOTEST M2 немецкой фирмы «Rohmann». Кроме того, для выявления поверхностных дефектов использовали автогенераторный высокочастотный дефектоскоп типа Леотест ВД 3.03Н [1–4], который включен в государственный реестр средств измерительной техники Украины. В соответствии с техническими регламентами прибор используется для выполнения контроля узлов самолетов ДП «Антонов» и авиационных двигателей ЗМКБ «Прогресс» и ОАО «Мотор-Січ» [2–4]. В последние годы дефектоскопы Леотест ВД 3.03Н существенно модернизированы в рамках существующих технических условий [1]. В частности, усовершенство-

ваны схема колебательной системы автогенератора, схема управления рабочей частотой и блок регенерации колебаний, что позволило поднять чувствительность и производительность дефектоскопов, а также расширить функциональные возможности приборов за счет обеспечения возможности подключения ВТП с разным импедансом [5–7].

**Выявление поверхностных дефектов с помощью высокочастотных ВТП локального типа.** Высокочастотные ВТП применяются для выявления поверхностных усталостных трещин на алюминиевой обшивке фюзеляжа, крыла и оперения самолета, а также на алюминиевых силовых конструктивных элементах. При этом разработано несколько конструкций ВТП, которые благодаря различной форме упрощают доступ ВТП в зону контроля. Разработаны, в частности, специальные ВТП для выявления дефектов на боковой стенке отверстий разного диаметра, а также для выявления поверхностных трещин на конической поверхности зенковки отверстия под заклепку. Кроме того, разработаны варианты экранированных

ВТП. Наличие экрана в виде ферритового кольца позволяет расширить контролируемую зону в области края отверстия, ферромагнитных болтов и т. д. В высокочастотных ВТП локального типа использованы ферритовые сердечники диаметром 1,1 мм, что позволяет выявлять поверхностные трещины длиной более 1,5...2,0 мм на рабочей частоте 0,3...2,0 МГц. Положительным свойством разработанных ВТП является их универсальность, так как они могут использоваться как с дефектоскопом Леотест ВД 3.03Н, так и с прибором ELOTEST M2.

Чувствительность разработанных высокочастотных ВТП проверяли на СО типа 126, NDT 1048, 188А американской фирмы «NDT engineering corporation», изготовленных из алюминиевого сплава 2024 с дефектами глубиной 0,38...0,51 мм, а также на СО типа СОП 5-1, СОП 5-2, СОП 5-3 с дефектами длиной 2 и глубиной 0,2 мм (для алюминиевых сплавов) и 0,5 мм (для титановых сплавов). Проверку ВТП для контроля отверстий проводили с помощью СО типа NDT 1016 с двумя угловыми дефектами типа трещина (рис. 1): де-

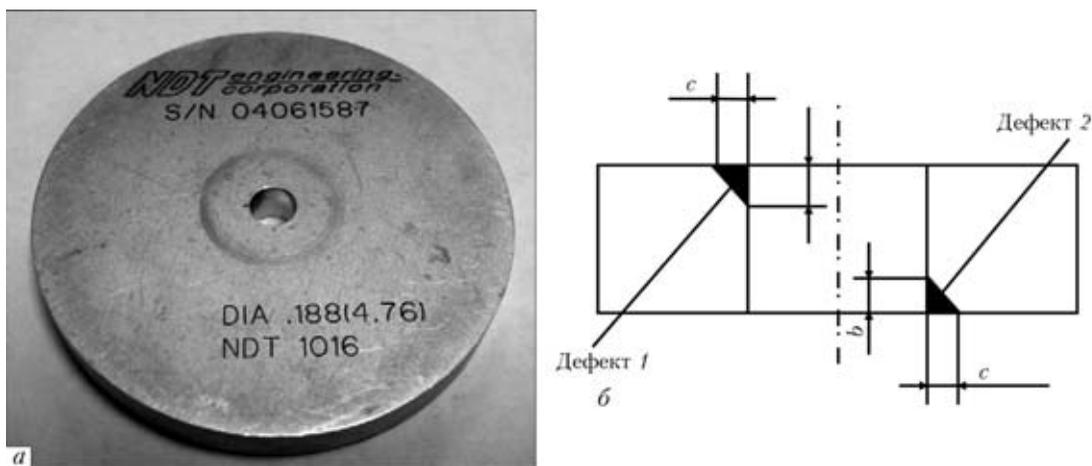


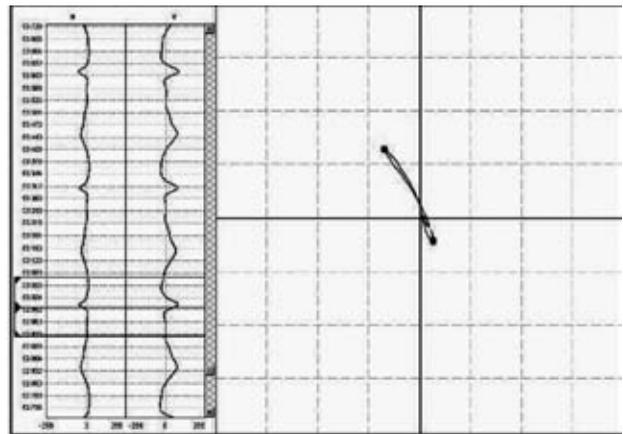
Рис. 1. Внешний вид (а) и схематическое изображение (б) СО для проверки чувствительности к угловым трещинам в отверстиях



Рис. 2. Выявление дефектов на боковой стенке отверстий (а) и в зоне потайных заклепок на крыле самолета (б) с помощью дефектоскопа Леотест ВД 3.03

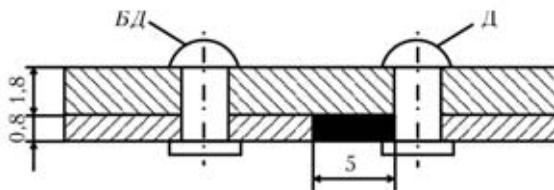


а

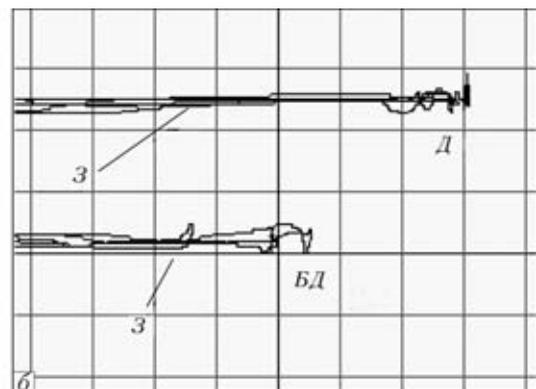


б

Рис. 3. Роторный сканер для контроля отверстий дефектоскопа ВД 3-81 (а) и сигнал, полученный в динамическом режиме от дефекта СО длиной и глубиной 0,51 мм (б)



а



б

Рис. 4. Схематическое изображение СО (а) для имитации заклепок в зоне заднего гермошпангоута и полученные сигналы (б)

фект 1 длиной  $c$  и глубиной  $b$  0,51 мм и дефект 2 соответственно 0,76 мм (рис. 1).

Выявление дефектов на боковой стенке отверстий или в зоне заклепок без их удаления (рис. 2) выполняют в статическом режиме (как альтернатива роторным ВТП) с помощью дефектоскопов типа Rohmann или автогенераторного дефектоскопа типа Леотест ВД 3.03. Контроль с помощью отечественного дефектоскопа типа Леотест ВД 3.03 более производителен, так как может осуществляться по оригинальной звуковой сигнализации без наблюдения за индикатором дефектоскопа.

Более производительным является контроль зоны отверстий в динамическом режиме с применением роторных ВТП. В этом случае применяются приборы фирмы «Rohmann», снабженные специальными роторными сканерами. Испытания показали, что для контроля отверстий может применяться отечественный дефектоскоп типа ВД 3-81 (Эддикон), который также снабжен роторным сканером (рис. 3, а) и имеет необходимые параметры фильтров [8]. На рис. 3, б показаны сигналы от наименьшего дефекта СО (Дефект 1 на рис. 1), которые подтверждают высокую чувствительность контроля отверстий с помощью дефектоскопа ВД 3-81.

**Выявление дефектов двухслойных узлов в зоне заклепок с помощью низкочастотного ВТП кольцевого типа.** Специальный кольцевой ВТП типа АРК 2/8 разработан для проведения контроля заднего гермошпангоута в зоне его крепления к Y-хорде по внутреннему ряду заклепок выше стрингеров 15L–15R. ВТП обеспечивает выявление трещин длиной более 5 мм во втором слое двухслойной конструкции из алюминиевого сплава (толщины слоев 1,8 и 0,8 мм) в зоне заклепок с диаметром головки 8 мм. Для настройки кольцевого ВТП используется СО из двух пластин



Рис. 5. Установка кольцевого ВТП на заклепку в зоне заднего гермошпангоута

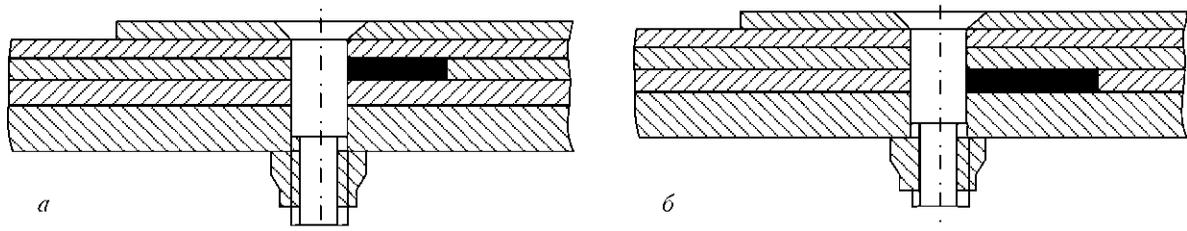


Рис. 6. Расположение трещин в зоне потайных заклепок в СО, который имитирует пятислойный узел: а — дефект 1, третий слой; б — дефект 2, четвертый слой

соответствующей толщины (рис. 4, а). Образец имеет заклепку без дефекта (БД) для проведения балансировки дефектоскопа и с дефектом (Д), выполненным электроэрозионным методом с раскрытием 0,1 мм длиной 5 мм, что соответствует необходимой чувствительности контроля. Сигналы ВТП исследовали на рабочей частоте 6 кГц. При настройке дефектоскопа вертикальное усиление  $K_y$  установлено на 12 дБ больше горизонтального  $K_x$ , что позволяет лучше выделить сигналы от дефекта при установке ВТП на заклепку (рис. 5). Сигналы от дефекта соответствуют переходу сигнала из точки балансировки БД в точку Д. Годографы сигналов от изменений зазора 3 для бездефектной и дефектной заклепок ориентированы в горизонтальном направлении.

Разработанный ВТП типа ARK 2/8 отличается от стандартных кольцевых ВТП значительно меньшей высотой (9,5 мм для ARK 2/8 против 25 мм для кольцевого ВТП фирмы «Rohmann»). Это позволяет устанавливать его на заклепки в труднодоступных зонах гермошпангоута, контроль которых другими ВТП невозможен и ранее не выполнялся [3, 9–11].

**Выявление внутренних дефектов в пятислойных узлах с помощью скользящего ВТП.** Наиболее сложной является задача выявления трещин в зоне заклепок потайного типа без их удаления. Такая задача возникает при контроле мно-

гослойной обшивки в районе дверного проема самолета в зоне вырезов под узлы навески двери. Сложность заключается в том, что необходимо выявлять трещины, которые могут зарождаться и развиваться от заклепок, на глубине от 3,6 до 6,1 мм в различных слоях пятислойного неразъемного узла общей толщины 13,68 мм (рис. 6). Трещины развиваются перпендикулярно направлению заклепочного шва, при этом влияние самих заклепок надо исключить.

Для решения задачи разработан вариант скользящего ВТП абсолютного типа, который работает в диапазоне рабочих частот 0,5...4 кГц [10]. Несмотря на абсолютную схему построения ВТП, он достаточно хорошо скомпенсирован, что позволяет получить хорошее усиление во всем диапазоне частот. Отметим, что ВТП такого типа не обеспечивают отстройку от влияния зазора, поэтому исключение влияния зазора при интерпретации сигналов необходимо обеспечить за счет анализа особенностей этих сигналов в комплексной плоскости. Исследования проводили на СО типа NDT 3049 американской фирмы «NDT engineering corporation» на рабочей частоте 500 Гц. На рис. 7 представлены сигналы от дефекта типа трещина длиной 11,43 мм, которые начинаются от заклепки, на глубине 3,6 мм в четвертом слое образца (Дефект 1), а также сигналы от трещины длиной 16,5 мм на глубине 6,1 мм в четвертом слое образца (Дефект 2). Для оценки возможности избирательной интерпретации сигналов на рис. 7 представлены также сигналы от бездефектной заклепки и влияния изменений зазора. Сигналы от бездефектной заклепки разворотом комплексной плоскости ориентированы в горизонтальном направлении, сигналы влияния зазора ориентированы вниз от точки баланса.

Анализ полученных сигналов показывает возможность четкого выделения сигналов от дефектов типа трещин в зоне заклепок на глубине до 6 мм от сигналов бездефектной заклепки и от изменений зазора между ВТП и контролируемой поверхностью.

Проведенные испытания показали, что представленные методики контроля узлов самолетов «Боинг» могут быть успешно реализованы при подключении разработанных низкочастотных

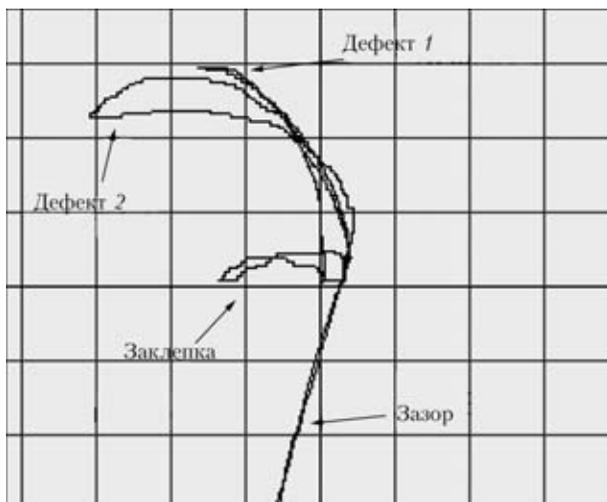


Рис. 7. Интерпретация сигналов ВТП при контроле пятислойного узла в зоне заклепок



ВТП к отечественному универсальному дефектоскопу типа ВД 3-81 (Эддикон) [8].

### Выводы

В результате анализа требований фирмы «Боинг» разработаны и эффективно используются для эксплуатационного контроля узлов самолетов следующие ВТП:

– высокочастотные ВТП локального типа для выявления поверхностных дефектов в зоне заклепок, на боковой стенке отверстий и в зоне зенковок;

– кольцевой низкочастотный ВТП (Ring probe) для выявления подповерхностных дефектов под обшивкой толщиной 1,8 мм;

– низкочастотный ВТП скользящего типа (Slide probe) для выявления поперечных подповерхностных трещин в зоне заклепок в третьем и четвертом слоях пятислойного узла.

Разработка новых ВТП частично выполнена в рамках программы НАН Украины «Ресурс».

1. *ТУ У 33.2-30162879-001*. Дефектоскопи вихрострумові ВД 3.01Н, ВД 3.02Н, ВД 3.03Н. — 2008.
2. *Учанин В. Н., Дереча В. Я.* Вихретоковый метод выявления поверхностных дефектов узлов авиационной техники в условиях эксплуатации // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 4. — С. 20–28.
3. *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. — Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Осташ, В. М. Федірко, В. М. Учанін та ін. — Львів: Сполом, 2007. — 1068 с.

4. *Учанин В. Н., Александров С. А., Цыганов В. Ю.* Вихретоковая дефектоскопия деталей авиационных двигателей в условиях эксплуатации и ремонта // Вісник двигунобудування. — 2009. — №2. — С. 151–155.
5. *Пат. 39207 України, МПК G 01 N 27/00*. Вихрострумовий дефектоскоп / В. М. Учанін, В. В. Черленевський (Україна). — № u 2008 11903; Заявл. 07.10.2008; Опубл. 10.02.2009. — Бюл. № 3. — 4 с.
6. *Пат. 39217 України, МПК G 01 N 27/00*. Вихрострумовий автогенераторний дефектоскоп / В. М. Учанін, В. В. Черленевський (Україна). — № u 2008 12095; Заявл. 13.10.2008; Опубл. 10.02.2009. — Бюл. № 3. — 4 с.
7. *Пат. 42132 України, МПК G 01 N 27/00*. Пристрій для вихрострумового контролю / В. М. Учанін, В. В. Черленевський (Україна). — № u 2009 00355; Заявл. 19.01.2009; Опубл. 25.06.2009. — Бюл. № 12. — 4 с.
8. *New Hand-Held Eddy Current Flaw Detector / A. Dshaganjan, V. Uchanin, A. Opanasenko, G. Lutcenko // 18th World conf. on Nondestructive Testing, 16–20 April 2012, Durban, South Africa.*
9. *Учанин В. Н.* Вихретоковые методы выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 3. — С. 3–12.
10. *Семочкин С. В., Учанин В. Н.* Опыт вихретокового контроля элементов конструкции самолетов фирмы «Боинг» в условиях эксплуатации // Матер. 14-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-2009». — Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2009. — С. 71–72.
11. *Учанин В. Н., Семочкин С. В.* Разработка и исследование вихретоковых преобразователей для контроля узлов самолетов фирмы «Боинг» в условиях эксплуатации // Праці 6-ї Нац. наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль і технічна діагностика». — Київ: ІЕЗ ім. С. О. Патона, 2009. — С. 347–350.

Поступила в редакцию  
16.03.2012



## Двадцатая ежегодная международная конференция и выставка

### «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»

1–5 октября 2012, Ялта

**Организаторы**  
УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», Украинское общество НК и ТД, Российское общество НК и ТД, Белорусская ассоциация НК и ТД, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Днепропетровский нац. ун-т, НПП «Машиностроение»

**Тематика конференции и выставки**  
• Общие вопросы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) • Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов • ТД и мониторинг состояния производственных объектов • Контроль напряженного состояния конструкций, изделий и сварных соединений • Опыт и перспективы НК на предприятиях горно-металлургического комплекса • НК и ТД в нефтегазовой отрасли и энергетике • Контроль и диагностика строительных конструкций • Вибрационные методы диагностики • Вопросы обучения, аттестации и сертификации специалистов, подразделений НК и ТД • Разработка и гармонизация стандартов в области НК и ТД • Метрологическое обеспечение средств НК • Состояние и развитие НК и ТД в Украине • Заседание Правления УО НКТД

**В работе выставки предполагается участие представителей фирм:** НПП «Машиностроение», НПП «Ультракон», НПП «Диагностические приборы», НПП «ИНТРОН-СЭТ», НПП «Ультракон-сервис», МЧТПП «Онико», Фирмы «GE Inspection Technologies», SEIFERT, «Krautkrämer», «Интек», НПП «КонТест», ППЦ «Диагностика и контроль», «Кром», «Шерл», «Сперанца-Украина», ЗАО НИИ МНПО «Спектр», ЗАО «Константа», Микроакустика, Панатест (Россия), АО «VOTUM»-АО «Интроскоп» (Молдова) и др.

**Информационная поддержка**  
Журналы: «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Сварщик», «В мире неразрушающего контроля», сборник ВАК Украины «Системные технологии», бюллетень УО НКТД «НК-Информ», Сайт УО НКТД: [www.usndt.com.ua](http://www.usndt.com.ua), сайт НПП «Машиностроение»: [www.ndt.in.ua](http://www.ndt.in.ua)

**Оргкомитет**  
02094, г. Киев, ул. Минина, 3, к. 47  
тел./факс: (+38 044) 5733040  
e-mail: [office@conference.kiev.ua](mailto:office@conference.kiev.ua),  
[www.conference.kiev.ua](http://www.conference.kiev.ua)

# РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИЙ СОЗДАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПА

## РЕЖИМ ВОЗБУЖДЕНИЯ. Ч. 2

Г. М. СУЧКОВ (НТУ «Харьковский политехнический ин-т»), О. Н. ПЕТРИЩЕВ (НТУУ «Киевский политехнический ин-т»),  
доктора техн. наук, С. В. ХАЩИНА, асп. (НТУ «Харьковский политехнический ин-т»)

*Представлена концепция построения ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа для систем неразрушающего контроля и технической диагностики металла. Получены выражения для расчета преобразователей электромагнитного типа на примере решения задачи для возбуждения продольных волн в стержне. Подтверждена возможность определения необходимых параметров преобразователя через функцию «частотная характеристика преобразователя».*

*Article is devoted to the development concept for construction of an electromagnetic ultrasonic transducers for such systems of nondestructive testing and technical diagnostics of metal. Expressions are derived for the calculation of the electromagnetic transducer type in the sample solution for the excitation of longitudinal waves in the rod. The possibility of determining the required characteristics of the transducer in terms of the «frequency response of the transducer».*

**Математическая модель проходного преобразователя в режиме возбуждения продольных волн в ферромагнитном токопроводящем стержне.** Рассмотрим пример построения математической модели преобразователя в режиме возбуждения продольных волн в ферромагнитном стержне кругового поперечного сечения (рис. 1). Будем полагать, что в объеме ферромагнитного стержня 1 создано постоянное аксиально-ориентированное поле подмагничивания с напряженностью  $H_z^0$ . Источник этого поля на рис. 1 не показан. Переменное магнитное поле с напряженностью  $\vec{H}^*(\rho, z) e^{i\omega t}$  создает катушка 2, по  $N$  виткам которой протекает электрический ток  $i(t) = I^* e^{i\omega t}$ . Далее будем считать, что поле подмагничивания является однородным, т. е. напряженность  $H_z^0$  не зависит от координат точки наблюдения в области существования переменного магнитного поля катушки. Очевидно, что такое поле можно создать с помощью соленоида, размеры которого в три-четыре раза превосходят размеры катушки 2. Представим ферромагнитный стержень 1 в виде цепочки магнитных доменов, которые одинаковым образом ориентированы постоянным магнитным полем  $H_z^0$ . В момент времени, когда аксиальный компонент  $H_z^*(\rho, z)$  направлен в ту же сторону, что и компонент  $H_z^0$ , разноименные полюса доменов сближаются и участок стержня под катушкой сжимается вдоль оси  $Oz$ . В то время, когда аксиальные компоненты  $H_z^*(\rho, z)$  и  $H_z^0$  ориентированы в противоположные стороны, силы

магнитного взаимодействия между полюсами доменов уменьшаются и силы упругости увеличивают длину участка стержня под катушкой 2. Таким образом, совместное действие постоянного поля подмагничивания  $H_z^0$  и переменного магнитного поля  $\vec{H}^*(\rho, z) e^{i\omega t}$  инициирует деформации сжатия-растяжения, энергия которых уносится продольными волнами в периферийные области стержня влево и вправо от катушки 2.

Рассмотрим низкочастотный случай, когда напряженно-деформированное состояние стержня практически не меняется в пределах площади его поперечного сечения. Это означает, что амплитуда гармонически изменяющегося во времени вектора  $\vec{u}(\rho, z)$  смещения материальных частиц стержня может быть полностью определена амплитуд-

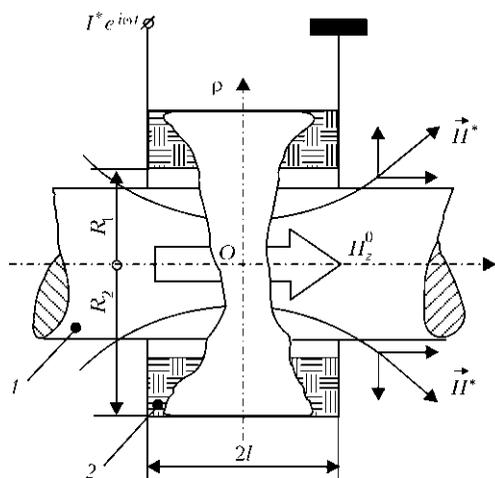


Рис. 1. Расчетная схема преобразователя электромагнитного типа с источником переменного магнитного поля в форме проходной катушки



ным значением  $u_z(z)$  его аксиальной компоненты. При этом уравнение (18) из работы [1] будет иметь следующий вид:

$$E^H u_{z,zz} + \rho_0 \omega^2 u_z - \hat{f}_z^*(z) = 0 \quad \forall z \in V, \quad (1)$$

где  $E^H$  — модуль Юнга ферромагнетика, экспериментально определяемый в режиме постоянства напряженности магнитного поля; запятая между индексами указывает на операцию дифференцирования записанного до запятой выражения по координате, индекс которой проставлен после запятой;  $\rho_0$  — плотность материала стержня;  $\hat{f}_z^*(z)$  — усредненная по площади поперечного сечения  $S = \pi \alpha^2$  ( $\alpha$  — радиус сечения) стержня амплитуда аксиальной компоненты вектора объемной плотности магнитострикционных сил, причём

$$\hat{f}_z^*(z) = \frac{2m_1}{\alpha^2} H_z^0 \int_0^\alpha \rho H_{z,z}^*(\rho, z) d\rho, \quad (2)$$

где  $m_1 < 1$  Гн/м — магнитострикционная константа;  $H_{z,z}^*$  — скорость изменения вдоль оси  $Oz$  аксиальной компоненты вектора напряженности переменного магнитного поля в объеме ферромагнитного стержня.

Так как вектор смещения материальных частиц стержня полностью определяется аксиальным компонентом, то граничные условия на боковой поверхности стержня (см. выражение (19) в работе [1]) выполняются автоматически.

Предположим, что длина стержня достаточно велика и в нем существуют только бегущие ультразвуковые волны. В этом случае необходимо особо оговорить условия физической реализуемости воздействия на физическую систему и условия физической реализуемости ее отклика. В качестве воздействия на стержень выступает объемная плотность  $\hat{f}_z^*(z)$  внешних сил, которая создается физически реализуемым источником и по этой причине удовлетворяет предельным условиям следующего вида:

$$\lim_{|z \rightarrow \infty} \hat{f}_z^*(z) = 0. \quad (3)$$

Отклик физической системы, т. е. амплитуда смещения  $u_z(z)$ , должен обращаться в нуль на бесконечном удалении от источника. Там же должны обращаться в нуль деформации сжатия–растяжения. Это равносильно выполнению следующих предельных условий:

$$\lim_{|z \rightarrow \infty} [u_z(z), u_{z,z}(z)] = 0. \quad (4)$$

Условия физической реализуемости (3) и (4) позволяют применить для решения уравнения (1) метод интегральных преобразований [2]. Для это-

го введем интегральные образы функций  $u_z(z)$  и  $\hat{f}_z^*(z)$  как прямое преобразование Фурье по координате  $z$ . Применение этого преобразования к уравнению (1) трансформирует его из дифференциального уравнения в алгебраическое, которое элементарно разрешается относительно интегрального образа аксиального компонента вектора смещения, т. е. величины  $u_z(z)$ . Обратное преобразование Фурье выполняется с помощью методов теории функций комплексного переменного [3]. Конечный вид решения уравнения (1) записывается следующим образом:

$$u_z(z) = \begin{cases} U_z^{(-)} e^{-i\gamma z}, & z > A, \\ U_z^{(+)} e^{-i\gamma z}, & z < -A, \end{cases} \quad (5)$$

где  $U_z^{(\pm)}$  — смещения материальных частиц стержня во фронте продольной волны или амплитуды продольных волн уходящих вправо (знак минус) и влево (знак плюс) от области существования внешних сил, т. е. от источника переменного магнитного поля;  $\pm A$  — физическая бесконечность ( $A \approx (2 \div 3)l$ ) или границы области существования переменного магнитного поля катушки;  $\gamma = \omega/v_{ст}$  — волновое число продольной волны;  $v_{ст} = \sqrt{E^H/\rho_0}$  — скорость распространения продольных волн в стержне.

При этом

$$U_z^{(\pm)} = \pm \frac{m_1 H_z^0}{E^H \alpha^2} \int_0^\alpha \rho H_{z,z}^*(\rho, \pm\gamma) d\rho, \quad (6)$$

где  $H_{z,z}^*(\rho, \pm\gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} H_{z,z}^*(\rho, z) e^{\pm i\gamma z} dz$  — Фурье-образ

аксиального компонента вектора напряженности переменного магнитного поля катушки в объеме токопроводящего ферромагнитного стержня.

Поскольку характер распределения объемной плотности магнитострикционной силы полностью определяется Фурье-образом  $H_{z,z}^*(\rho, \pm\gamma)$ , который, в свою очередь, полностью определяется конструкцией источника переменного магнитного поля, то можно полагать, что величины  $U_z^{(\pm)}$  содержат в своем аналитическом определении информацию о конструкции и основных параметрах источника упругих возмущений. По этой причине можно утверждать, что выражение (6) имеет смысл общего определения частотной характеристики преобразователя электромагнитного типа в режиме возбуждения продольных (недиспергирующих) волн в продольно намагниченном ферромагнитном стержне. Очевидно, что соотношение (6) играет ключевую роль в построении математической модели проходного преобразователя



электромагнитного типа. Оно указывает на то, что для определения амплитуд смещений материальных частиц в объеме металлического стержня необходимо и достаточно иметь в своем распоряжении интегральный образ того или иного компонента вектора напряженности переменного магнитного поля. Известно [4], что система уравнений Максвелла при наличии хотя бы одной границы раздела электрических или магнитных свойств среды во многих системах координат является неразрешимой в терминах компонент векторов напряженностей электрического или магнитного полей. Вместе с тем уравнения Максвелла легко разрешаются в терминах интегральных образов тех же величин не только для одной, но и для произвольного числа границ разделов сред с различными свойствами. Более того, в терминах интегральных образов компонент вектора напряженности электрического или магнитного поля возможно построение замкнутых решений для сред с анизотропией электрических и (или) магнитных свойств.

Применяя интегральное преобразование Фурье по координате  $z$  к системе уравнений Максвелла, трансформируем их в систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Эта система уравнений элементарно разрешается для внешней ( $-\infty < z < \infty$ ) и внутренней ( $0 \leq z < \infty$ ) областей существования переменного магнитного поля. На границе раздела областей, т. е. на поверхности ( $z = \alpha$ ;  $-\infty < z < \infty$ ) должны быть непрерывны Фурье-образы аксиальных компонент векторов напряженности и радиальных компонент векторов индукции магнитных полей, которые существуют по обе стороны от границы раздела. После удовлетворения этим граничным условиям получаем окончательный вид выражения для расчета Фурье образа  $H_z^*(\rho, \pm z)$ . После интегрирования этого выражения по формуле (6) можно записать в виде:

$$U_z^{(\pm)} = \pm I^* W_z^u(\omega, P), \quad (7)$$

где  $W_z^u(\omega, P)$  — передаточная характеристика или математическая модель проходного преобразователя в режиме возбуждения продольных недиспергирующих волн в ферромагнитном стержне; символом  $P$  в списке аргументов передаточной характеристики обозначен набор физико-механических и геометрических параметров преобразователя, расчетная схема которого показана на рис. 1.

Частотно зависимая функция  $W_z^u(\omega, P)$  определяет эффективность работы преобразователя на произвольно выбранной частоте  $\omega$  и рассчитывается по формуле:

$$W_z^u(\omega, P) = W_0 W_{\text{уп}}(\gamma, P), \quad (8)$$

где  $W_0 = m_1 H_z^0 N / (4E^H)$  — абсолютная эффективность преобразователя электромагнитного типа в режиме возбуждения упругих волн в ферромагнетике (магнитострикционной среде), м/А; при  $m_1 = 1$  Гн/м,  $H_z^0 = 1$  кА/м;  $N = 10$  и  $E^H = 125$  ГПа абсолютная эффективность  $W_0 = 2 \cdot 10^{-6}$  м/А;  $W_{\text{уп}}(\gamma, P)$  — волновая характеристика УЗ преобразователя — безразмерная функция волнового числа  $\gamma$  (в бездисперсионном приближении волновое число прямо пропорционально частоте, так как  $\gamma = \omega/v_{\text{ст}}$ ) и набора параметров преобразователя, которая показывает влияние частотно зависимых потерь на эффективность возбуждения упругих волн. Волновая характеристика преобразователя проходного типа является произведением двух волновых характеристик, а именно:

$$W_{\text{уп}}(\gamma, P) = W_{\text{к}}(\gamma, l, R) W_{\text{ст}}(\gamma, \zeta, \alpha), \quad (9)$$

где  $W_{\text{к}}(\gamma, l, R)$  — волновая характеристика источника переменного магнитного поля — функция, учитывающая влияние интерференционных потерь, которые определяются размерами катушки, на эффективность возбуждения продольных волн;  $W_{\text{ст}}(\gamma, \zeta, \alpha)$  — волновая характеристика токопроводящего стержня, которая учитывает потери эффективности, обусловленные скин-эффектом.

Волновая характеристика источника переменного магнитного поля определяется следующим выражением:

$$W_{\text{к}}(\gamma, l, R) = \frac{\sin \gamma l}{\gamma l} R(\gamma). \quad (10)$$

Функция  $R(\gamma)$  определяет влияние радиусов  $R_1$  и  $R_2$  укладки витков катушки на амплитуду возбуждаемых волн и рассчитывается по формуле:

$$R(\gamma) = \frac{\pi}{2(R_2 - R_1)} [\Xi(\gamma, R_2) - \Xi(\gamma, R_1)],$$

где  $\Xi(\gamma, R_k) = R_k [K_1(\gamma R_k) L_0(\gamma R_k) + K_0(\gamma R_k) L_1(\gamma R_k)]$ ;  $k = 1, 2$ ;  $K_v(\gamma R_k)$  и  $L_v(\gamma R_k)$  ( $v = 0, 1$ ;  $k = 1, 2$ ) — функции Макдональда и модифицированные функции Струве порядка  $v$  соответственно.

На рис. 2 показано изменение функции  $R(\gamma)$  и модуля функции  $W_{\text{к}}(\gamma, l, R)$  для фиксированной длины катушки  $l = \alpha$  и радиуса  $R_1 = \alpha$  (см. рис. 1). Изменяющимся параметром семейства кривых на рис. 2 является радиус  $R_2$ . Из анализа приведенных на рисунке результатов следует, что с ростом значений безразмерного волнового числа  $\gamma \alpha$  резко уменьшаются значения функции  $R(\gamma)$  и  $W_{\text{к}}(\gamma, l, R)$ . При этом функция  $W_{\text{к}}(\gamma, l, R)$  периодически обращается в нуль на частотах, которым соответствуют значения  $\gamma l = k\pi$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ). Сообразно значениям функции  $W_{\text{к}}(\gamma, l, R)$  меняется величина смещений материальных частиц во фронте продольной волны. Причиной отмеченных



особенностей поведения функции  $W_k(\gamma, l, R)$  и, как следствие, изменения амплитуд смещений материальных частиц стержня, является интерференция упругих волн, которые излучаются различными, находящимися в области существования переменного магнитного поля катушки, участками ферромагнитного стержня.

Объяснить это утверждение можно таким образом. Рассмотрим малый участок стержня, ограниченный поперечными сечениями  $z' \pm \Delta z (z > 0)$ , находящийся в области действия переменного магнитного поля. Материальные частицы этого участка стержня движутся под действием магнитоэлектрических сил и обмениваются импульсом с соседними частицами, т. е. выделенный участок стержня можно рассматривать как элементарный (в смысле мощности) излучатель, который генерирует стационарное поле смещений. Оно характеризуется стационарным распределением фаз по длине стержня. Другой малый участок, ограниченный сечениями  $-z' \pm \Delta z (z < 0)$ , можно интерпретировать как другой элементарный излучатель, который генерирует свое стационарное поле смещений. Оно на данной частоте имеет ту же длину волны, что и поле, излучаемое первым, симметрично расположенным, малым участком, и характеризуется так же стационарным распределением фаз по длине стержня. Между этими двумя распределениями фаз существует постоянный сдвиг, который пропорционален  $2\gamma z'$ , и, в зависимости от частоты колебаний и расстояния между излучающими участками, может приобретать значения в интервале от 0 до  $2\pi$ . В зависимости от величины этого фазового сдвига может наблюдаться либо взаимное подавление излучения двух, симметрично расположенных относительно плоскости  $z = 0$  участков стержня, либо такое сложение этих полей, которое максимально усиливает результирующее значение смещения материальных частиц. При некоторых значениях частоты разность фаз между стационарными полями, излучаемыми различными элементарными участками стержня, расположенными симметрично относительно плоскости  $z = 0$ , достигает такой величины, что наступает полная взаимная компенсация смещений материальных частиц, которые расположены вне области воздействия внешних сил на стержень. Такая ситуация соответствует нулевым амплитудам смещений и периодически повторяется с ростом частоты.

Из данных, приведенных на рис. 2, также следует, что увеличение толщины катушки приводит к сужению полосы частот, в которой происходит эффективное возбуждение продольных ультразвуковых волн. Сужение полосы частот происходит из-за того, что с увеличением поперечного размера катушки возрастает степень делокализации

ее магнитного поля в пространстве и, как следствие, увеличиваются линейные размеры области нагружения стержня переменным магнитным полем. Увеличение линейных размеров области существования внешних сил сопровождается уменьшением частоты, на которой возникает первый нуль частотной характеристики и, как следствие, происходит сужение полосы частот, в пределах которой происходит эффективное возбуждение УЗ колебаний.

Волновая характеристика токопроводящего ферромагнитного стержня рассчитывается по следующей формуле:

$$w_{ст}(\gamma, \zeta, \alpha) = \frac{[2I_1(\zeta \alpha) / \zeta \alpha]}{\gamma \alpha \left[ \frac{\gamma \mu_2^\varepsilon}{\zeta \mu_0} K_0(\gamma \alpha) I_1(\zeta, \alpha) + K_1(\gamma, \alpha) I_0(\zeta, \alpha) \right]}, \quad (11)$$

где  $I_\nu(\zeta \alpha)$ ,  $\nu = 0; 1$  — модифицированные функции Бесселя порядка  $\nu$ ;  $\zeta = \sqrt{\mu_3^\varepsilon (\gamma^2 + i\omega \mu_2^\varepsilon r_2) / \mu_2^\varepsilon}$  — комплексное волновое число, которое учитывает потери из-за скин-эффекта;  $\mu_2^\varepsilon$  и  $\mu_3^\varepsilon$  — компоненты тензора магнитной проницаемости в поперечном и продольном относительно постоянного поля подмагничивания направлениях;  $r_2$  — удельная электрическая проводимость материала стержня в поперечном относительно постоянного поля

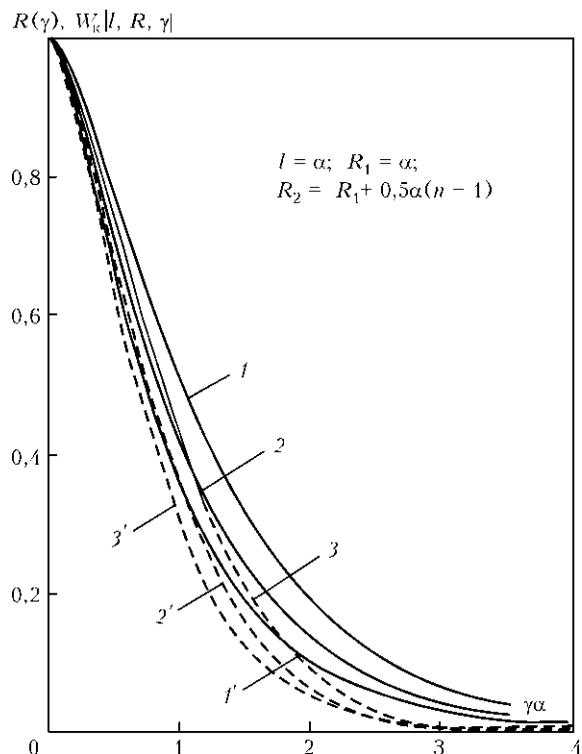


Рис. 2. Влияние размеров источника переменного магнитного поля на частотную характеристику преобразователя: 1–3 —  $R(\gamma)$ ; 1'–3' —  $|W_k(l, R, \gamma)|$

подмагничивания направлении;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  — магнитная проницаемость вакуума.

На рис. 3 приведены зависимости модуля волновой характеристики  $W_{\text{уп}}(\gamma, P)$  УЗ преобразователя электромагнитного типа, который возбуждает продольные волны в токопроводящем ферромагнетике (никель) (рис. 3, а) и в ферродиелектрике (феррите) (рис. 3, б). В обоих случаях варьируемым параметром является магнитная проницаемость ферромагнетика. Расчеты проводили в предположении, что  $\mu_2^{\varepsilon} = \mu_3^{\varepsilon}$ . Из приведенных данных следует, что с ростом значений магнитной проницаемости происходит сужение полосы эффективно возбуждаемых частот. Это происходит потому, что ферромагнитный стержень шунтирует силовые линии магнитного поля катушки. По этой причине с ростом магнитной проницаемости

материала стержня происходит увеличение длины магнитного следа катушки на стержне, т. е. происходит увеличение длины области нагружения ферромагнитного стержня переменным магнитным полем катушки. Если материал стержня проводит электрический ток, то магнитное поле катушки в ферромагнитном стержне делокализуется в еще большей степени. Длина области нагружения возрастает и, соответственно, сужается полоса частот, где происходит эффективное возбуждение ультразвуковых колебаний.

Из анализа представленных на рис. 3 результатов можно также сделать вывод, что описанный выше излучатель не в полной мере согласуется с приемником УЗ волн электромагнитного типа. Действительно, УЗ преобразователь электромагнитного типа, работающий в режиме приема УЗ колебаний, вырабатывает на своем электрическом

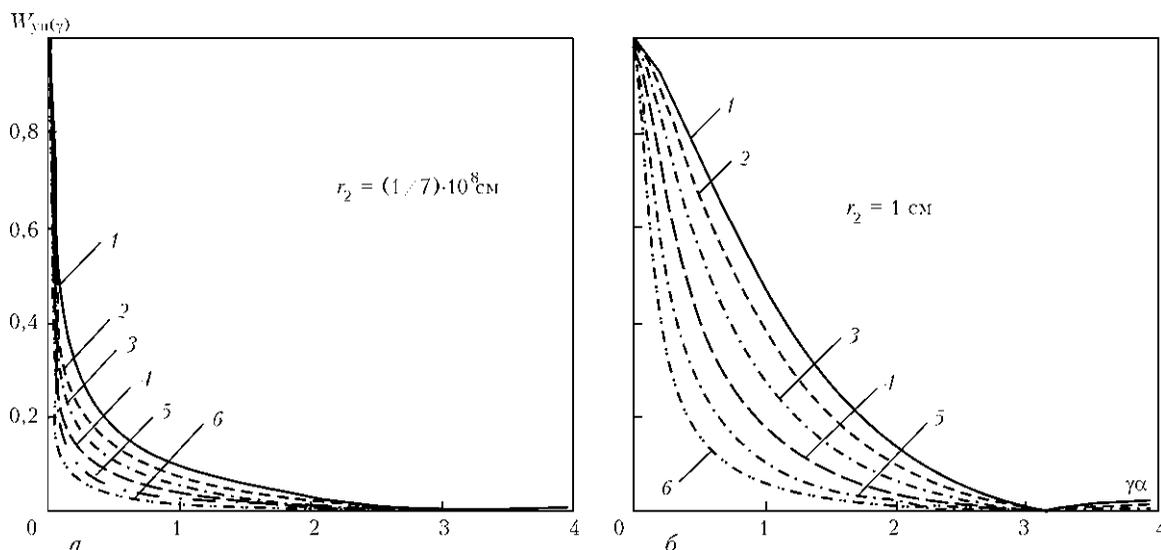


Рис. 3. Изменение частотной характеристики преобразователя в зависимости от значений магнитной проницаемости ферромагнитного стержня при электрической проводимости (а) и в случае ее отсутствия (б): ( $\alpha = 1 \text{ мм}$ ,  $R_1 = 1,05\alpha$ ,  $R_2 = 1,45\alpha$ ,  $l = \alpha$ ,  $\mu_3^{\varepsilon} = \mu_0 \cdot 2^{(k-1)}$ ,  $k = 1, \dots, 6$  для обоих случаев)

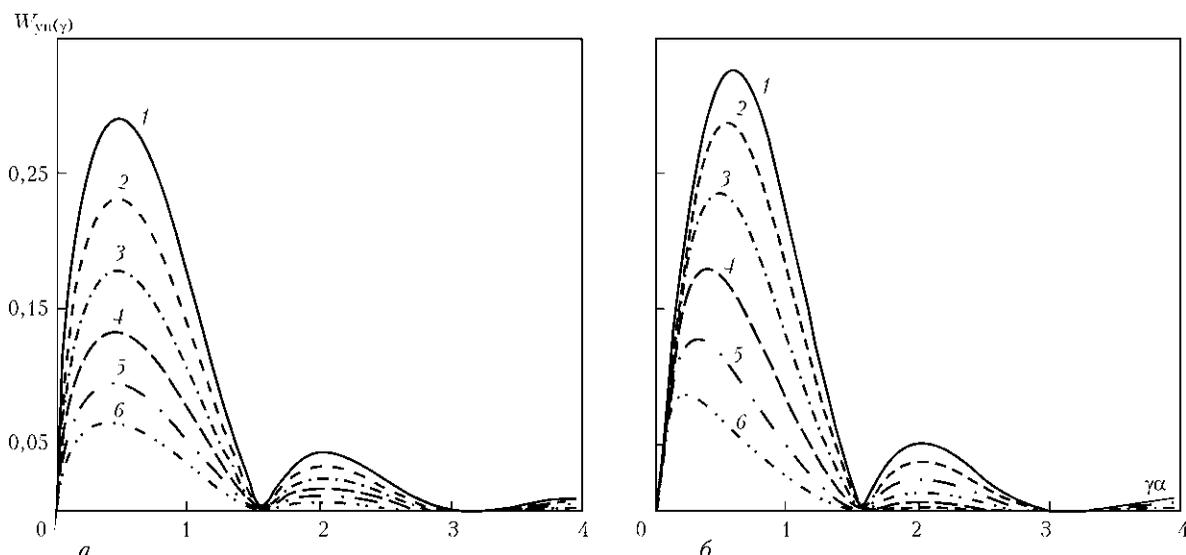


Рис. 4. Частотные характеристики преобразователя, содержащего две одинаковые встречно включенные катушки (обознач. те же, что и на рис. 3)



выходе сигнал, который прямо пропорционален скорости изменения магнитного потока через электрический контур приемника переменного магнитного поля. На нулевой частоте и в области низких частот сигнал на выходе приемника практически равен нулю. Как следует из анализа приведенных на рис. 3 кривых, именно в этом частотном диапазоне происходит наиболее эффективное возбуждение продольных волн однокатушечным проходным преобразователем. Указанное противоречие снимается, если в качестве излучающего преобразователя используется не одна, а две одинаковые, но встречно включенные, катушки. При этом  $U_z^{(\pm)} = -il^* W_{\text{уп}}^{(2)}(\gamma, P)$ , а волновая характеристика проходного преобразователя из двух встречно включенных катушек определяется следующей формулой:

$$W_{\text{уп}}^{(2)}(\gamma, P) = 2W_{\text{уп}}^{(1)}(\gamma, P) \sin \gamma(l + d), \quad (12)$$

где  $W_{\text{уп}}^{(1)}(\gamma, P)$  — определенная формулой (9) волновая характеристика однокатушечного проходного преобразователя;  $d$  — половина расстояния между встречно включенными катушками.

Рассчитанные по формуле (12) при  $l = d = \alpha$  графики показаны на рис. 4. Очевидно, что расстояние между катушками можно изменять в широких пределах — от нуля до сколь угодно большой величины, оказывая тем самым существенное влияние на волновую характеристику УЗ преобразователя электромагнитного типа. Полученные результаты согласуются с данными, опубликованными другими исследователями [5].

## Выводы

Показано, что для вычисления амплитуд смещений материальных частиц в объеме металла достаточно определить интегральный образ соответствующего компонента вектора напряженности переменного магнитного поля, создаваемого УЗ преобразователем электромагнитного типа. Тем самым устраняется проблема неразрешимости уравнений Максвелла при наличии границ разделов сред с различными электрическими и (или) магнитными свойствами.

Впервые получены соотношения, которые позволяют учесть влияние геометрических параметров источника переменного магнитного поля (ка-

тушки) в составе преобразователя электромагнитного типа на эффективность его работы в широком диапазоне частот. Показано, что увеличение размеров источника переменного магнитного поля сопровождается уменьшением полосы частот, в которой происходит эффективное возбуждение продольных волн.

Впервые вводится понятие волновой характеристики преобразователя электромагнитного типа. На примере проходного преобразователя показана процедура определения этой характеристики как функции, которая связывает частоту смены знака электрического тока на электрическом входе источника переменного магнитного поля с его геометрическими параметрами, с размерами поперечного сечения и физико-механическими свойствами материала стержня. Знание волновой характеристики преобразователя позволяет конструировать устройства УЗ неразрушающего контроля с прогнозированной работоспособностью (эффективностью) в заданном диапазоне частот.

Установлено, что однокатушечный УЗ преобразователь электромагнитного типа, возбуждающий продольные волны в ферромагнитном стержне, не согласован, в смысле частотного диапазона эффективной работы, с приемником УЗ волн той же конструкции. Предложена схема согласования частотных диапазонов эффективной работы проходных преобразователей электромагнитного типа, которые работают в режиме излучения и приема УЗ волн.

1. Сучков Г.М., Петрицев О.Н., Хащина С.В. Развитие концепций создания ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа. Режим возбуждения. Ч.1. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2012. — № 1. — С. 23–28.
2. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. — М.: Высш. шк., 1970. — 710 с.
3. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. III. Ч. 2. — М.: Наука, 1974. — 672 с.
4. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. — 727 с.
5. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справ. в 7 т. / Под. общ. ред. В. В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
6. Петрицев О.Н. Метод полигармонических разложений — новый подход к решению нелинейных задач магнитоупругости // Акустика и ультразвуковая техника. — 1987. — Вып. 2. — С. 85–90.

Поступила в редакцию  
16.01.2012



# МЕТОДЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОРОТКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С СОГЛАСУЮЩИМИ СЛОЯМИ

С. А. НАЙДА, А. В. КОРЖИК, доктора техн. наук, Т. Н. ЖЕЛЯСКОВА  
(НТУУ «Киевский политехнический ин-т»)

*Рассмотрены методы расширения полосы пластинчатых преобразователей путем возбуждения ступенчатыми и трапецеидальными импульсами. Методом комбинации переходных характеристик показана возможность излучения и рассчитаны амплитуда и форма короткого (полупериодного) ультразвукового импульса путем возбуждения резонансного недемпфированного преобразователя с двумя акустическими слоями электрическим импульсом ступенчатой формы, а методом интеграла Дюамеля – однопериодного импульса путем возбуждения трапецеидальным импульсом.*

*The methods of expansion of stripe of transducers are considered by excitation by step and razor impulses. The method of combination of transitional descriptions is show possibility of radiation and amplitude and form of short (half of period) ultrasonic impulse are expected by excitation of resonance undamped transformer with two acoustic layers the electric impulse of step form, and method of the Duhamel integral – impulse by duration one period by excitation by a razor impulse.*

Возбуждение одиночных акустических импульсов в воду механически недемпфированным пьезоизлучателем с помощью ступенчатых и трапецеидальных электрических импульсов длительностью, близкой к половине или целому периоду колебаний на резонансной частоте преобразователя, экспериментально продемонстрировано в работе [1]. Расчет условий возбуждения не проводился. Основное требование, предъявляемое к преобразователям, заключается в том, чтобы на их амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) был только один ярко выраженный максимум. Отмечается, что в первом приближении пьезопреобразователь может рассматриваться как система, описываемая дифференциальным уравнением 2-го порядка. Тогда переходная или импульсная характеристика должна иметь вид затухающих синусоид. Пример такой импульсной характеристики рассчитывается для напряжения конденсатора последовательного контура в работе [2].

Однако при качественном рассмотрении возбуждения пьезопреобразователя ступенчатым импульсом [1] на переходной характеристике и на осциллограмме УЗ импульса, возбуждаемого трапецеидальным, амплитуда первого полупериода меньше, чем второго (на это в работе [2] не обращается внимание).

Целью данной работы является исследование методов излучения одиночных импульсов недемпфированным пьезопреобразователем при наличии согласующих четвертьволновых слоев, что делает резонансной также и акустическую нагрузку. Такой пьезопреобразователь представляет ин-

терес для использования в медицинском широкополосном ультразвуковом сканере [3–6].

**Расчет формы и амплитуды импульсов по методу переходной характеристики.** Преобразователи УЗ медицинских эхоскопов состоят из кольцевых или линейных матриц пьезоэлементов, что позволяет осуществлять электронную динамическую фокусировку УЗ пучка, а также его секторное или линейное сканирование. Элементы в рабочей группе поочередно излучают ультразвук и принимают эхо-сигналы, т. е. совмещают функции излучателя и приемника звука.

В одночастотных (узкополосных) датчиках необходимая при приеме полоса частот получается либо за счет тыльного демпфирования, либо за счет двухслойной акустической согласующей (частично) системы. В последнем случае значительно увеличивается также чувствительность в режиме излучения, что особенно важно при излучении широкополосного акустического импульса.

Существенное различие случаев с тыльным демпфированием и без него заключается в том, что величина акустической нагрузки в первом случае чисто вещественная и не зависит от частоты, а во втором она комплексная (кроме отдельных частот) и частотно зависящая.

В случае четвертьволнового переходного слоя с большим волновым сопротивлением на АЧХ пьезоизлучателя наблюдаются два максимума, расположенные почти симметрично относительно частоты  $f_0$  [1]. Рост волнового сопротивления переходного слоя вызывает удаление максимумов друг от друга и увеличение их амплитуд. При волновом сопротивлении слоя



$$z_3 \leq 0,1 z_0 \text{ или } k_3 = z_3/z_0 \leq 0,1, \quad (1)$$

где  $z_3, z_0$  — волновое сопротивление слоя пьезоэлемента соответственно.

АЧХ имеет вид одnogорбой кривой и по своей форме становится близкой к АЧХ преобразователя без переходных слоев. Поскольку в [1] условие (1) приводится без доказательства, рассмотрим его в данной работе. Эквивалентная схема пьезопреобразователя с одним слоем приведена на рис. 1.

Реактивные элементы эквивалентного контура слоя  $L_{сл}$  и  $C_{сл}$  аналогичны массе и гибкости слоя. Если резонансная частота последовательного контура  $L_{др}, C_{д}$  и параллельного контура  $L_{сл}, C_{сл}$  одинаковые, то на этой частоте импеданс первого равен нулю, а второго — бесконечности.

На частотах  $f < f_2$  импедансы имеют соответственно емкостной и индуктивный характер. На частотах  $f > f_2$  наоборот. Это создает возможность их взаимной компенсации. Как показано в работе [7], условием этого является:

$$k_3 \leq 3\sqrt{2k_2^2}. \quad (2)$$

При типичном значении для воды  $k_2 = z_2/z_0 = 0,05$ :

$$k_3 \leq 0,17, \quad (3)$$

где  $z_2$  — волновое сопротивление биологической ткани.

Условие (2), в отличие от (1), зависит от  $k_2$ , как и следует ожидать из физических соображений.

Акустическая добротность на частоте  $f_0$  при таком значении  $k_3$  равна:

$$Q_a = \frac{\pi}{2} \left( \frac{k_3^2}{k_2} \right) = 2,7, \quad (4)$$

а при значении  $k_3 = 0,12 \leq 0,17$ , при котором АЧХ будет заведомо одnogорбой:

$k_3^2/k_2 = 0,28, Q_a = 5,5, \Delta f/f_0 = 1/Q_a = 0,18$ , что необходимо для пьезоприемника.

В случае двух слоев с волновыми сопротивлениями  $z_3, z_4$  такими, что:  $z_0 > z_3 > z_4 > z_2$ :

$$\Delta f/f_0 = 1/Q_a = \frac{2}{\pi} \left( \frac{k_3}{k_4} \right)^2 k_2, \quad (5)$$

где  $k_4 = z_4/z_0$ .

Приравняв это выражение величине 0,18, получим  $k_3/k_4 = 2,38$ . В отличие от случая с одним слоем здесь появляется возможность, сохраняя это значение отношения, и изменяя одно из значений  $k_3$  или  $k_4$ , находить второе.

Определим добротность преобразователя со слоями, необходимую для того, чтобы полоса пропускания в режиме приема была равна типичному для узкополосных датчиков с частотой механического резонанса  $f_0 = 3,5$  МГц значению полосы импульса с длительностью  $\tau_{и} = 2$  мкс, т. е.  $\Delta f = 1/\tau_{и} = 0,5$  МГц. Следовательно,  $Q = f_0 \Delta f = f_0 \tau_{и} = 7$ . Заметим, что соответствующая такой длительности импульса продольная разрешающая способность  $\Delta Z = 0,5c\tau_{и} = 1,5$  мм, где  $c = 1,5 \cdot 10^3$  м/с — скорость звука в биологической ткани.

Рассчитаем параметры преобразователя и слоев с таким значением акустической добротности, его комплексную передаточную функцию, а затем для импульсов возбуждения ступенчатой и трапецеидальной формы форму акустических импульсов. Расчетная схема преобразователя с генератором гармонических колебаний или импульсов представлена на рис. 2.

Здесь  $z_0 > z_3 > z_4 > z_2$  — удельные акустические импедансы пьезопреобразователя, первого и второго акустических слоев и акустической нагрузки — биологической ткани с  $z_2 = 1,5 \cdot 10^6$  Па/(с·м). Введем обозначения:  $k_l$  — коэффициент электромеханической связи для колебаний по толщине;  $n_3 = l_3/\lambda_3, n_4 = l_4/\lambda_4$  — волновые толщины слоев на частоте механического резонанса пьезоэлемента  $f_0$ ;  $\lambda_3, \lambda_4$  — длины волн в слоях на этой частоте.

Положим  $k_2 = 0,05, n_3 = n_4 = 0,25$ . Выражение для акустической добротности на частоте  $f_0$  имеет вид (4).

Приравняв его 7, получим  $k_3/k_4 = 2,1$ . Такая добротность может быть получена для целого ряда значений  $k_3$  и  $k_4$ , удовлетворяющих этому отношению. Абсолютные значения выберем, исходя из следующих соображений. При полном согласовании акустических импедансов двух безграничных сред с помощью четвертьволновых слоев

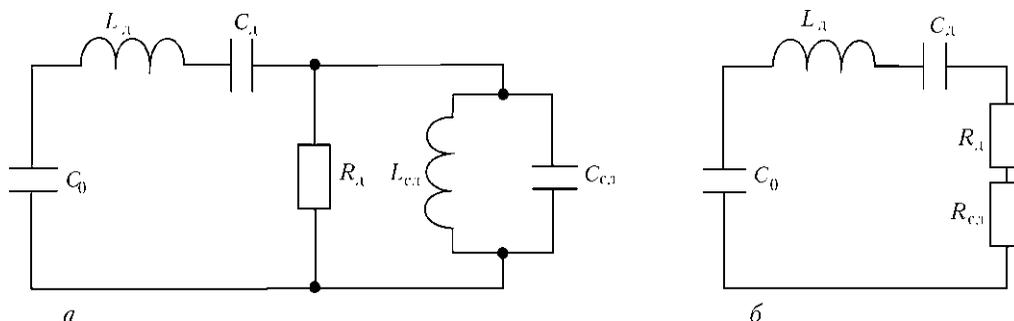


Рис. 1. Эквивалентная схема пьезопреобразователя с одним слоем: а — вблизи антирезонансной частоты пьезопреобразователя; б — на антирезонансной частоте  $f_0$

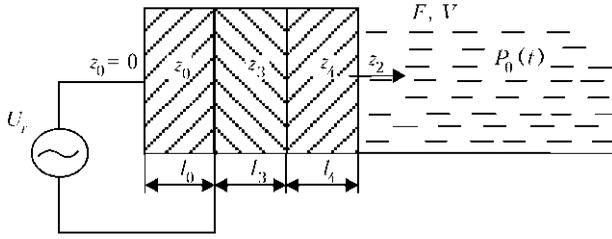


Рис. 2. Расчетная схема преобразователя с генератором гармонических колебаний или импульсов

импедансы сред и слоев должны удовлетворять условию биномиального трансформатора. При согласовании полуволнового пьезоэлемента со средой половина его толщины может рассматриваться в качестве дополнительного слоя с импедансом  $z_0$ . Для такой трехслойной системы и  $k_2 = 0,05$ ,  $k_3 = 0,273$ ,  $k_4 = k_3^2 = 0,074$  ( $k_3/k_4 = 3,7 > 2,1$ ), т. е. наблюдается неполное согласование. Выберем значение  $k_4 = 0,074$ , тогда  $k_3 = 2,1k_4 = 0,156$ .

Для расчета комплексной передаточной функции преобразователя воспользуемся матричным уравнением его как электромеханического четырехполюсника [1]:

$$\begin{pmatrix} U_r \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z_{1r} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{2r} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F \\ V \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $Z_{1r}, Z_{2r}$  — электрические сопротивления, включенные последовательно с  $U_r$  и параллельно преобразователю соответственно;  $\|A_{ik}\|, \|S_{ik}\|$  — А-матрицы самого пьезоэлемента и системы слоев соответственно;  $F, V, I$  — соответственно сила, колебательная скорость и ток.

Обозначив произведение матриц  $\|A_{ik}^*\|$  и  $x = f/f_0$ , из (6) получим:

$$K_n(x) = P/U_r = \frac{1}{A_0 A_{11}^* + A_{12}^*/z_2} = K_{n0} \Phi_n(x) e^{i\varphi_n(x)}, \quad (7)$$

где  $A_0$  — площадь преобразователя;  $K_{n0} = 2e_{33}/l_0$ ;  $e_{33}$  — пьезоэлектрическая постоянная;  $l_0$  — толщина пьезопластины.

Значения коэффициентов матрицы приведены в работе [1].

Временная зависимость акустического сигнала, возбуждаемого напряжением генератора с заданным комплексным спектром  $S_3(\omega)$ , находится с помощью обратного преобразования Фурье.

Вещественная часть временной зависимости акустического давления будет:

$$p_a(t) = \text{Re} \left[ 2 \int_{-\infty}^{\infty} S(f) K_n(f) e^{i2\pi ft} df \right]. \quad (8)$$

Если задается не спектр напряжения возбуждения, а временная зависимость  $U_3(t)$ , то:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U_3(t) e^{i2\pi ft} dt. \quad (9)$$

Из теории неперiodических детерминированных процессов для рассматриваемого случая наибольший интерес представляет функция включения:

$$U_3(t)_{\text{вкл}} = \sigma(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t > 0 \\ 0, & \text{при } t < 0 \end{cases}, \quad (10)$$

в точке  $t = 0$  эта функция неопределена. дельта-функция Дирака  $\delta(t)$ :

$$U_3(t)_d = \delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq 0, \\ \infty & \text{при } t = 0, \\ \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(t) dt = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Спектры этих функций в соответствии с (9) равны:

$$S_{\text{вкл}}(f) = \frac{1}{2\pi f} e^{-i\frac{\pi}{4}}, \quad (12)$$

$$S_d(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-i2\pi ft} dt = e^{-i2\pi f \cdot 0} = 1. \quad (13)$$

При подстановке (12) и (13) в (8) получим переходную (ПХ):

$$\begin{aligned} p_0(t) &= \frac{K_{n0}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Phi_n(f)}{f} \cos(2\pi ft - \varphi_n(f) - \frac{\pi}{2}) df = \\ &= \frac{K_{n0}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Phi_n(f)}{f} \sin(2\pi ft - \varphi_n(f)) df, \end{aligned} \quad (14)$$

и импульсную (ИХ) характеристики:

$$p_n(t) = 2K_{n0} \int_0^{\infty} \Phi_n(f) \cos(2\pi ft - \varphi_n(f)) df. \quad (15)$$

Следует отметить, что выражения (14), (15) применимы при  $t \geq 0$ . Комбинацией ПХ с разными знаками и временем начала можно получить требуемую форму акустического импульса.

Для произвольной  $U_3(t)$  применима ИХ, играющая роль весовой функции интеграла суперпозиции или интеграла Дюамеля, представляющего собой свертку двух функций:

$$p_a = \text{Re} \left[ 2 \int_0^t U_3(\xi) p_n(t - \xi) d\xi \right]. \quad (16)$$

Интеграл Дюамеля можно получить, подставляя (9) в (11) с заменой  $t$  на  $\xi$  и меняя порядок и пределы интегрирования:

$$\begin{aligned}
 p_a(t) &= \operatorname{Re} \left[ 2 \int_{-\infty}^t U_3(\xi) e^{-i2\pi f \xi} d\xi K_H(f) e^{i2\pi f t} df = \right. \\
 &= \operatorname{Re} \left[ 2 \int_0^t U_3(\xi) \left( \int_{-\infty}^{\infty} K_H(f) e^{i2\pi f(t-\xi)} df \right) d\xi = \right. \\
 &= \operatorname{Re} \left[ 2 \int_0^t U_3(\xi) P_H(t-\xi) d\xi \right].
 \end{aligned}$$

Обратим внимание, что в случае импульсов с длительностью  $\tau_H$  интеграл Дюамеля (16) берется с пределом интегрирования  $\tau$  при  $\tau < \tau_H$ , и  $\tau_H$  при  $\tau > \tau_H$ .

Вводя безразмерную частоту  $x = ff_0$  и безразмерное время  $y = t/T = f_0 t$  и заменяя интегрирование суммированием, для ПХ получаем выражение:

$$p(y_m) = \frac{\Delta x}{\pi} \sum_{i=1}^{38} \frac{\Phi_H(x_i)}{x_i} \sin[2\pi x_i y_m - \varphi_H(x_i)], \quad (17)$$

где  $x_i = i\Delta x$ ,  $i = S_1 \dots S_2$ ,  $y_m = m\Delta y$ ,  $m = 0 \dots 30$ ,  $\Delta y = 0,1$ .

**Возбуждение с помощью электрических импульсов ступенчатой и трапецеидальной формы.** В качестве возбуждающих рассматривались ступенчатый и трапецеидальный импульсы (рис. 3).

Ступенчатый импульс определяется следующим образом:

$$U_{ст}(t) = \begin{cases} E = 0 & \text{при } t < 0, \\ U_n & \text{при } 0 < t < \tau, \\ 0 & \text{при } \tau < t. \end{cases} \quad (18)$$

Скачки напряжения одинакового знака в моменты времени 0 и  $\tau$  формируют ПХ с разной амплитудой, сдвинутые друг относительно друга на половину периода колебаний с частотой  $f_0$ .

Трапецеидальный импульс записывается следующим образом:

$$U_{тр}(t) = \begin{cases} U_0(1 - kt) & \text{при } 0 \leq t < \tau, \\ 0. & \end{cases} \quad (19)$$

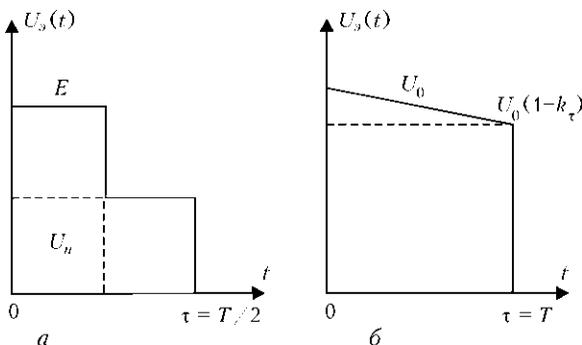


Рис. 3. Ступенчатый (а) и трапецеидальный (б) импульсы

Здесь скачки напряжения в моменты времени 0,  $\tau$  имеют противоположные знаки, поэтому длительность импульса, необходимая для компенсации ПХ, должна равняться одному периоду собственных колебаний преобразователя ( $\tau \cong T$  или  $f_0\tau \cong 1$ ).

Передаточная функция (ПФ)  $\Phi_H(x_i)$  приведена на рис. 4. В интервале  $x_i = 0,6 \dots 1,4$  с шагом  $\Delta x = 0,02$  она рассчитывалась при двух значениях волновой толщины слоев:  $n_3 = n_4 = 0,25$  и  $0,28$ ; в интервале  $x_i = 0,1 \dots 1,9$  с шагом  $\Delta x = 0,05$  при  $n_3 = n_4 = 0,25$ .

Из рис. 4 видно, что ПФ слабо зависит от толщины слоев в интервале 12 % четверти длины волны в каждом слое на частоте механического резонанса преобразователя  $f_0$ . Максимум ПФ находится на частоте  $x = 0,86$ , близкой к частоте электрического резонанса  $x_1 = \sqrt{1 - 8k_t^2/\pi^2} \cong 0,89$  при  $k_t^2 = 0,26$ . Ширина полосы на уровне 0,707 равна  $2\Delta x = 0,19$ , так что  $Q = \frac{x_{\max}}{2\Delta x} = 4,5$ , а коэффициент затухания  $\alpha/f_{\max} = \pi/Q = 0,7$ ;  $e^{-\alpha t} = e^{\alpha T(t/T)} = e^{-0,6y}$ .

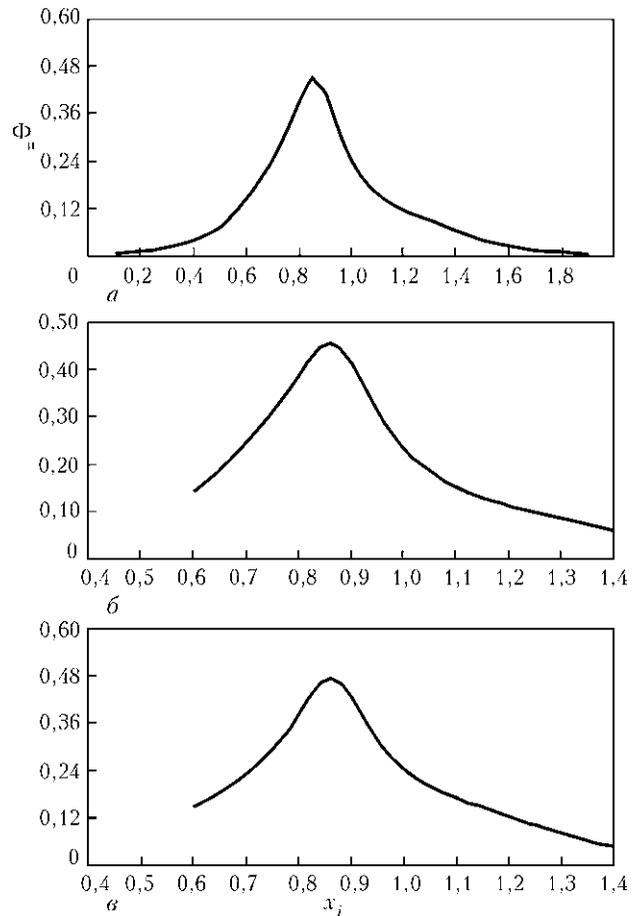


Рис. 4. Передаточная функция  $\Phi_H(x_i)$ : а — в интервале  $x_i = 0,1 \dots 1,9$  с шагом  $\Delta x = 0,05$  при  $n_3 = n_4 = 0,25$ ; б — в интервале  $x_i = 0,6 \dots 1,4$  с шагом  $\Delta x = 0,02$  при  $n_3 = n_4 = 0,25$ ; в — в интервале  $x_i = 0,6 \dots 1,4$  с шагом  $\Delta x = 0,02$  при  $n_3 = n_4 = 0,28$



ПХ излучателя представлена на рис. 5. Она рассчитывалась для  $n_3 = n_4 = 0,25$  и  $x_i = 0,6...1,4$  с шагом  $\Delta x = 0,02$  (а), и  $x_i = 0,1...1,9$  с шагом  $\Delta x = 0,05$  (б) с шагом  $\Delta y = 0,1$ . Положение нулей на этих кривых с точностью, равной 0,05, следующее:

- 1) 0,6; 1,2; 1,95; 2,6;
- 2) 0,55; 1,15; 1,95; 2,8.

Длительность полупериода соответственно равна:

- 1) 0,6; 0,6; 0,75; 0,65;
- 2) 0,55; 0,6; 0,8; 0,85.

Положение положительных и отрицательных амплитуд ПХ и их значений, а также значений функций

$(0,04 \exp 0,18) \exp(-0,6y) = 0,0476 \exp(-0,6y)$ ;  
 $-(0,025 \exp 0,48) \exp(-0,6y) = -0,04 \exp(-0,6y)$ ,  
 совпадающих с первыми положительными и отрицательными амплитудами представлены в таблице.

Видно, что затухание отрицательных амплитуд происходит по закону  $\exp(-0,6y)$ , а положительных отклоняется от него то в одну, то в другую стороны.

Из рис. 5 видно, что ПХ, полученные по значениям  $\Phi_n(x)$  в интервале  $x_i = 0,6...1,4$ , не отличаются от ПХ с  $\Phi_n(x)$  в интервале  $x_i = 0,1...1,9$ .

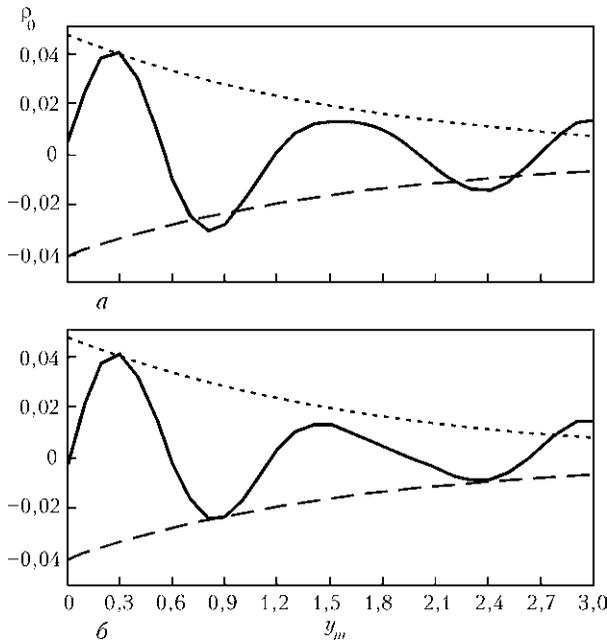


Рис. 5. Переходная характеристика излучателя  $p_0(y_m)$ : а —  $n_3 = n_4 = 0,25$ ,  $x_i = 0,6...1,4$ ,  $\Delta x = 0,02$ ,  $\Delta y = 0,1$ ; б —  $n_3 = n_4 = 0,25$ ,  $x_i = 0,1...1,9$ ,  $\Delta x = 0,05$ ,  $\Delta y = 0,1$

**Значения положительных и отрицательных амплитуд ПХ**

$U_{\max}$	0,3	-	1,45	-	2,95
$p_{\max}$	0,04	-	0,0125	-	0,015
$0,0476e^{-0,6y}$	0,04	-	0,02	-	0,08
$U_{\min}$	-	0,8	-	2,35	-
$p_{\min}$	-	-0,025	-	-0,01	-
$-0,04e^{-0,6y}$	-	-0,025	-	-0,00976	-

На рис. 6 представлена форма импульса, полученная комбинацией ПХ на границах ступенчатого импульса с длительностью  $f_0\tau = 0,6$  при условии:

$$U_n / (E - U_n) = \frac{p_0(0,8)}{p_0(0,3)} \cong 0,3 \quad (20)$$

Она рассчитывалась по формуле:

$$p_a(y_m) = p(y_m), \text{ при } m = 0...12;$$

$$p_a(y_m) = p_0(y_m) + \left| \frac{p_0(0,8)}{p_0(0,3)} \right| p_0(y_n), \text{ при } m = 13...30, \quad (21)$$

где  $n = m - 12 > 0$ , и представляет собой однополупериодный импульс с амплитудой  $0,04K_{и0}(E - U_n)$  с полной компенсацией второго полупериода и частичной последующих, амплитуда которых значительно меньше амплитуды первого. Спектр такого импульса в соответствии с (8):

$$\pi p_a(f) f_0 = \frac{\cos(0,6\pi f / p_0)}{1 - (f/f_0)^2}$$

На рис. 7 представлена форма акустического импульса, возбуждаемого трапецеидальным импульсом с длительностью  $f_0\tau = 1,2$  и  $k\tau = 1 - p_0(1,45)/p_0(0,3) = 0,8$ , рассчитанная по формуле:

$$p_a(y_m) = p_0(y_m) - \left| \frac{p_0(1,45)}{p_0(0,3)} \right| p_0(y_n) \quad (22)$$

( $n = m - 12 > 0$ ), не учитывающей наклонной части возбуждающего импульса, и формулам (15), (16) с заменой интегрирования суммированием:

$$p_n(y_m) = \Delta x \sum_{i=1}^{38} [\Phi_n(x_i) \cos(2\pi x_i y_m - \varphi_n(x_i))],$$

где  $y_m = m\Delta y$ ,  $m = 0...30$ ,  $\Delta y = 0,1$ ,

$$p_a(y_m) = \begin{cases} m \\ \Delta \xi \sum_{l=0}^{m-1} (1 - 0,67 \xi_l) p_n(y_m - \xi_l) & \text{при } m \leq 12, \\ 12 \\ \Delta \xi \sum_{l=0}^{m-12} (1 - 0,67 \xi_l) p_n(y_m - \xi_l) & \text{при } m > 12. \end{cases} \quad (23)$$

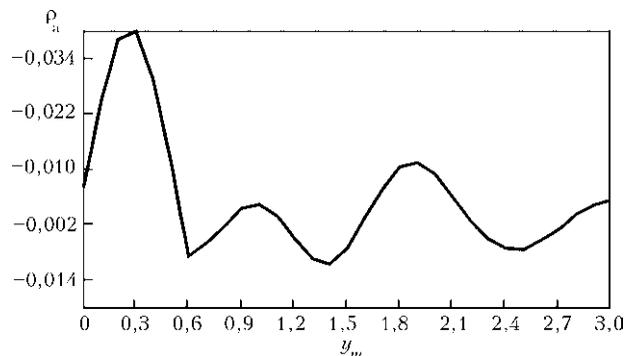


Рис. 6. Форма акустического импульса  $p_a(y_m)$ , полученная комбинацией ПХ на границах ступенчатого импульса

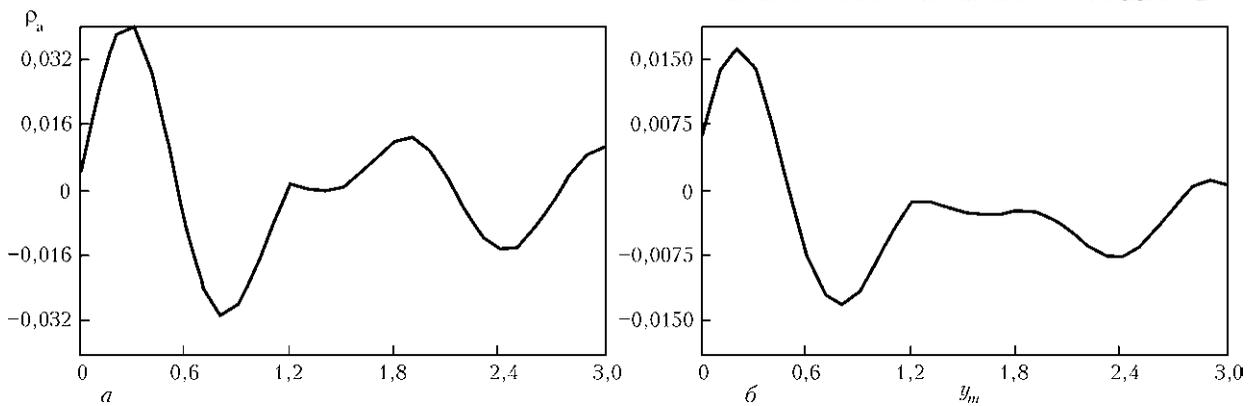


Рис. 7. Форма акустического импульса  $p_a(v_m)$ , возбуждаемого трапецидальным импульсом, рассчитанная по формулам: а (22) и б (23)

Такой датчик, являясь принципиально резонансной системой, позволяет формировать акустические импульсы с полосой частот от 0 до  $f_0$ . В эхоскопах, не использующих режим Доплера, он может быть использован как универсальный. Широкодиапазонность его в режиме приема может быть обеспечена перестройкой индуктивности, компенсирующей стационарную емкость преобразователя.

### Выводы

Методом комбинации переходных характеристик показана возможность излучения и рассчитаны амплитуда и форма короткого (полупериодного) УЗ импульса с полосой частот  $\Delta f/f_0 \approx 2$  путем возбуждения резонансного недемпфированного преобразователя с двумя акустическими слоями электрическим импульсом ступенчатой формы, а методом интеграла Дюамеля также однопериодного импульса путем возбуждения трапецидальным импульсом.

Показана возможность фильтрации широкополосного эхо-сигнала и изменения средней частоты

фильтруемой полосы путем компенсации емкости преобразователя с согласующими слоями параллельной индуктивностью и с помощью широкополосного процессора.

1. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. — Вильнюс: Минтис, 1975. — 258 с.
2. Баскаков С. И. Лекции по теории цепей. — М.: Изд-во МЭИ, 1991. — 224 с.
3. Найда С. А., Дидковская М. В. Широкополосный ультразвуковой терапевтический излучатель // Электроника и связь. — 1999. — № 6. — Т.2. — С. 86–91.
4. Найда С. А. Принципы построения широкополосных ультразвуковых терапевтических излучателей // Там же. — 2002. — № 14. — С. 35–38.
5. Найда С. А. Модель зв'язаних контурів у теорії нових широкополосних електроакустичних приладів для медицини, і в теорії слуху // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2004. — № 1. — С. 94–99.
6. Пат. 9958 UA, № u200504102; МПК 7 A61N1/00. Ультразвуковой терапевтический аппарат / С. А. Найда, В. С. Дидковский, О. П. Остапенко, М. К. Родіонов; Заявник НТУУ «КПІ». — Заявл. 28.04.2005; Опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10.
7. Дідовський В. С., Найда С. А. П'єзоелектричні перетворювачі медичних ультразвукових сканерів: Навч. посібник. — Київ: НМЦВО, 2000. — 178 с.

Поступила в редакцию  
20.12.2011

XIII Международная специализированная выставка приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля «Дефектоскопия» с 4 по 6 сентября 2012 г., Санкт-Петербург, Михайловский Манеж



Выставка «Дефектоскопия» — это мероприятие, ориентированное на практическое применение современных средств неразрушающего контроля и технической диагностики в промышленности, на транспорте, в строительстве.

[www.restec.ru.defectoscopy](http://www.restec.ru.defectoscopy)

9-я Международная специализированная выставка «Металлургия-2012» с 18 по 21 сентября 2012 г., Донецк



Специализированный выставочный центр «ЭКСПОДОНБАСС». Секция «Оборудование для проверки, испытаний и измерений»: контроль параметров жидкого металла; контроль качества; неразрушающий контроль; дефектоскопия; лабораторное оборудование.

[www.expodon.dn.ua](http://www.expodon.dn.ua)

## ДОСВІД ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛУ ТРУБ АМІАКОПРОВОДУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЇХ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

**В. Д. МИНДЮК**, наук. співр., **М. О. КАРПАШ**, **А. В. ЯВОРСЬКИЙ**,  
**І. В. РИБЦЬКИЙ**, **С. Р. ДОЦЕНКО**, кандидати техн. наук ( Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу)

*Представлено методологію оцінки фактичного технічного стану матеріалу труб аміакопроводу та результати неруйнівного контролю механічних характеристик матеріалу труб з використанням методів, що базуються на різних фізичних принципах. За результатами даних вимірювань визначено величину і характер деградації матеріалу труб, проаналізовано причини деградації.*

*A methodology of assessment of actual technical condition of material of ammonia line pipes is presented. Results of nondestructive testing of mechanical characteristics of pipe material using methods based on different physical principles are described. These measurement results are used to determine the value and nature of degradation of pipe material, and causes for degradation are analyzed.*

Питання оцінки фактичного технічного стану металоконструкцій різного призначення у промисловості стає особливо актуальним в умовах гострої потреби у продовженні терміну експлуатації об'єктів, що відпрацювали свій нормативний ресурс. Зі збільшенням віку трубопровідних систем, що мають високі експлуатаційні параметри (діаметри, тиск перекачуваного продукту, протяжність і т. п.), з'явилися нові науково-технічні проблеми, серед яких, перш за все, необхідно виділити проблему оцінки фактичного технічного стану трубопроводів і можливість їх подальшої експлуатації.

Вплив корозійно-активних середовищ, коливання температури, робочих навантажень та напружень, термоциклічні процеси теплонавантаження призводять з часом до зміни властивостей експлуатованого металу [1]. Ресурс безпечної експлуатації металоконструкцій залежить і від фактичного стану структури та фізико-механічних характеристик металу (ФМХ). З огляду на це забезпечення надійності та прогнозування технічного стану металоконструкцій має надзвичайно велике практичне значення. Забезпечення безаварійної експлуатації металоконструкцій можливе тільки на основі отримання й аналізу об'єктивних інструментальних даних про фактичний стан матеріалів і конструкцій, що підтверджується основними положеннями концепції Цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» на 2010–2012 рр.

Практичний досвід експлуатації трубопровідних металоконструкцій різного призначення показує, що у ході тривалої експлуатації відбуваються деградаційні зміни характеристик металу труб, у тому числі [2]: зниження пластичності, ви-

раженої в зближенні величин границі плинності  $\sigma_T$  і границі витривалості  $\sigma_B$ ; зниження тріщиностійкості, що супроводжується деградацією ударної в'язкості  $a_H$  (KCU).

Проблема забезпечення безаварійної роботи аміакопроводів як об'єктів підвищеної небезпеки ускладнена високою токсичністю транспортованого продукту, а також конструктивними особливостями прокладання трубопроводу — в зовнішньому металевому кожусі із газоподібним азотом у міжтрубному просторі (для підводних переходів).

При цьому внаслідок впливу зазначених вище чинників у сукупності з геодинамічним фактором оточуючого середовища особливої актуальності набуває питання моніторингу фактичних механічних характеристик металу трубопроводів для попередження аварійних ситуацій технічного характеру.

Авторами даної роботи проведені роботи по дослідженню фактичного технічного стану труб ділянок магістрального трубопроводу рідкого аміаку Тольятті—Одеса, що був прокладений у 1981 р., 1021 км якого проходить по території України. Роботи проводились на ділянках № 15, ГПС 13ЦЗ (Одеська обл., Березівський р-н, с. Донська Балка), без втручання в режим роботи трубопроводу. Аміак у трубах знаходиться у рідкому стані під тиском до 35 атм з температурою 4°C.

Діаметр труб аміакопроводу 355 мм, товщина стінок 8 і 12,7 мм. Трубопровід пролягає на глибині 1,4 м (порівняно з 0,8 м для нафтопроводів). В місцях переходів через водоймища та вологий ґрунт трубопровід має подвійну трубу товщиною 13 мм з прошарком азоту. Труби виготовлені з імпортованих сталей X42 та X46 (вітчизняний аналог сталі 17ГС відповідно до ГОСТ 5520 [3]).

Метою роботи було обстеження стану металу труб магістрального трубопроводу рідкого аміаку для визначення його механічних характеристик, зокрема ударної в'язкості та границі плинності, для отримання інформації про динаміку зміни цих характеристик, значення яких використовуються для розрахунку залишкового терміну служби трубопроводу. При цьому враховувався той факт, що більшість трубних сталей належить до категорії матеріалів із відношенням границі плинності до границі міцності в діапазоні 0,7...0,75. Для таких матеріалів характерне додаткове деформаційне зміцнення (максимум до 20 %) у зонах концентрації напружень за прикладеного циклічного навантаження.

Допустимі значення перерахованих критеріїв, приведених до температури 20°C, для труб з малоуглецевої сталі мають бути в межах [2, 4]:

$$\sigma_{тф}/\sigma_{вф} \leq 0,9; a_{нф}(KCU)_{20^{\circ}C} \geq 30 \text{ Дж/см}^2.$$

Згідно з нормативними документами, зокрема [5], указані механічні характеристики матеріалу труб рекомендується визначати неруйнівними методами контролю або, за необхідності, експериментальними випробуваннями вирізок матеріалу труб контрольованої ділянки трубопроводу. З метою збереження цілісності матеріалу трубопроводів доцільно використовувати неруйнівний контроль механічних характеристик з високою просторовою роздільною здатністю тих параметрів, які є найбільш чутливими до змін структури матеріалу. При цьому є можливість забезпечити широкий динамічний діапазон окремого методу, щоб виявляти малі зміни параметрів матеріалу.

Згідно з рекомендаціями [6], фактичні значення ФМХ металу повинні визначатися:

$\sigma_{тф}$ ,  $\sigma_{вф}$  — згідно з [7], а також допускається визначення механічних характеристик металу неруйнівними методами через випробування на твердість за Брінелем НВ згідно з [8, 9] тощо із використанням твердомірів, що відповідають вимогам згідно з [10], та використанням кореляційних залежностей, що регламентуються чинними нормативними документами, або за методиками, передбаченими паспортом відповідного коерцитиметра;

$a_{нф}$  — приладовим неруйнівним методом або руйнівним методом згідно з [11].

За умови досягнення будь-якого з перерахованих критеріїв свого граничного значення ділянка трубопроводу призначається на переукладання [4, 6].

У ході обстеження для визначення фактичних значень механічних характеристик було проведено вимірювання твердості поверхневого шару; ударної в'язкості; коерцитивної сили; питомого електричного опору матеріалу трубопроводу [12].

Важливо відмітити, що для визначення ФМХ металу труб аміакопроводу використовувалися методи і засоби, які базуються на різних фізичних принципах [12].

Інструментальну оцінку фізико-механічних і геометричних характеристик металоконструкцій підвищеної небезпеки (аміакопроводу Тольяті—Одеса) проводили з використанням наступних технічних засобів: структуроскопу КРМ-Ц-К2М; твердоміру динамічного ТД-32; мікроомметра БС3-010-2; інформаційно-вимірювальної системи ІВС-І2 (власного виготовлення); дефектоскоп ДІО-562.

Дослідження проводили почергово на шести перерізах трубопроводу, у кожному з яких вимірювання згаданих параметрів здійснювали у восьми точках (рис. 1).

В якості вихідних нормативних параметрів механічних характеристик використовували дані з сертифікатів на трубні сталі. За сертифікатами середні значення границі плинності  $\sigma_T = 331,4$  МПа та границі міцності  $\sigma_B = 516,5$  МПа для сталі Х42, а для сталі Х46 ці значення складають: границя плинності  $\sigma_T = 362,3$  МПа та межа міцності  $\sigma_B = 466$  МПа.

За сертифікатами середні значення ударної в'язкості  $KCU$  дорівнюють 70,54 кДж/см<sup>2</sup> для сталі Х42, а для сталі Х46 це значення складає 139,20 кДж/см<sup>2</sup> при температурі -40°C.

**Методика опрацювання результатів вимірювань.** Визначення ударної в'язкості було здійснено



Рис. 1. Місце вимірювання (шурф) (а) і місця та порядок розташування точок перерізу 1–8, на яких проводили вимірювання (б)

за шкалою  $KCV$  при температурі  $0^{\circ}\text{C}$ . В сертифікатах на сталі регламентовано значення ударної в'язкості по Менаже ( $KCU$ ) при  $-40^{\circ}\text{C}$ , визначених на зразках типу 1 відповідно до ГОСТ 9454-78. Значення  $KCV$  і  $KCU$  неспівставні (немає перевідних таблиць). Перевід здійснюється за формулою:

$$KCU (\text{Дж/см}^2) = (9,81/7,847) KCV (\text{Дж}). \quad (1)$$

Загалом слід зазначити, що випробування на зразках з  $V$ -подібним надрізом більш жорсткі, ніж з  $U$ -подібним, тому чисельному значенню  $KCV$  можуть відповідати більші значення  $KCU$ .

Границя витривалості  $\sigma_B$  розраховувалась за значеннями твердості за шкалою Брінеля та за значеннями коерцитивної сили.

За значеннями твердості НВ:

$$\sigma_B = \text{НВ}(\text{МПа})k, \quad (2)$$

де  $\text{НВ}(\text{МПа}) = \text{НВ} \cdot 9,81$ ;  $k = 0,345$  для  $\text{НВ} < 1500$  та  $0,36$  для  $\text{НВ} > 1500$ .

Оцінка границі об'ємної міцності за поверхневою твердістю не дає достатньо високу кореляцію внаслідок ортотропності властивостей матеріалу по товщині. Для інтегральної оцінки границі міцності в локальному об'ємі матеріалу додатково було використано метод коерцитивної сили.

За значеннями коерцитивної сили границя витривалості визначалась за табличними значеннями (рис. 2) [13].

Для сталі 17Г1С з достовірністю апроксимації  $R_2 = 0,91$  (рис. 2) [13]:

$$H_c = 0,0237\sigma_{0,2} - 5,54, \quad (3)$$

$$H_c = 0,0183\sigma_B - 8,53. \quad (4)$$

Границя плинності  $\sigma_T$  була визначена за Методикою виконання вимірювань границі плинності конструкційних (трубопровідних) сталей [16].

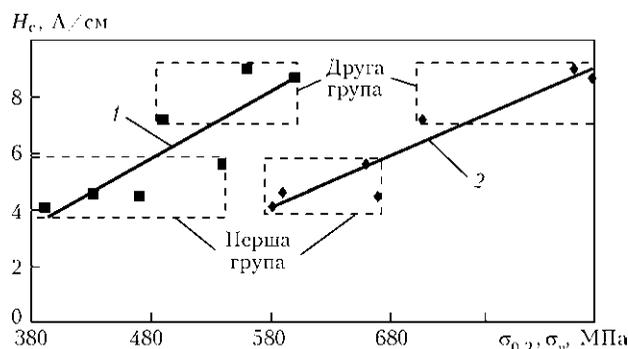


Рис. 2. Залежність коерцитивної сили від границі плинності (1) та міцності (2) для сталі марки 17Г1С

Таблиця 1. Значення механічних характеристик труб, що не були в експлуатації

Сталь	Нормативна $\sigma_B$ , МПа	Нормативна $\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ (за НВ), МПа	$\sigma_B$ (за коерцитивною силою), МПа	$\sigma_T$ (за методикою), МПа	$\sigma_T$ (за коерцитивною силою), МПа	Ударна в'язкість при температурі $0^{\circ}\text{C}$ , кДж/см <sup>2</sup>
X42	516,5	331,4	420,8	399,7	245,7	380	72,46
X46	466	362,3	476,1	435,5	268,5	390	48,12

Напружений стан за значеннями коерцитивної сили встановлено за номограмами (рис. 3) [14].

Дійсні механічні характеристики визначались за результатами вимірювань відповідно до методик [15, 16].

**Аналіз результатів вимірювань.** На початковому етапі було проведено обстеження металу труб аварійного запасу підприємства Укрхімтрансміак. Труби аварійного запасу в експлуатації не були ( $D_{\text{тр}} = 355,6$  мм).

Результати фактичних значень механічних характеристик труб аварійного запасу надані в табл. 1.

Як показують результати вимірювань, границя міцності та границя плинності незначно деградували (в межах 10 %), що не становить загрози за нормальних (незмінних) умов експлуатації ділянки трубопроводу. А відношення границі плинності до границі витривалості для сталі X46 зменшилось (від 0,777 за нормативними значеннями до 0,616 за вимірними) при одночасному зниженні границь плинності і витривалості. При цьому зменшується коефіцієнт запасу безпечної експлуатації з 1,7...2,3 до 1,4...1,6 (табл. 2).

Результати вимірювань ударної в'язкості показали, що за температури  $0^{\circ}\text{C}$  для сталі X42 удар-

Таблиця 2. Залежність значення коефіцієнта запасу міцності  $n$  від відношення  $\sigma_T/\sigma_B$  в розрахунках за границею плинності при дії статичних навантажень

$\sigma_T/\sigma_B$	0,45...0,55	0,55...0,7	0,7...0,9
$n$	1,2...1,5	1,4...1,8	1,7...2,3

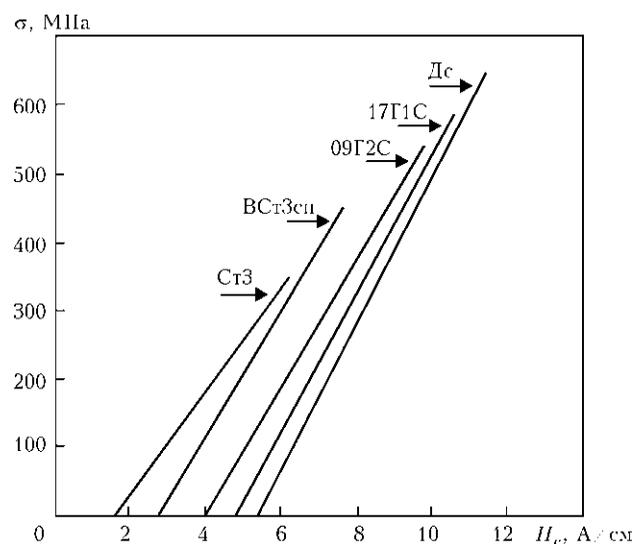


Рис. 3. Номограми для контролю напружень за коерцитивною силою при однобічному розтягуванні плоских зразків із конструкційних сталей



**Таблиця 3. Фактичні значення механічних характеристик труб за результатами вимірювань, МПА**

Сталь	Нормативне ( $\sigma_{\text{в}}/\text{запас}$ )	Нормативне ( $\sigma_{\text{т}}/\text{запас}$ )	$\sigma_{\text{в}}$ (за НВ)	$\sigma_{\text{в}}$ (за коерцитивною силою)	$\sigma_{\text{т}}$ (за методикою)	$\sigma_{\text{т}}$ (за коерцитивною силою)
<b>Пост ГПС 13Ц3</b>						
Точка вимірювання № 1 ( $D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; температура повітря $t_{\text{п}} = 8^{\circ}\text{C}$ )						
X42	516,5/399,7	331,4/245,7	476,5	438,3	276,6	380
X46	466/435,5	362,3/268,5	456,1	425,5	269,4	395
Точка вимірювання № 2 ( $D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 8^{\circ}\text{C}$ )						
X42	516,5/399,7	331,4/245,7	491,6	451	287,5	380
Точка вимірювання № 4 ( $D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 8^{\circ}\text{C}$ )						
X42	516,5/399,7	331,4/245,7	505,1	460,1	294,1	380
<b>Пост СПС 13Б3</b>						
Точка вимірювання № 7 ( $D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 10^{\circ}\text{C}$ )						
X46	466/435,5	362,3/268,5	432,4	407,9	253,1	400
Точка вимірювання № 8 ( $D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 10^{\circ}\text{C}$ )						
X42	516,5/399,7	331,4/245,7	454,4	424,0	263,5	380
<b>Район посту СПС 13Г5 (1999 км)</b> ( $D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 4^{\circ}\text{C}$ )						
X46	466/435,5	362,3/268,5	448,9	420,1	262,3	380

**Таблиця 4. Значення ударної в'язкості KCV труб за результатами вимірювань**

Ділянка контролю	Матеріал труби	KCV при температурі $0^{\circ}\text{C}$ , кДж/см <sup>2</sup>	Величина зміни KCV у порівнянні із значенням KCV для труб запасу, %	
<b>Пост ГПС 13Ц3</b>				
Точка вимірювання № 1	Сталь X42	62,76	-15	
	Сталь X46	48,78	1	
	№ 2	Сталь X42	46,65	-30
	№ 4	Сталь X42	53,33	-27
<b>Пост СПС 13Б3</b>				
Точка вимірювання № 7	Сталь X46	37,76	-22	
	№ 8	Сталь X42	60,40	-17
<b>Пост СПС 13Г5</b>				
Ділянка переізоляції	Сталь X46	50,11	4	

*Примітка.* Значення зміни величини ударної в'язкості зі знаком «->» свідчать про зниження значень даної характеристики

**Таблиця 5. Результати оброблення вимірювань границь міцності та плинності**

Ділянка вимірювань	Матеріал труби	Зміна відношення $\sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{в}}$ для нормативних і вимірних значень	Зміна коефіцієнта запасу безпечної експлуатації для нормативних і вимірних значень	
Труби аварійного запасу	Сталь X46	з 0,777 до 0,616	з 1,7...2,3 до 1,4...1,8	
<b>Пост ГПС 13Ц3</b>				
Точка вимірювання № 1	Сталь X42	з 0,642 до 0,631	без змін; 1,4...1,8	
	Сталь X46	з 0,777 до 0,633	з 1,7...2,3 до 1,4...1,8	
	№ 2	Сталь X42	з 0,642 до 0,631	без змін; 1,4...1,8
	№ 4	Сталь X42	з 0,642 до 0,639	без змін; 1,4...1,8
<b>Пост СПС 13Б3</b>				
Точка вимірювання № 7	Сталь X46	з 0,677 до 0,620	з 1,7...2,3 до 1,4...1,6	
	№ 8	Сталь X42	з 0,642 до 0,621	без змін; 1,4...1,8
<b>Пост СПС 13Г5</b>				
	Сталь X46	з 0,777 до 0,624	з 1,7...2,3 до 1,4...1,6	

на в'язкість є нижчою нормативного значення (78,5 кДж/см<sup>2</sup>).

Далі обстеженню піддавалися труби на ділянках районів постів СПС 13БЗ, СПС 13Г5 і ГПС 13ЦЗ. Результати обстежень надані в табл. 3 і 4.

Результати вимірювання ударної в'язкості труб надані у табл. 4.

Напружений стан визначався за значеннями коерцитивної сили. Визначені напруження за коерцитивною силою є незначними (<50 МПа) у всіх точках контролю, окрім поста ГПС 13Ц (для сталі Х46 в точці вимірювання 1) і поста 13 БЗ (в точці вимірювання 7) у точках вимірювання 6 і 7, де виміряні напруження склали 80...90 МПа.

Результати вимірювань ударної в'язкості при температурі 0°С на визначених ділянках трубопроводу дали змогу встановити, що значна деградація цієї характеристики відбулась на трьох з семи досліджуваних перерізах (точки 2, 4 та 7), що може свідчити про збільшення швидкості деградаційних процесів в даних точках.

Проведені вимірювання та розрахунки границі плинності, границі міцності та коефіцієнта запасу свідчать про низьку швидкість деградації згаданих характеристик (табл. 5).

З огляду на технологічні та експлуатаційні умови серед причин деградаційних процесів слід виділити:

- наводнення воднем, що міститься у воді та аміаку, яке призводить до суттєвого зниження ударної в'язкості, зниження пластичності;

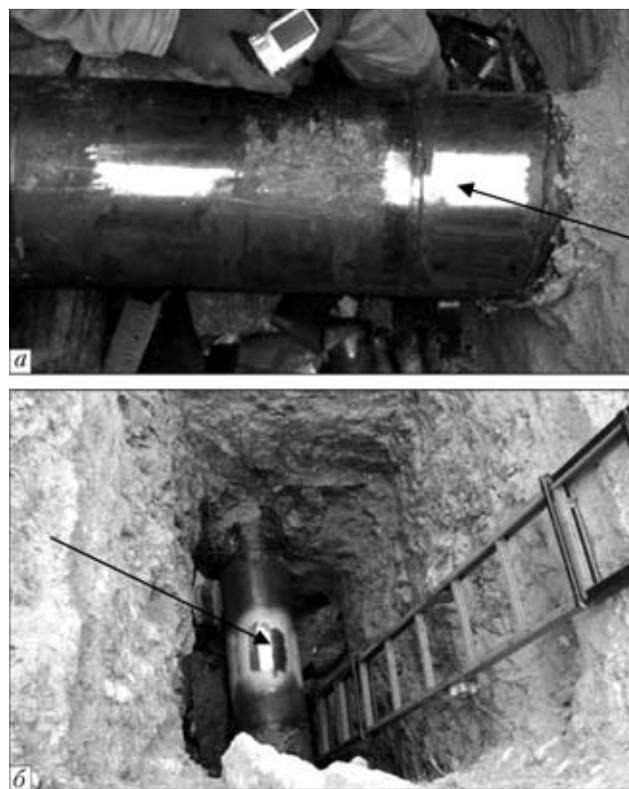


Рис. 4. Місця металографічного обстеження труби діаметром 355,6×12,7 (сталь Х42): а — на відстані 10 см від зварного шва приварювання до труби діаметром 355,6×7,92 (сталь Х46); б — на відстані 11 м 20 см від зворотнього клапана

– старіння матеріалу. Цей факт, в першу чергу, підтверджується зниженням межі плинності та межі міцності для труб, що перебувають в запасі.

Для підтвердження ознак і причин деградації матеріалу труб, про які свідчать результати неруйнівного контролю механічних характеристик матеріалу, додатково на ділянці ГПС 13ЦЗ на замовлення Укрхімтрансміак були проведені металографічні дослідження. Для дослідження були вибрані наступні місця зачищеної поверхні металу труби діаметром 355,6×12,7 (сталь Х42) на різній глибині залягання (рис. 4).

Дослідження мікроструктури металу проводили металографічним методом безпосередньо на трубі. За стандартною методикою виготовлено шліфи, поверхню яких піддавали травленню і вивченню під мікроскопом та фотографуванню при збільшеннях ×200. Для травлення використано 4%-ий розчин азотної кислоти в етиловому спирті.

У вихідному стані мікроструктура даної сталі феритно-перлітна, що відповідає нормалізованому стану, величина зерна за ГОСТ 5639 № 4-5

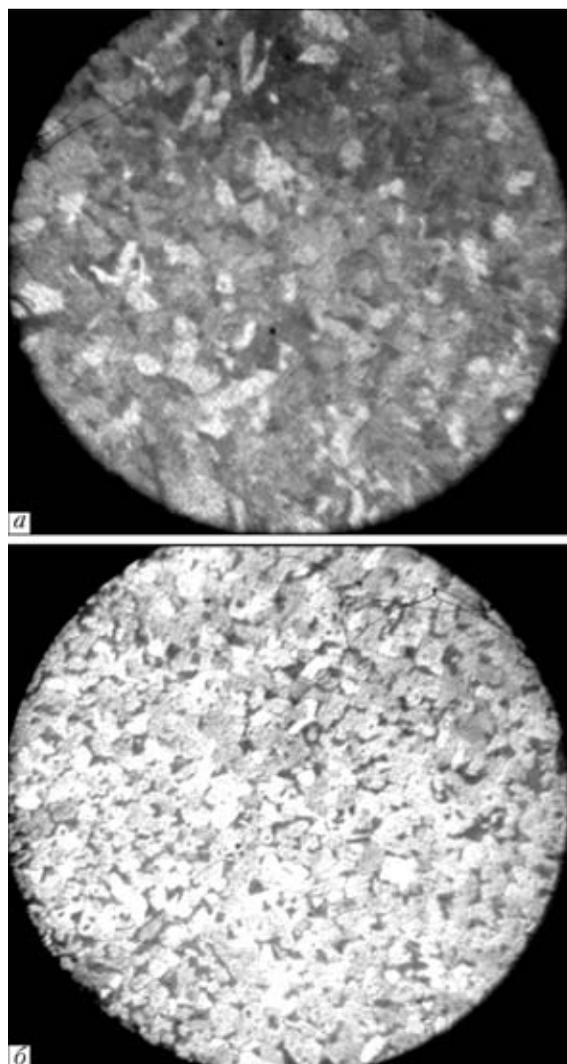


Рис. 5. Мікроструктура (×200) металу труби діаметром 355,6×12,7 (сталь Х42): а — матеріалу труби аварійного запасу; б — матеріалу труби, що відпрацювала 33 роки



[17] (рис. 5, а). Перліт має пластинчасту будову, що забезпечує хороше поєднання міцнісних і пластичних властивостей матеріалу.

У деградованій структурі (рис. 5, б) спостерігається розпад перліту, його сфероїдизація, карбідна складова перліту зміщується до границь зерен. Відбулася коагуляція карбідів, збільшилась товщина границь зерен і кінцева структура являє собою ферит плюс карбідна сітка, що свідчить про те, що процес старіння структури у цій сталі пройшов зі зниженням характеристик пластичності (результати вимірювань границі міцності, плинності і ударної в'язкості). Оскільки процеси руху та «розмноження» дислокацій в локальних об'ємах металу низьковуглецевих сталей протікають за напружень значно менших статичної границі плинності, то і процеси деформаційного старіння у трубних сталях протікають при експлуатаційних навантаженнях. Деформаційне зміцнення й старіння призводить також до зниження характеристик тріщиностійкості та ударної в'язкості [1].

Отже, загальний структурний стан матеріалу труби зі сталі Х42 після нормативного терміну експлуатації свідчить, що морфологія та співвідношення фазових складових не мають негативних особливостей і не містять структурних ознак, що свідчить про різке прискорення розвитку деградаційних процесів з продовженням терміну експлуатації трубопроводів.

## Висновки

Узагальнюючи результати виконаної роботи слід підкреслити, що за наявності інструментарію для визначення фактичних механічних характеристик особливої актуальності набуває питання визначення дійсного напружено-деформованого стану (НДС) з метою управління надійністю трубопроводів, вибору найбільш безпечних режимів експлуатації. Ключова роль при цьому повинна відводитися тим, що знаходяться у непроєктному положенні, оскільки просторове положення трубопроводу змінюється в процесі експлуатації як внаслідок навантаження внутрішнім тиском, температурними діями, так і в результаті протікання геодинамічних процесів. Експериментальні дослідження НДС треба проводити у тих випадках, коли розрахунковим шляхом неможливо з потрібною точністю визначити характеристики, необхідні для перевірки конструкції на міцність відповідно до норм міцності.

В разі подальшої заміни певних ділянок труб рекомендується в умовах постачання труб регламентувати вимоги до ударної в'язкості матеріалу за шкалою KCV замість KCU, критичні значення

НДС труб, що узгоджується з міжнародною практикою оцінки безпечності трубопроводів.

*Рассмотрена методология оценки фактического технического состояния материала труб аммиакопровода. Представлены результаты неразрушающего контроля механических характеристик материала труб с использованием методов, базирующихся на разных физических принципах. По результатам данных измерений определены величина и характер деградации материала труб, проанализированы ее причины.*

1. Миндюк В. Д., Доценко С. Р., Карнаш М. О. Особенности деградации структуры материалов металлоконструкций долговечной эксплуатации та оцінка можливості її діагностування в нафтогазовому комплексі // Наук. вісник ІФНТУНГ. — 2011. — № 2 (28). — С. 91–97.
2. ДСТУ 4046–2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги.
3. ГОСТ 5520. Сталь листовая углеродистая низколегируванная и легированная для котлов и сосудов, работающих под давлением.
4. ВБН В.2.3-06544.319–2003. Споруди транспорту. Магістральні трубопроводи для транспортування рідкого аміаку (аміакопроводи).
5. ДСТУ-Н-Б-В23-21–2008. Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами.
6. РД 12-411-01. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов.
7. ГОСТ 10006–80. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение.
8. ГОСТ 22761–77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.
9. ГОСТ 18661–73. Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка.
10. ГОСТ 8.062–85. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Бринелля.
11. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
12. Карнаш О. М., Доценко С. Р., Карнаш М. О. Комплексный метод контролю фізико-механічних характеристик матеріалів металлоконструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2011. — № 5. — С. 40–47.
13. Агинец Р. В., Теплинский Ю. А., Кузьбожев А. С. Применение коэрциметрического метода для оценки микроструктуры стали 17Г1С // Контроль. Диагностика. — 2005. — № 1. — С. 32–34.
14. Богданов Е. А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Уч. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 2006. — 279 с.
15. Методика виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубопровідного сортаменту (розроблена Науково-дослідним інститутом нафтогазової енергетики і екології, 2011 р.; Затв. ІФНТУНГ, 2011 р.).
16. Методика виконання вимірювань границі плинності конструкційних (трубопровідних) сталей (розроблена Науково-дослідним інститутом нафтогазової енергетики і екології, 2011 р.; Затв. ІФНТУНГ, 2011 р.).
17. ГОСТ 5639–82. Сталь и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.

Надійшла до редакції  
27.03.2012

## НАДЕЖНОСТЬ И ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДИМЫХ В УКРАИНЕ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ

Э. Ф. ГАРФ, д-р техн. наук, Р. И. ДМИТРИЕНКО, А. А. ПЕРЕПЕЧАЙ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины), А. П. ДЕНЬГИН, канд. техн. наук, В. А. ПЛЕТНЕВ, инж. (ННИИ промбезопасности и охраны труда)

*Представлен статистический анализ надежности и экономичности выпускаемых в Украине баллонов высокого давления для технических газов. Показана необходимость совершенствования нормативной базы, регламентирующей производство баллонов*

*The paper presents statistical analysis of reliability and cost-effectiveness of high pressure cylinders for technical gases, manufactured in Ukraine. The need to improve the normative base regulating cylinder manufacture is shown.*

Надежность и экономичность баллонов высокого давления предопределяется прежде всего нормативной базой и технологией их производства.

В Украине, как и в России, производство баллонов регламентируется ГОСТ 949–73, который введен взамен ГОСТ 949–57 и мало чем от него отличается. В 1991 г. снято ограничение на срок действия ГОСТ 943–73. Таким образом, более 35 лет указанный документ не пересматривался.

Эксплуатация баллонов высокого давления сопряжена с определенным риском. Так, по данным «Сваркомплект», в России ежегодно взрывается около 30 баллонов, 25 из которых стандартные 40-литровые баллоны, и это несмотря на то, что при переосвидетельствовании отбраковывается от 2 до 7 % баллонов [1, 2]. В публикации [3] приведены четыре случая разрушений кислородных баллонов в Украине, а также анализ причин взрыва кислородных баллонов в 2008 г. Разрушение баллонов носит осколочный характер (рис. 1), что особенно опасно.

В этой связи вопросы надежности и безопасности эксплуатации баллонов высокого давления в Украине представляются весьма актуальными.

Целью данной публикации является установление уровня надежности производимых в Украине баллонов высокого давления и определение путей повышения их безопасности при эксплуатации.

К сожалению, статистика по возрасту и принадлежности разрушившихся баллонов отсутствует. Возможно, что здесь и нет определенных закономерностей, поскольку чаще всего причиной взрывов является нарушение техники безопасности, однако осколочный характер разрушения неизбежно приводит к поражению персонала, обслуживающего баллоны.

Несчастных случаев, связанных с разрушением баллонов в странах Европейского Союза, в литературе не отмечено. Это вызвало необходимость сопоставить технические требования к таким изделиям в Украине и Евросоюзе.

В Европе требования к баллонам высокого давления для технических газов регламентируются документом ISO 9809–1. Эти требования касаются стальных бесшовных баллонов из материалов с временным сопротивлением до 1100 МПа.

Согласно ГОСТ 949–73 различают баллоны обычной и повышенной точности изготовления. Для баллонов обычной точности нормируются

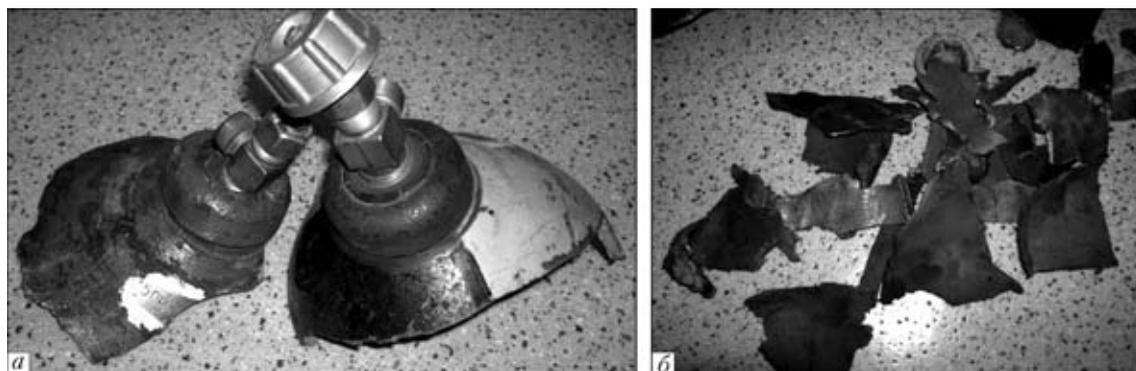


Рис. 1. Характер разрушения баллонов при взрыве [4]: а — части горловины; б — осколки корпуса

предельные отклонения по объему (+5 %) и наружному диаметру в месте перехода от цилиндра к сфере ( $\pm 2 \dots 2,5$  %) в зависимости от марки стали. Для баллонов повышенной точности предусмотрены более жесткие требования по диаметру в месте перехода от цилиндра к сфере ( $\pm 1,5 \dots 2$  %), а также ограничения по длине ( $\pm 15$  мм) и наружному диаметру ( $\pm 1,0 \dots 1,5$  %). Ограничивается и кривизна баллонов — не более 0,5 % длины цилиндрической части.

Согласно ISO 9809–1, разница между максимальным и минимальным значениями диаметра в одном сечении не должна превышать 2 %, а диаметр зон перехода не должен отклоняться от запроектированного более чем на 1 %. Максимальное отклонение цилиндрической части баллона от прямой линии не должно превышать 3 мм на 1 м. ISO 9809–1 не предусматривает деление баллонов по точности изготовления, равно как и различий в требованиях к точности в зависимости от марки стали. В целом требования европейских норм в части точности несколько выше отечественных, хотя эта разница не является принципиальной.

Более существенным является то, что в европейских нормах рассмотрен большой перечень возможных производственных дефектов с указанием критериев для ремонта и отбраковки. В частности, такой дефект как продольная риска на наружной поверхности баллона должна ремонтироваться зашлифовкой. При этом толщина стенки после ремонта не должна быть меньше проектной, т. е. должна обеспечивать проектный за-

пас прочности баллона. Если этого достичь не удастся, баллон подлежит отбраковке.

Согласно ГОСТ 949–73 риски, если они не выводят толщину стенки за минимально допустимые размеры, ремонту не подвергаются, а это создает значительную концентрацию напряжений, что, в свою очередь, способствует снижению циклической прочности и трещиностойкости баллона.

Наиболее важными при контроле технологического процесса изготовления баллонов являются процедуры испытаний. Они проводятся для каждой партии баллонов. Сопоставление наиболее важных процедур испытаний представлено в табл. 1.

Из таблицы видно, что объем испытаний и требования, предъявляемые к отдельным испытаниям, по ISO 9809–1 и ГОСТ 949–73 существенно различаются. В частности, ISO 9809–1 предусматривает гидравлические испытания до разрушения одного баллона от каждой партии и циклические испытания одного баллона испытательным давлением на базе 12000 циклов. Критерием наступления предельного состояния при циклических испытаниях является разгерметизация баллона (появление течи) в результате образования трещины усталости. При статических испытаниях до разрушения особое внимание обращается на характер разрушения. Разрушение должно быть вязким и трещина не должна разветвляться. Безусловно, что эти испытания способствуют обеспечению высокой надежности баллонов. Испытания до разрушения дают более полное представление о запасе прочности баллонов по сравнению с испытанием на растяжение стандартных образцов.

Таблица 1. Процедуры испытаний и контроля каждой партии баллонов по ГОСТ 949–73 и ISO 9809–1

Номер п/п	Наименование испытаний	ГОСТ 949–73	ISO 9809–1
1	Испытание на растяжение образцов, вырезанных в продольном направлении	Контролируется $\sigma_t$ , $\sigma_b$ и $\delta_5$ ( $\delta_5 \geq 15$ %). Допускается проводить проверку механических свойств неразрушающими методами контроля	Контролируется $\sigma_t$ , $\sigma_b$ и $\delta_5$ ( $\delta_5 \geq 14$ %) на плоских образцах и $\delta_5 \geq 16$ % на круглых
2	Гидравлические испытания пробным давлением	Испытывается каждый баллон	Испытывается каждый баллон
3	Пневматические испытания	Испытывается каждый баллон. Контролируется герметичность при рабочем давлении	Испытывается каждый баллон. Контролируется герметичность при рабочем давлении
4	Ультразвуковой контроль	Проводится на трубной заготовке	Проводится на готовом изделии
5	Испытание на ударную вязкость	Два продольных образца с круглым надрезом $t_{исп} = +20^\circ\text{C}$	Три продольных и три поперечных образца с острым надрезом $t_{исп} = -50^\circ\text{C}$
6	Гидравлические испытания баллона до разрушения	Не предусмотрено	Одно испытание от партии. Контроль прочности и характера разрушения
7	Испытание циклическим давлением	-.	Один баллон от партии. Давление: $P_{max} = P_{исп}$ , $P_{min} \leq 10\% P_{раб}$ . База испытаний 12000 циклов. Контроль течи
8	Испытания на загиб	-.	Два образца от партии. Контроль образования трещин
9	Испытание на выравнивание кольца	-.	Выравнивание на вальцах. Один образец. Контроль образования трещин



Особое внимание уделяется различию в требованиях по трещиностойкости стали, используемой для баллонов. Согласно требованиям ГОСТ 949–73 испытания на ударную вязкость проводятся при температуре +20°C на двух образцах с круглым надрезом, вырезанным в продольном направлении. При этом значение ударной вязкости должно быть не ниже 30 Дж/см<sup>2</sup>. Ясно, что форма надреза и температура испытаний не могут гарантировать вязкое разрушение баллонов в реальных условиях температур эксплуатации и динамической нагрузки, вызванной взрывом в баллоне. Поэтому взрыв баллона сопровождается осколочным разрушением с вытекающими из этого последствиями.

ISO 9809–1 предусматривает испытание на ударную вязкость по три образца, вырезанных в продольном и поперечном направлениях. Образцы имеют V-образный надрез Шарпи. Испытания проводятся при температуре –50°C. Для образцов, вырезанных в поперечном направлении требования по ударной вязкости дифференцированы в зависимости от толщины стенки баллона и равны 30 Дж/см<sup>2</sup> для толщины стенки 3...5 мм и 40 Дж/см<sup>2</sup> для толщины стенки 10 мм. Для продольных образцов значения ударной вязкости не должны быть менее 60 Дж/см<sup>2</sup> независимо от толщины стенки баллона. Эти требования учитывают механические свойства сталей и, вместе с тем, видимо, гарантируют безосколочное разрушение в случае взрыва баллона.

Представляет также интерес анализ механических свойств стали и толщины стенки выпускаемых в Украине баллонов высокого давления для технических газов, поскольку эти показатели определяют надежность баллонов в штатных условиях эксплуатации.

Исследования проводили путем статистического анализа механических свойств стали и толщины стенки баллонов. Выборки по механическим свойствам формировались по результатам испытаний, проводимых на заводе для каждой партии баллонов в период с августа 2001 по конец 2008 г. При этом по каждому из показателей механических свойств формировались две выборки. В первую включались результаты для партий баллонов,

Таблица 2. Данные по объему выборок для анализа механических свойств стали

Контролируемые параметры	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_s$ , %	KCU при 20°C, Дж/см <sup>2</sup>
Минимальное значение по ГОСТ 949–73	373	638	15	29,4
Количество результатов, включенных в выборку I	846	846	846	836
Количество результатов, включенных в выборку II	942	942	942	930

прошедших контроль по всем параметрам с первого раза. Во вторую включались все результаты. Исходная информация по выборкам для контролируемых механических свойств приведена в табл. 2.

Для построения гистограмм распределений ширину интервала  $h$  определяли по формуле Стерджеса [5]:

$$h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,322 \lg n},$$

где  $n$  — количество результатов в выборке;  $X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  — максимальное и минимальное значение рассматриваемого параметра.

Распределения всех механических характеристик соответствуют нормальному закону, что подтверждается соответствующими значениями коэффициентов вариации [5].

Результаты статистического анализа по выборкам I и II приведены в табл. 3.

Гистограммы и нормированные распределения по выборке II, которая наиболее полно представляет производственную ситуацию, представлены на рис. 2–5. Как видно из рисунков, гистограммы и теоретические распределения достаточно хорошо согласуются. Исходя из того, что выборки включают большое число результатов, их можно рассматривать как генеральные совокупности.

Анализируя результаты, представленные в табл. 3, необходимо отметить ряд моментов.

Прежде всего обращает внимание тот факт, что очень высокая вероятность производства заготовок для баллонов с пределом текучести ниже нор-

Таблица 3. Результаты статистического анализа механических свойств стали в баллонах

Статистические параметры	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_s$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
<b>Параметры по выборке I</b>				
min	373	643	15	29,4
max	571	870	30	184
Математическое ожидание ( $m$ )	409,23	745,05	20,44	70,48
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	29,92	39,47	2,37	14,385
( $\sigma/m$ )×100 %	7,3	5,29	11,59	20,41
Брак, %	11,3	0,35	1,07	0,19
<b>Параметры по выборке II</b>				
min	278	616	8,8	20
max	571	876	30	184
Математическое ожидание ( $m$ )	404,75	741,23	20,45	70,82
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	33,8	41,64	2,45	14,85
( $\sigma/m$ )×100 %	8,35	5,62	12	20,97
Брак, %	17,36	0,65	1,39	0,26

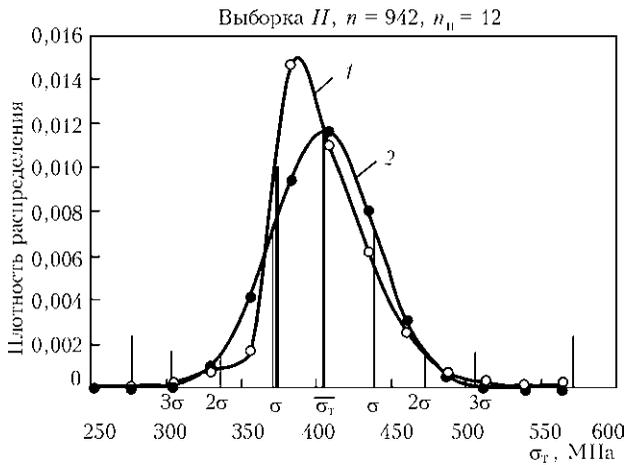


Рис. 2. Гистограмма (1) и нормированное распределение предела текучести (2): min по ГОСТ 949–73 — 373; min — 278; max — 571;  $\sigma$  — 33,799;  $\sigma_T$  — 404,749;  $t = 26$

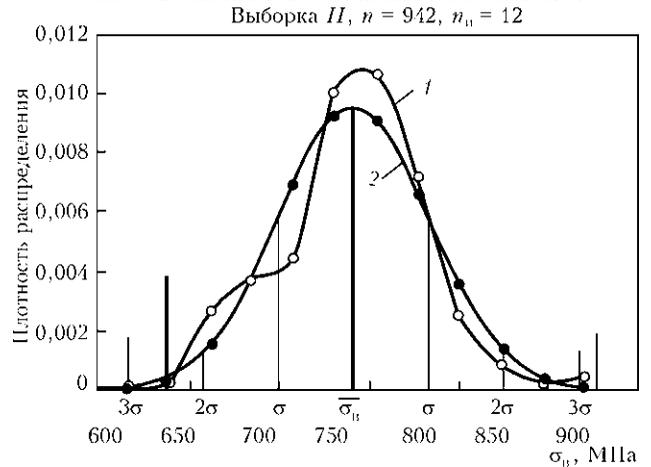


Рис. 3. Гистограмма (1) и нормированное распределение предела прочности (2): min по ГОСТ 949–73 — 373; min — 616; max — 876;  $\sigma$  — 41,641;  $\sigma_T$  — 741,231;  $t = 23$

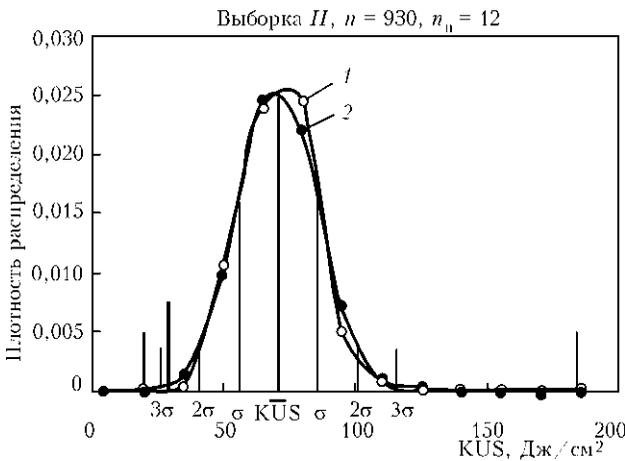


Рис. 4. Гистограмма (1) и нормированное распределение ударной вязкости (2): min по ГОСТ 949–73 — 294; min — 20; max — 184;  $\sigma$  — 14,851; KCV — 70,816;  $t = 15$

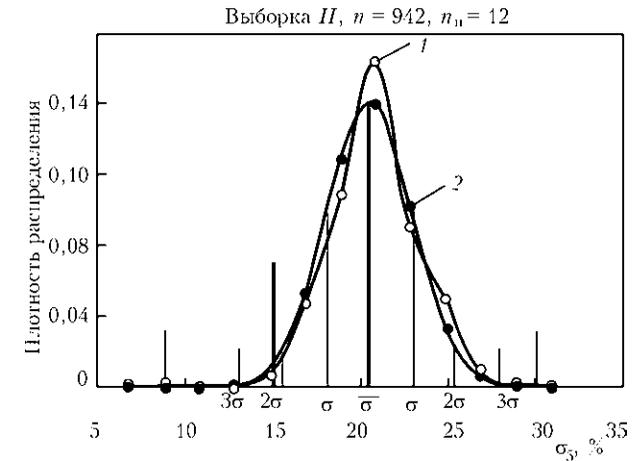


Рис. 5. Гистограмма (1) и нормированное распределение относительного удлинения (2): min по ГОСТ 949–73 — 15; min — 8,8; max — 30;  $\sigma$  — 2,454;  $\delta$  — 20,45;  $t = 2$

мированного значения. Поскольку контроль осуществляется на стадии изготовления собственно баллонов, то это чревато высоким процентом их отбраковки. Если исходить из выборки II, то отбраковка может составлять более 17 % и всегда будет существовать вероятность того, что в эксплуатируемых баллонах фактический предел текучести будет ниже нормируемой величины.

Приходится отметить, что практически по всем показателям механических свойств наблюдается достаточно высокий уровень рассеяния результатов. И это несмотря на то, что весь цикл производства от выплавки стали до выпуска готовой продукции осуществляется в пределах одного предприятия.

Заметим, что прочность баллонов определяется не только механическими свойствами стали, но также и расчетной толщиной стенки. В этой связи при оценке надежности производимых в Украине баллонов значительное внимание уделено анализу толщины стенки в цилиндрической части баллонов. Исследования проводили на трех новых бал-

лонах толщиномером УТЭ-04-ЭМА в более чем 400 точках, равномерно расположенных на наружной поверхности цилиндрической части каждого баллона.

Результаты статистического анализа приведены в табл. 4, а на рис. 6 и 7 представлены гистограммы и нормированные распределения толщин стенки в баллонах.

Обращает внимание значительный разброс по толщине стенки как в отдельных баллонах (20...30 %), так и по группе из трех баллонов (32,3 %). Имеет место значительное превышение минимальной толщины стенки рассматриваемых баллонов в сравнении с толщиной, регламентируемой ГОСТ 949–73 (6,8 мм). Средние значения толщины стенки баллонов на 18...26 % больше нормируемой, а это значит, что примерно на такую же величину увеличивается вес баллонов и их стоимость, а, следовательно, технологические и экономические показатели.

Вместе с тем, несмотря на большой разброс показателей вероятность появления в баллонах



Таблица 4. Статистические данные результатов измерения толщины стенки баллонов

Номер п/п	Номер баллона	Год производства баллонов	Количество измерений, шт.	$t_{max}$ , мм	$t_{min}$ , мм	Математическое ожидание $t$ , мм	Стандартное отклонение
1	785	2007	432	9,66	7,41	8,57	0,44
2	25	2009	448	8,95	7,3	8,03	0,3
3	15365	2010	448	8,82	7,3	8,03	0,31
По трем баллонам			1328	9,66	7,3	8,2	0,437

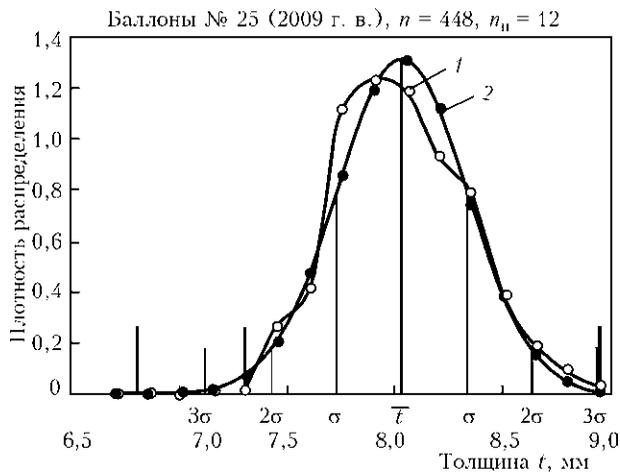


Рис. 6. Гистограмма (1) и нормированное распределение толщины стенки в баллоне (2): min по ГОСТ 949-73 — 6,8;  $\sigma$  — 0,302; min — 7,3; max — 8,95;  $t$  — 8,028;  $t = 0,15$

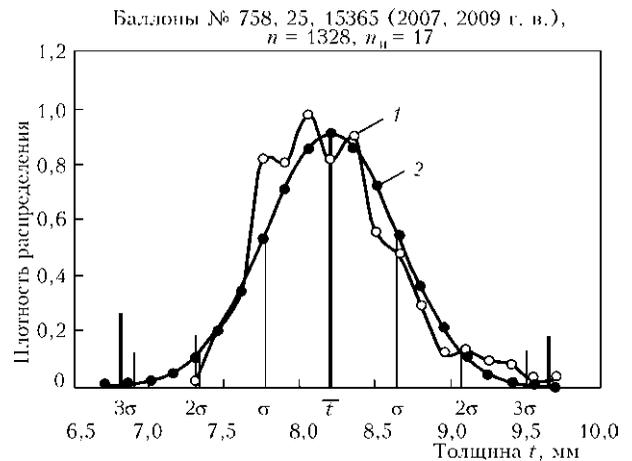


Рис. 7. Гистограмма (1) и нормированное распределение толщины стенки по трем баллонам (2): min по ГОСТ 949-73 — 6,8;  $\sigma$  — 0,437; min — 7,3; max — 9,66;  $t$  — 8,2;  $t = 0,15$

минимально допустимого значения толщины стенки составляет  $0,1 \times 10^{-3} \dots 0,1 \times 10^{-5}$  за счет излишнего запаса по толщине.

Исходя из реальных распределений механических свойств и толщин стенки, можно определить вероятность появления в баллонах текучести при испытательной нагрузке и вероятность разрушения баллонов при коэффициенте запаса менее 2,6.

Известно, что кольцевые напряжения в цилиндрической части баллона определяются выражением:

$$\sigma_k = \frac{PD_{cp}}{2t},$$

где  $P$  — давление в баллоне;  $D_{cp}$  — средний диаметр баллона;  $t$  — толщина стенки.

Для заданного давления выражение  $\frac{PD_{cp}}{2}$  может рассматриваться как постоянный коэффициент, следовательно, распределение напряжений  $\sigma_k$  в баллонах будет определяться распределением величины, обратной толщине стенки. Напряжения могут рассматриваться как результат нагруженности баллона  $S$ , т. е.  $S = \sigma_k$ .

Предел текучести  $\sigma_T$  или временное сопротивление  $\sigma_B$  характеризуют несущую способность баллона  $R$ .

В работе [6] для оценки надежности в таких случаях рассматривается функция неразрушимости  $\psi = R - S$ , которая также имеет нормальное распределение, с параметрами математического ожи-

дания  $m_\psi = m_R - m_S$  и дисперсией  $D_\psi = D_R + D_S - 2k_{RS}$ . Здесь  $k_{RS}$  — корреляционный момент, который в данном случае равен нулю, так как параметры  $R$  и  $S$  некоррелируемые.

Следовательно, стандартное отклонение для функции неразрушимости будет иметь вид:

$$\sigma_\psi = \sqrt{\sigma_R + \sigma_S}.$$

Вероятность наступления предельного состояния определяется как площадь кривой распределения функции неразрушимости  $\Psi$  от  $-\infty$  до нуля.

В качестве примера рассмотрим вероятность появления в цилиндрической части баллона зон текучести при давлении  $P = 25,5$  МПа. Такое давление выбрано для наглядности примера. На рис. 8 приведены нормированные распределения для предела текучести по выборке II, для нагруженности баллона и функции неразрушения  $\Psi$  для новых баллонов. Вероятность достижения значений текучести в отдельных зонах баллона определяется площадью заштрихованной части кривой распределения функции неразрушения и составляет 3,67 %.

Оценка вероятности появления зон текучести в баллонах при испытательном давлении и вероятности разрушения новых баллонов с коэффициентом запаса менее 2,6 приведены в табл. 5. Из таблицы видно, что вероятность не появления зон текучести в новых баллонах как дифференцированно по отдельным баллонам, так и по группе из трех баллонов, составляет не менее 0,999. Вероятность разрушения баллонов с коэффициентом

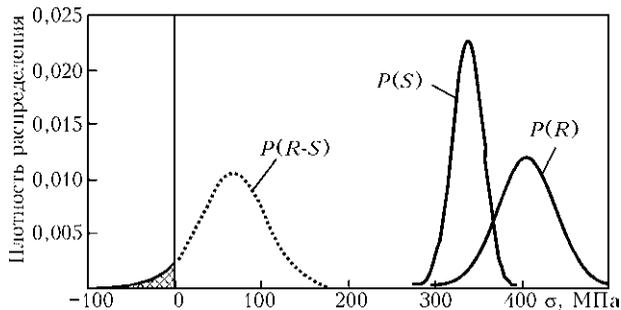


Рис. 8. Нормированные распределения функций параметров  $R$ :  $m = 404,749$ ,  $\sigma = 33,799$ ;  $S$ :  $m = 336,55$ ,  $\sigma = 17,5$ ;  $R-S$ :  $m = 68,2$ ,  $\sigma = 38,04$

Таблица 5. Вероятности (%) наступления текучести при пробном давлении и разрушения при запасе прочности менее 2,6

Номер баллона	Вероятность ( $p$ ) наступления текучести при давлении 22,07 МПа			Вероятность разрушения при давлении 38,26 МПа		
	$m$	$\sigma$	$p$	$m$	$\sigma$	$p$
1	130,75	36,54	0,02	265,13	48,13	1,91E-6
2	112,01	35,52	0,08	232,58	45,76	1,97E-5
3	112,01	35,68	0,1	232,58	46,13	2,44E-5
1–3	119,04	36,91	0,07	244,79	48,96	3,03E-5

Примечание.  $m$ ,  $\sigma$ ,  $p$  — статистические параметры

запаса менее 2,6 практически отсутствует. Конечно, все сказанное выше касается новых баллонов. При эксплуатации в связи с коррозионными процессами вероятность наступления предельных состояний будет возрастать. Чтобы оценить насколько этот процесс будет интенсивным, необходимо исследовать баллоны с разными сроками эксплуатации. Причем эти исследования в основном должны касаться толщины стенки баллонов, поскольку предел текучести и временное сопротивление с течением времени практически не меняются.

### Выводы

Производимые в Украине баллоны высокого давления для технических газов имеют высокую надежность в части появления зон текучести при испытательном давлении, а их запас прочности

по отношению к рабочему давлению существенно превышает требования норм.

Высокие уровни надежности баллонов при штатных режимах эксплуатации достигаются за счет завышенных значений толщины стенки, что приводит к утяжелению баллонов и повышению их себестоимости.

Сталь, из которой изготавливаются баллоны, имеет значительное рассеяние по всем показателям механических свойств. Особенно большое рассеяние и низкая обеспеченность нормативного значения по пределу текучести. Процент отбраковки по  $\sigma_T$  превышает 17 %. Отношение максимальных значений  $\sigma_T$  к минимальным значениям в представительной выборке составило более двух.

Трубные заготовки для баллонов имеют значительную разнотолщинность. В одном баллоне толщина стенки меняется в пределах 30 %. Средние значения толщины стенки на 18...26 % больше минимально допустимых нормами, что приводит к существенному перерасходу стали.

Нормативные требования по трещиностойкости стали, применяемой для баллонов, не обеспечивают надежности эксплуатации баллонов при отрицательных температурах, приводят к осколочным разрушениям при взрывах и не отвечают современным условиям обеспечения безопасности.

1. Рубан А. Г. Инновационное обеспечение лидерства на рынке газовых баллонов // Технические газы. — 2008. — № 2. — С. 49–55.
2. Рубан А. Г. Международный опыт обновления газобаллонного парка производителей промышленных газов // Там же. — 2009. — № 6. — С. 54–63.
3. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов / В. М. Долинский, В. М. Стогний, В. Г. Новик и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
4. Чижиченко В. П. Анализ причин взрыва кислородных баллонов, приведшего к групповому несчастному случаю // Технические газы. — 2008. — № 6. — С. 62–64.
5. Математическая статистика / Под ред. А. М. Длинна. — М: Высш. шк., 1975. — 400 с.
6. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. — М.: Стройиздат, 1978. — 239 с.
7. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. — М: Стройиздат, 1961. — 202 с.

Поступила в редакцию  
04.04.2012



## ПРОГНОЗУВАННЯ КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ СТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ ГАЗОРІДИННОГО ПОТОКУ

П. М. РАЙТЕР, канд. техн. наук (Ів.-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу)

*Розглянуто питання прогнозування корозійних процесів в технологічних трубопроводах з багатофазними потоками всередині. Визначено основні чинники такої корозії та методи її мінімізації. Приведено результати дослідження поточного імпедансного методу контролю вмісту продукції свердловини для задач прогнозування корозійних явищ. Викладено результати розробки системи контролю структури, фазового складу потоку та вмісту води в продукції свердловини для ідентифікації найбільш ймовірних умов виникнення корозійних процесів у такому середовищі.*

*The problem of prediction of corrosion processes in process pipelines with multiphase flows inside them is considered. The main factors of such corrosion and methods of its minimizing were determined. The paper presents the results of studying on-line impedance method of monitoring water content in gas-liquid flow of the well for problems of forecasting the corrosion phenomena. The results of development of a system for monitoring the water content and solid phase in the well flow to identify the most probable conditions of corrosion process initiation in such a medium are described.*

Розробка та експлуатація нафтогазових та газоконденсатних родовищ вимагає оптимізації процесу видобутку — максимального вилучення вуглеводневої суміші за мінімальних економічних витрат. Розв'язання даної проблеми ускладнене тим, що, як правило, вихідною продукцією свердловин є змінювана в часі суміш газу, пластової води й конденсату чи нафти. Непостійність в часі концентрації компонентів суміші призводить до нестабільності структури, фізичних властивостей і режимів течії багатофазного потоку. Крім того, суміш може містити деяку кількість твердих вуглеводів, а також мінеральні частки й інші механічні домішки. Діюча система нафтозбору завантажена нерівномірно, на багатьох ділянках діаметри трубопроводів завищені порівняно з розрахунковими. Зниження рівня видобутку і використання трубопроводів із завищеними діаметрами призводить до розшарування потоку газонафтової суміші, що зумовлює підвищену швидкість корозії. На сьогодні більшість внутрішньопромислових нафтопроводів експлуатуються в умовах інтенсивної внутрішньої корозії, свердловини працюють з винесенням мінеральних часток, зокрема піску, що також призводить до спрацювання обладнання [20, 3]. Найбільш небезпечним видом руйнування внутрішньої поверхні трубопроводу є канавочна корозія [25], вогнища якої мають вид прямокутної канавки шириною до 5 см і завдовжки до 10...12 м, розташованої в нижній області твірної труби. Цей вид руйнування супроводжується розривами труб, що призводить до значних економічних і екологічних збитків. Одним з нових ресурсозберігаю-

чих методів забезпечення безпечної експлуатації трубопроводів і підвищення їх довговічності є профілактичний поворот трубопроводів на ділянках, схильних до «канавочного» руйнування, що дозволяє збільшити термін їх експлуатації за рахунок забезпечення більш рівномірного зносу внутрішньої поверхні стінки труб [25].

Боротьба з корозією є комплексом завдань, що включають корозійний моніторинг [22, 24], створення устаткування в корозійностійкому виконанні і підтримку надійності його експлуатації. Ефективність того або іншого напрямку боротьби з корозією визначається, в першу чергу, об'єктивним діагностуванням причин пошкодження конструкції в агресивних середовищах, що є основним предметом корозійного моніторингу. Аналіз літературних даних [4–15] і результати власних спостережень авторів показують, що для розуміння процесів корозії у трубопроводі важливо досконально знати режим течії багатофазного потоку.

Вплив потоку на корозію трубопроводу є комплексним, змінюваним в часі і суттєво залежним як від хімічних, так і фізичних параметрів системи. Безумовно в основному механізм дії корозії визначають хімічні та електрохімічні параметри системи «потік—трубопровід», але поряд з ними потік має значний вплив на кінетику корозійних реакцій і на участь окремих фаз потоку у цих реакціях. Вказані впливи спричинені безпосередньою дією потоку на переміщення, поширення та перемішування флюїдів в трубопроводі. Нормативними документами, зокрема [15], для захисту трубопроводів від внутрішньої корозії при транспортуванні газорідних сумішей передбачено: формування структури потоку, що запобігає розшаруванню фаз і виділенню

рідини; введення інгібіторів корозії; внутрішнє захисне покриття труб.

Базовим явищем, що визначає характер впливу потоку на корозію, є турбулентність [1, 2]. Висока турбулізація потоку призводить до корозії, породженої потоком, ерозії-корозії чи кавітації. Низька турбулентність спричиняє корозію, зумовлену наявністю сепарованої водяної фази потоку та виникнення корозійних пошкоджень під осадами і/або плівками води на внутрішній поверхні труби. Корозійні явища, зумовлені високою турбулізацією потоку флюїду над внутрішньою поверхнею труби з однофазними і особливо багатфазними потоками, прийнято визначати як «корозію, породжену потоком» (flow-induced corrosion). Термін «корозія під осадом» (underdeposit corrosion) використовується для опису корозійних пошкоджень (за наявності сепарованої водяної фази) під твердими осадами неметалевої природи на металевій поверхні труби з низькотурбулізованим потоком. Поеднання явищ корозії та ерозії поверхні металу визначає так звану корозію-ерозію поверхні труби (erosion-corrosion), зумовлену фізичною ударною взаємодією на поверхні металу, що спричиняє механічні пошкодження. Причому така ударна взаємодія може здійснюватись як частками твердої фази, що містяться в рідкій або

газовій фазі, так і рідкими краплями, що переносяться газовою фазою потоку.

Ключовим елементом в контролі корозійних явищ, зумовлених рухом, зокрема, багатфазного потоку вуглеводів в трубопроводі свердловини, є розуміння характеристик потоку, які за визначених умов прискорюють розвиток вказаних вище специфічних корозійних процесів і зміну їх шляхом модифікації течії потоку (режиму потоку), матеріалу конструкції, або корозійного середовища.

Метою даної роботи є розробка методології та апаратного забезпечення для оцінки структури та фазового складу потоку для цілей мінімізації корозійних пошкоджень шляхом обґрунтованої модифікації умов течії газорідного потоку в трубопроводах нафтогазового та газоконденсатного промислу.

Знання того, коли і де корозія породжена потоком та корозія-ерозія може мати місце в трубопроводах промислу є основною для контролю корозійних явищ вказаних важливих технологічних об'єктів. На рис. 1 наведено модифікований алгоритм процедури визначення типу корозії, породженої потоком в трубопроводі, запропонований в роботі [1]. Перший крок — визначення присутності водяної фази в газорідному потоці трубопроводу. За її відсутності корозія не

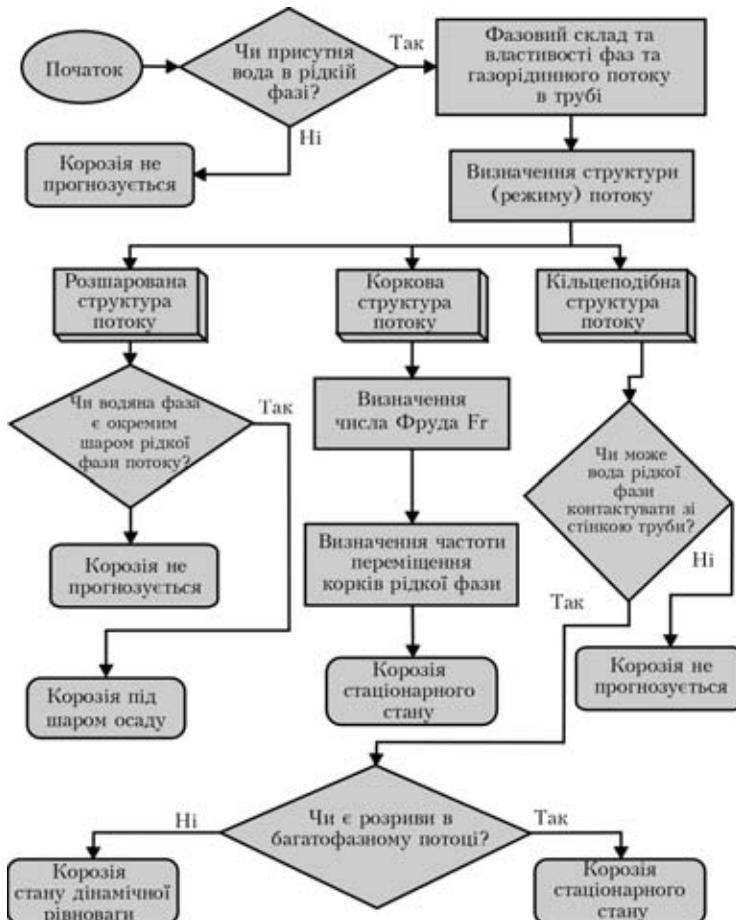


Рис. 1. Алгоритм процедури визначення типу корозії, породженої потоком в трубопроводі



прогнозується. Аналогічно корозія не прогнозується за умови відсутності контакту води рідкої фази із стінкою труби. Далі з інформації про структуру (режим) потоку і наявність розривів останнього визначається рівень турбулентності в водній фазі. За умови підтвердження процесів корозії визначається очікувана її швидкість.

Для мінімізації корозії, породженої потоком в трубопроводі, застосовуються ряд методів та організаційно-технічних заходів по зміні в конструкції, режимі течії і корозійному середовищі. Методи містять наступні дії або їх комбінацію: мінімізація турбулентності флюїду; зміна флюїду в трубопроводі; мінімізація розривів потоку; модифікація структури (режиму) потоку; використання більш корозійностійких сплавів, ніж матеріал труби.

Для однофазних систем зменшення швидкості руху потоку, як правило, призводить до зменшення інтенсивності турбулентності (масопереносу та дотичних напружень на стінці труби) і, отже, зниження швидкості корозії. Для багатофазних потоків така залежність є суттєво нелінійною, оскільки навіть за низьких швидкостей потоку рівень турбулізації залежить від структури та фазового складу потоку. Тому в багатьох галузях промисловості прийняті перевірені на практиці граничні значення швидкості потоку для різних процесів. Ці межі як правило базуються на виробничому досвіді оцінювання швидкостей потоку, коли швидкості корозії різко збільшуються. Фактично ці правила призначені для обмеження інтенсивності турбулентності і, тим самим, обмеження швидкості корозії.

Існують два шляхи для зменшення корозії, породженої потоком, шляхом модифікації флюїду потоку: вилучення корозійних частинок та використання хімічних присадок, наприклад, додавання інгібіторів корозії.

Основним чинником пошкоджень від корозії, породженої потоком, є розриви потоку, тому важливо їх мінімізувати для даних матеріалу та конструкції трубопровідної системи. Основні шляхи вказаної мінімізації наступні: мінімізувати неточне спраження при зварюванні стиків та фасонних частин труби; зашліфувати наскільки можливо гладко внутрішні зварні шви; використовувати відводи з великим радіусом заокруглення; уникати різких покровових змін в діаметрі трубопроводу; роззенковувати та знімати заусениці біля торців трубної об'язки перед встановленням; захищати труби, які зберігаються на трубних базах, з метою недопущення внутрішньої корозії перед використанням їх для ремонтних операцій; не використовувати кородовані труби, які містять внутрішні прогини, навіть якщо вони відповідають вимогам по міцності труби.

Структури потоку модифікуються шляхом зміни швидкостей газової і/або рідкої фаз в трубопроводі. Вплив цих змін на режим потоку відображається картою режимів потоку. Знання типу структури потоку, що наявна в різних секціях труби, може бути використано для визначення місця, де очікується корозія в трубопроводі і відповідно де треба здійснювати моніторинг корозії особливо ретельно. На стадії розробки розміри трубопроводів уточнюються з метою уникнути коркового потоку на очікуваних швидкостях потоку рідини та газу. Якщо очікуваною проблемою є корозія під осадом в нижній частині труби, то розмір труби уточнюється з метою уникнути розшарованої структури потоку і накопичення осаду в флюїді.

В ряді випадків доступною альтернативою уникнення впливу корозії, породженої потоком, залишається тільки використання корозійностійких сплавів, що, як правило, є найбільш дорогим вирішенням проблеми.

Для багатофазного потоку його фазовий склад має визначальний вплив на утворення в результаті структуру потоку [19]. За визначення корозії, що породжена таким потоком, першочерговою є ідентифікація типу його структури. Вихідними положеннями для її оцінки є визначення: чи буде присутня в потоці рідка корозійна фаза і чи вона буде в контакт з поверхнею металу. Режим потоку визначає турбулентність в рідкій фазі, розміщення її у потоці, і, незалежно від вказаного, можливість осідання твердих часток в потоці. Приклад режимів потоку і схематичне зображення їх границь в залежності від приведених швидкостей фаз газорідного потоку приведено на рис. 2. Детальний опис структур багатофазного потоку приведено в роботах [16, 17].

За наявності рідкої вуглеводневої фази в потоці важливим аспектом впливу режиму потоку на корозію є рівень відокремлення фаз рідких вуглеводів і води, або рівень турбулентності, який необхідний для виключення водяної фази як самостійного утворення, що контактує з металевою стінкою. Трифазний потік газу — конденсату (нафти) — води поєднує характеристики газової та нафтоводної (конденсатоводної) структур потоку. Газова фаза зумовлює високий ступінь турбулентності, але поряд з цим по відношенню до появи корозії, найбільш важливим є контакт води з металевою стінкою труби. В роботі [18] наведено основні механізми утворення корозійних пошкоджень, які характерні для різних режимів потоку за наявності вільної води та водяної турбулентності в потоці свердловини.

В таблиці розглядаються режими потоку, які спричиняють корозію, породжену потоком, та корозію під шаром осаду, без врахування зумовленої потоком корозії-ерозії стінки труби.

В Ивано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу розроблена система для поточного контролю структури та фазового складу газорідних потоків з високим газомістом, які характерні для газоконденсатних родовищ. Поряд з завданнями технологічного контролю ця система, надаючи в режимі реального часу інформацію про режим потоку та вдовміст, забезпечує моніторинг умов виникнення корозії в шлейфових трубопроводах експлуатаційних свердловин. Детально структура, складові та принцип функціонування системи викладено в роботі [21]. Оскільки найбільш критичним для оцінки явища корозії трубопроводу є контроль присутності та структури водяної фази в газорідному потоці, то більш детально розглянемо суть реалізованого цією системою імпедансного методу контролю вдовмісту в газорідному потоці з високим газомістом.

Датчик імпедансу є спеціально адаптованим для вимірювань об'ємних часток води (вдовмісту) в нафтогазових або газоконденсатних потоках з високим газомістом та статичним тиском. Хоча принцип роботи датчика відомий, на практиці є ряд чинників впливу на вимірювання, через які одержані виміри можуть бути спотворені, якщо фізика явища впливу не достатньо відома. Датчик використовується для визначення відношення концентрацій у двофазовому і двокомпонентному потоці за умови, що два компоненти або дві фази

мають різні електричні провідності та діелектричні проникності, наприклад, вода і нафта чи конденсат. Принцип вимірювання базується на положенні, що різниця в провідності різних компонентів чи фаз, які протікають між двома обкладками датчика (електродами), робить ємність чи провідність між ними залежною від відношення концентрацій компонентів або фаз у потоці. Зв'язок між відношенням концентрацій і провідністю та ємністю суміші є нелінійним і залежить від просторового розміщення компонентів або фаз у суміші (режиму потоку). Дослідження показали, що незважаючи на суттєву залежність чутливості імпедансних методів від режиму по-

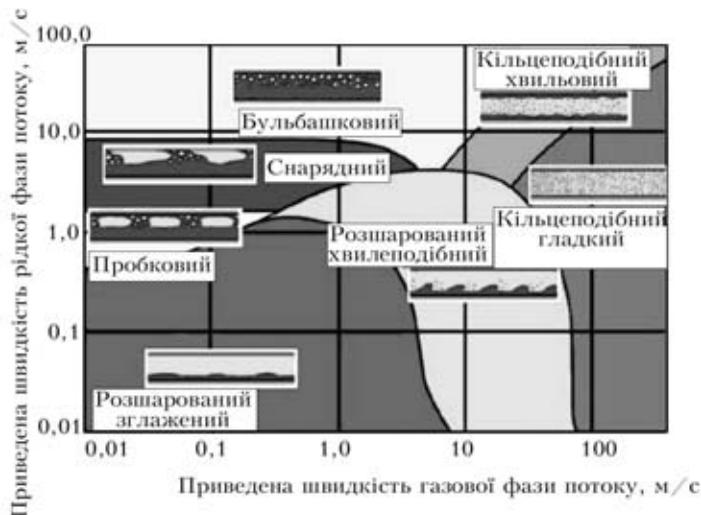


Рис. 2. Карта режимів потоку і схематичне зображення основних структур горизонтального газорідного потоку в залежності від приведених швидкостей фаз потоку

**Вплив структури потоку на корозію стінки труби**

Структура потоку	Розміщення вільної води	Турбулентність води	Тип корозії
<b>Газоводяний потік</b>			
Розширована	Внизу труби	Застійна, близька до ламінарної	Корозія під осадом, пітинг нержавіючих сталей
Коркова	Як правило внизу, суміш	Висока	Корозія, породжена потоком
Кільцева	У вигляді плівки на поверхні труби (в поперечному перерізі труби по колу)	Низька	—
<b>Газоводонафтовий потік</b>			
Розширована	Внизу, сепарована	Застійна, близька до ламінарної	Корозія під осадом, пітинг нержавіючих сталей
Коркова	Як правило внизу, суміш	Висока	Корозія, породжена потоком
Кільцева	У вигляді плівки на поверхні труби (в поперечному перерізі труби по колу)	Можливо низька	Корозія, породжена потоком
<b>Водонафтовий потік</b>			
Розширована	Внизу	Застійна, близька до ламінарної	Корозія під осадом, пітинг нержавіючих сталей
Однорідна суміш	Як правило внизу, суміш	Перехід від ламінарної до турбулентної	Корозія під осадом
Диспергована	Суміш	Низька	Корозія, породжена потоком



току, за умови вдосконалення методики вимірювань та конструкції первинного перетворювача вказані методи можуть бути використані для вимірювання концентрацій, якщо компоненти є гомогенно перемішані.

Датчик, розроблений в коаксіальному виконанні електродів, містить ізольований внутрішній електрод, що утримується в центрі труби. З цією метою розроблено конструкцію циліндричного ємнісного датчика, побудованого за принципом «труба в трубі» (рис. 3). Електричне поле в такому датчику є негомогенним, але симетричним вздовж осі труби. Чутливість до змін у концентрації рідини є найбільшою біля внутрішнього електрода і залежить від розподілу компонентів у суміші, тому достовірні вимірювання можуть бути виконані тільки тоді, коли режим потоку є сталий і відомий. Для газоконденсатних потоків характерні значення газовмісту порядку 95 % і більше по об'єму та відповідно розшарована або кільцева структура потоку. Тому для підвищення чутливості первинного перетворювача водовмісту його конструкцію виконано таким чином, що при русі потоку плівка рідини (конденсат+вода) попадатиме в міжтрубний зазор. При цьому суттєво збільшується діелектрична проникність, а отже і чутливість датчика водовмісту конденсаторного типу. Однією обкладкою датчика є зовнішня труба, а двома іншими — дві обкладки розрізаної вздовж внутрішньої труби.

Відомі формули для проникності і провідності гомогенних сумішей двох різних матеріалів. На базі відомих моделей виведено формули, які є на даний час загальноприйнятими, коли один з компонентів суміші має більш високу провідність або діелектричну проникність, а другий меншу [27].

Контрольований потік проходить в міжтрубному просторі на ділянці довжиною до 1 м, для якого визначається залежність (годограф) активної і реактивної складових імпедансу потоку як функції водовмісту потоку на різних фіксованих частотах в діапазоні 5000...100000 Гц з кроком 500 Гц. Форма такого годографу залежить від зна-

чення водовмісту, що практично дозволяє його визначати шляхом порівняння та інтерполяції із формами еталонних годографів, збережених таблично в цифровій пам'яті обчислювача для фіксованих значень водовмісту.

Експериментальні дослідження імпедансного методу контролю водовмісту потоку проводились на лабораторній установці ІФНТУНГ [17]. Враховуючи, що на значення вимірюного імпедансу потоку впливає велика група факторів: температура, тиск середовища, електромагнітні завади, окислення стінок труби датчика, солоність води, наявність домішок в конденсаті та воді, то вимірювати абсолютні значення імпедансу як функцію водовмісту на одній частоті роботи датчика недоцільно. Тому було розроблено пристрій, який вимірює імпеданс середовища в широкому діапазоні вказаних вище частот. Для технічної реалізації пристрою нами застосовувався електронний модуль ф. Analog Device [26] на базі інтегральної схеми (IC) AD5933 — система високоточного перетворювача імпедансу (рис. 4).

Система IC AD5933 містить вбудований генератор і 12-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з частотою вибірки 1 МГц. Генератор призначений для подачі сигналу у вимірюване коло з датчиком, що має комплексний імпеданс. Сигнал з датчика нормується попереднім підсилювачем, оцифровується вбудованим АЦП і далі засобами вбудованого цифрового процесорного ядра проводиться дискретне перетворення Фур'є отриманих кожних 1024 відліків сигналу. Модуль цифрової обробки сигналу на виході формує кодоване значення дійсної і уявної складових імпедансу  $Z$ , що дозволяє перерахувати значення імпедансу в його модуль і фазу.

Відомо, що для вимірювальних систем, що використовують як чутливий елемент ємність або індуктивність, істотними є проблеми калібрування пристрою і налаштування від впливу зовнішніх електромагнітних і теплових полів. Для вирішення вказаної проблеми в пристрій вбудований ву-

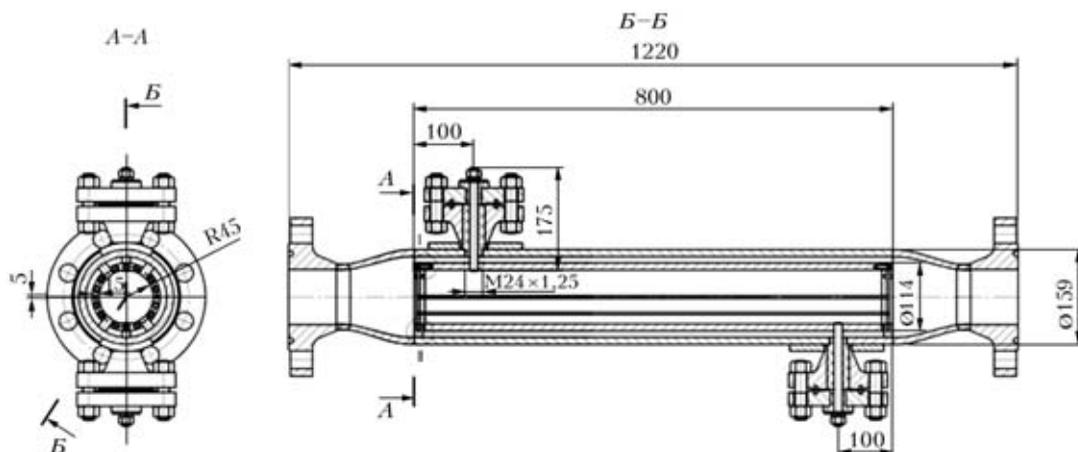


Рис. 3. Конструкція імпедансного датчика для контролю водовмісту потоку для умов газоконденсатного промислу



Рис. 4. Модуль обробки сигналу імпедансного датчика на базі AD5933

зол калібрування на зразковому конденсаторі, причому ємність такого конденсатора підбирається того ж порядку, що і вимірювана ємність фаз потоку. Перед кожною зміною початкових даних вимірювання проводиться автоматичне калібрування системи, зменшуючи тим самим вплив систематичної завади, що становить суттєву величину. Випадкова складова завад виключається в процесі математичної обробки сигналу в мікропроцесорі пристрою.

Проведені нами дослідження залежності вихідних значень дійсної і уявної частин інформаційного сигналу датчика при різному заповненні зазору між обкладками датчика газово-конденсатною сумішшю показали доцільність використання методу для технологічного контролю водовмісту на окремих ділянках технологічного ланцюга. На рис. 5 подані графіки значень модуля сигналу датчика імпедансу, їх лінійна апроксимація як функції частоти задаючого генератора при різному заповненні газова-

доконденсатної суміші зазору між обкладками датчика, що відповідає різним значенням ємності. В роботі [21] приведено годографи інформаційного сигналу ємнісного давача водовмісту потоку, отримані при зміні ємності потоку. Такий набір даних годографа після калібрування пристрою запам'ятовується в табличній області пам'яті мікропроцесора. Ця пам'ять містить комплект таких годографів по кожній свердловині по 10...15 рівнях водовмісту. Це дозволяє врахувати відмінності діелектричних властивостей води і конденсата по кожній свердловині. Визначення конкретного значення водовмісту здійснюється в процесі інтерполяції табличних значень водовмісту як функції імпедансу датчика водовмісту потоку.

Приведені результати показують, що за допомогою запропонованого пристрою імпедансним методом можливо реалізувати технологічний контроль за водовмістом потоку на рівні відносної похибки 3...4 % за об'ємом (за умови попереднього калібрування).

Відповідно до плану досліджень ДАТ «Чорноморнафтогаз» виконано комплекс робіт по монтажу розробленого в ІФНТУНГ блоку первинних перетворювачів пристрою контролю структури та витрати газорідного потоку на морському шельфовому газоконденсатному промислі МСП-17 та врізці його в трубопровід дослідної лінії промислу [21]. В залежності від витрати фаз потоку кожної з 14 свердловин промислу, потоки яких по чергово комутуються на вимірювальну ділянку, здійснюється імітація різних режимів руху газорідного потоку, витрат фаз потоку за відповідно різних швидкостей потоку. Перевагою такої експериментальної установки є використання реальних флюїдів свердловин при реальних термодинамічних умовах (тиск до 6 МПа, температура до 38 °С).

## Висновки

Серед чинників, які прискорюють корозію трубопроводів з багатофазним потоком одним з основних є структура та фазовий склад потоку. Знання того коли і де корозія, породжена потоком, може мати місце в трубопроводах, є основою для контролю корозійних явищ промислів.

Запропоновано модифікований алгоритм процедури прогнозування типу корозійного пошкодження потоком в трубопроводі та основні методи та заходи для мінімізації корозії, породженої багатофазним потоком.

Приведено основні структури горизонтального багатофазного потоку і типи корозії труби, які при цьому прогноуються. Показано, як на базі застосування

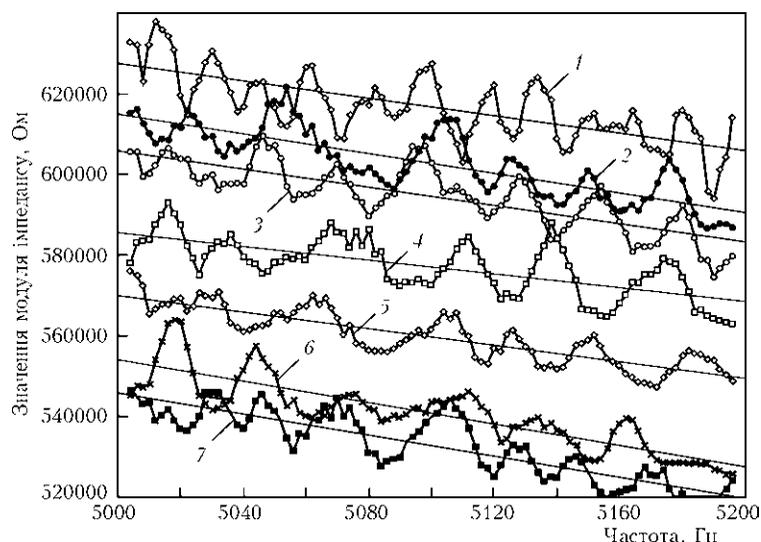


Рис. 5. Залежність значень модуля імпедансу ємнісного датчика водовмісту потоку та їх лінійна апроксимація при зміні ємності потоку, пФ: 1 — 2,2; 2 — 3,9; 3 — 5,1; 4 — 8,2; 5 — 10,1; 6 — 11,2; 7 — 12 в діапазоні частот 5000...5200 Гц з дискретністю 2 Гц (умовні позначки — експериментальні значення модуля сигналу датчика імпедансу при різних значеннях ємності потоку)



імпедансного методу вимірювань виконати технологічний контроль водовмісту в газоконденсатному потоці свердловини за високих значень газомісту та статичного тиску.

Приведені результати досліджень поточного імпедансного давача контролю водовмісту в потоці свідчать, що на основі запропонованої методики та конструкції давача забезпечується технологічний контроль за поточним водовмістом потоку свердловини на рівні відносної похибки 3...4 % за об'ємом (за умови попереднього калібрування).

*Рассмотрены вопросы прогнозирования коррозионных процессов в технологических трубопроводах с многофазными потоками. Определены основные факторы такой коррозии и методы ее минимизации. Приведены результаты исследования поточного импедансного метода контроля водосодержания продукции скважины для задач прогнозирования коррозионных явлений. Изложены результаты разработки систем контроля структуры, фазового состава потока и содержания воды в продукции скважины для идентификации наиболее вероятных условий возникновения коррозионных процессов в такой среде.*

1. *Efird K. D.* Flow effects on corrosion, Uhlig's Corrosion Handbook / Third Ed., Ed. by R. Winston Revie Copyright // John Wiley & Sons, Inc. — 2011. — P. 203–213.
2. *Thomas A. S., Bull M. K.* On the Role of Wall Pressure fluctuations in Deterministic Motions in the Turbulent Boundary Layer // J. Fluid Mech. — 1983. — **128**. — P. 283–322.
3. *Postlethwaite J., Nesic S.* Erosion-corrosion in single- and multiphase flow, Uhlig's Corrosion Handbook / Third Ed., Ed. by R. Winston Revie Copyright, 2011, John Wiley & Sons, Inc. — P. 215–227.
4. *Гоник А. А.* Коррозия нефтепромыслового оборудования и меры ее предупреждения. — М.: Недра, 1976. — 192 с.
5. *Бок М.* Предупреждение коррозии в газожидкостных и нефтяных скважинах. Пер. № 15/56П. — М.: ЦНИИГ-нефть, 1956. — 8 с.
6. *Боксерман Ю. И., Зарембо К. С., Охрименко Е. П.* Исследования коррозионного разрушения внутренней поверхности стальных газопроводных труб // Тр. ВНИИга. — 1959. — Вып. 5(13). — С. 304–322.
7. *Маркович Э. Э., Калугин Г. Н.* и др. Измерение основных параметров газожидкостных потоков при пробковой структуре течения в действующих трубопроводах. — М.: ВНИИОЭНГ. — 1956. — № 7. — С. 14–16.
8. *Корнилов Г. Г.* Влияние вязкостных свойств фаз смеси на истинную газонасыщенность двухфазных потоков // Нефтяное хоз-во. — 1975. — № 1. — С. 41–44.
9. *Галлямов А. К., Губин В. Е.* Влияние скоплений воды и газа на эксплуатационные характеристики магистральных трубопроводов. — М.: ЕНИИОЭНГ, 1970. — 44 с. (Темат. науч.-техн. обзор. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов).
10. *Внутренняя коррозия трубопроводов при транспорте газожидкостных смесей / Г. Г. Корнилов, Ф. Н. Маричев, Ю. И. Толкачев, М. Д. Гетманский // Нефтяное хоз-во. — 1981. — № 8. — С. 48–51.*
11. *Roberge, Pierre R.* Corrosion inspection and monitoring, WILEY SERIES IN CORROSION, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007. — 283 p. — ISBN: 978-0-471-74248-7 (cloth).
12. *Исследование причин разрушения внутренней поверхности трубопроводов с многофазными потоками / Г. Г. Корнилов, Ю. И. Толкачев, Я. М. Каган, Ф. Н. Маричев. — Нефтяное хоз-во. — 1983. — № 4. — С. 51–54.*
13. *Влияние химического состава транспортируемых сред и структуры потока на коррозию нефтепроводов / В. П. Редько, В. Н. Иванов, Ф. Н. Маричев и др. // РНТС. Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. — М.: БНИИОЭНГ, 1981, № 2. — С. 4–6.*
14. *Влияние гидродинамического режима транспорта газожидкостных смесей на внутреннюю коррозию сборных трубопроводов / Ф. Н. Маричев и др. // Тез. докл. на респ. межотрасл. науч.-практ. конф. — Уфа: 1. УНИ, 1980 (май). — С. 13–14.*
15. *Нормы технологического проектирования объектов сбора, транспорта, подготовки нефти, газа и воды нефтяных месторождений (ВНТП 3-85), Дата введения 1986-03-01, п.2.40.*
16. *Falcone G., Hewitt G. F., Alimonti C.* Multiphase Flow Metering: Principles and Applications: 54 (Developments in Petroleum Science) — Elsevier Science; London, — 2009.
17. *Райтер П. М., Карпаш О. М.* Методи та засоби оброблення інформації для контролю структури та витрати газорідних потоків. — Монографія. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. — 262 с.
18. *Efird K. D.* Disturbed Flow and Flow Accelerated Corrosion in Oil and Gas Production // Proc.: ASME Energy Resources Technology Conference, Houston, TX, Feb., 1998.
19. *Zhou X., Jepson W. P.* Corrosion in Three-Phase Oil/Water/Gas Slug Flow in Horizontal Pipes, Paper No.94026, CORROSION/94, NACE International, New Orleans, LA, Mar., 1994.
20. *Чернов В., Макаренко В., Шлапак Л.* Забезпечення опірності корозії трубопроводів технологічними методами // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спецвипуск: Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. — № 4. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2004. — Т. 1. — С. 421–425.
21. *Райтер П. Н.* Идентификация структуры и определение расхода фаз газоводонефтяного потока скважины // Электрон. науч. ж-л «Нефтегазовое дело». — 2010. — [http://www.ogbus.ru/authors/Raiter/Raiter\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Raiter/Raiter_1.pdf). — 15 с.
22. *Карпаш О. М., Криничный П. Я., Райтер П. М.* Особливості реалізації засобів товщинометрії та корозиметрії нафтогазового обладнання // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спецвипуск: Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. — № 4. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. — Т. 2. — С. 882–887.
23. *Карпаш О. М., Райтер П. М., Криничный П. Я.* Засоби оцінки корозійного пошкодження нафтового обладнання // Зб. наук. праць «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій» / Під ред. В. В. Панасюка. — Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2004. — С. 499–504.
24. *Система технічного моніторингу стану трубопроводів експлуатаційних свердловин в умовах шельфового видобутку / І. Р. Ващишак, С. П. Ващишак, П. М. Райтер, А. В. Яворський // Матер. 5-ї Нац. наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика. — Київ, 10–14 квітня 2006. — С. 301–306.*
25. *Султанмагомедов С. М.* Обеспечение безопасной эксплуатации и долговечности промышленных трубопроводов, подверженных канавочному износу: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук (нефтегазовая отрасль). — Уфа: Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т, 2003. — 48 с.
26. *Network Analyzer AD5934, Datasheet., 12-Bit Impedance Converter: www.analog.com, 2005 Analog Devices, Inc.*
27. *Agilent Impedance Measurement Handbook: A guide to measurement technology and techniques 4th Edition, Agilent Technologies, Inc. 2000-2009, режим доступа <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>*

Надійшла до редакції  
20.10.2011

# ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ К СЛОИСТЫМ РАЗРУШЕНИЯМ. РАЗВИТИЕ НОВЫХ ПОДХОДОВ

А. В. БЕРНАЦКИЙ, научн. сотр., Р. И. ДМИТРИЕНКО, вед. инж.,  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Изложены возможности определения величины ударной вязкости  $KCV_z$  с помощью корреляционных зависимостей между величинами ударной вязкости  $KCV$  и  $KCV_z$ ,  $KCV_z$  и относительным сужением  $\varphi_z$  для низкоуглеродистых (н/у) и низколегированных (н/л) сталей.*

*Possibilities of determination of the value of  $KCV_z$  impact toughness using correlation dependencies between values of impact toughness  $KCV$ ,  $KCV_z$  and  $KCV_z$  and relative elongation  $\varphi_z$  for low-carbon (l/c) and low-alloyed (l/a) steels are described.*

Важными критериями оценки склонности металлопроката к слоисто-вязким и слоисто-хрупким разрушениям являются величины относительного сужения  $\varphi_z$  и ударной вязкости  $KCV_z$ , полученные на соответствующих образцах, расположенных перпендикулярно плоскости прокатки листа (в Z-направлении) [1–6].

Определение величины относительного сужения  $\varphi_z$  на образцах, расположенных в направлении толщины листа, регламентируется ГОСТ 28870–90, где в зависимости от величины относительного сужения  $\varphi_z$  листовой прокат классифицируется по группам качества: Z15, Z25 и Z35, что отражает его способность сопротивляться зарождению и развитию слоисто-вязких трещин [7].

Другие характеристики, измеренные при испытаниях на растяжение образцов, расположенных в направлении толщины листа, например предел текучести  $\sigma_T^z$ , малопригоден для оценки склон-

ности металлопроката к образованию слоистых трещин. Только в тех случаях, когда металлопрокат имеет большое количество неметаллических включений (процентное содержание серы  $S > 0,012$  %) может произойти уменьшение величины предела текучести  $\sigma_T^z$ . В таких случаях, разрушение Z-образца происходит при разрушающих напряжениях  $\sigma_p^z$ , величина которых меньше величины предела текучести  $\sigma_p^z < \sigma_T$ .

Из табл.1 и рис. 1 видно, что величины временного сопротивления  $\sigma_B^z$  и предела текучести  $\sigma_T^z$  для некоторых марок сталей могут уменьшаться в основном при значениях относительного сужения  $\varphi_z < 15$  %.

Зафиксированы также случаи уменьшения этих величин и при более высоких значениях относительного сужения  $\varphi_z > 30$  %.

Именно по этой причине при оценке склонности металлопроката к слоисто-вязким разруше-

**Таблица 1. Результаты испытаний н/у и н/л сталей на растяжение**

Марка стали	Толщина листа, мм	Поперек направления прокатки				Z-направление			
		$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T/\sigma_B$	$\varphi_z$ , %	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T/\sigma_B$	$\varphi_z$ , %
16Г2АФ	20	565	680	0,831	62	522	690	0,757	-
Ст.3	70	234,2	448,7	0,522	59,8	211,3	261,3	0,809	10,8
16Г2АФ	40	434,4	611	0,711	55,5	401,6	432,3	0,929	6,6
14Г2АФ	40	401,6	577,6	0,695	70,2	388,6	535,6	0,726	48,2
14Г2АФ	40	475,3	668,3	0,711	59,6	461,6	583	0,792	5,9
14Г2АФ	35	515	615,9	0,836	67	412,6	582,5	0,708	12,9
14Г2АФШ	35	515	615,9	0,836	67	390,9	-	-	-
16Г2АФ	40	462,3	656,1	0,705	62,6	370,3	-	-	6,3
16Г2АФШ	40	435,5	580,6	0,750	69,6	409,4	568,7	0,720	42,4
09Г2С	15	356	495,5	0,718	73	370	470	0,787	32
14Г2АФ	50	362,7	528,3	0,687	62,45	397	500,8	0,793	24,8
12ХГДАФ	50	330,2	499,8	0,661	67,7	350	-	-	65,8
09Г2СШ	50	300,4	492,1	0,610	80,3	-	340	-	29,8
09Г2С	35	405,3	493,6	0,821	76,3	349	476,3	0,733	32

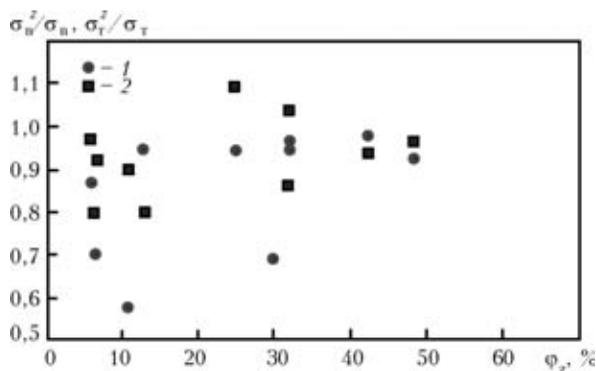


Рис. 1. Зависимость прочностных характеристик испытываемых образцов ( $\sigma_b^z, \sigma_b, \sigma_T^z, \sigma_T$ ) от величины относительного сужения в направлении толщины  $\phi_z$ : 1 —  $\sigma_b^z/\sigma_b$ ; 2 —  $\sigma_T^z/\sigma_T$

ниям — определении величины относительного сужения  $\phi_z$  — рекомендовано фиксировать величины  $\sigma_b^z, \sigma_T^z$  как одни из основных характеристик механических свойств металлопроката.

Для оценки склонности листового проката к слоисто-хрупким растрескиваниям необходимо проводить испытания на ударный изгиб образцов, вырезанных в Z-направлении, перпендикулярном плоскости прокатки стального листа [7]. Однако изготовление образцов для таких испытаний (длина образца  $L = 55$  мм) имеет определенные технологические трудности — изготовление и «приварка» захватов к исследуемому листу с последующим изготовлением образцов из полученных сварных крестовых соединений, что делает проведение таких испытаний в заводских условиях практически невозможными.

С инженерной точки зрения было бы удобно разработать методику, с помощью которой, не применяя сварных крестовых соединений можно было бы оценить величину ударной вязкости в направлении толщины листа  $KCV_z$  в диапазоне температур вязко-хрупкого перехода по результатам стандартных испытаний образцов, расположенных в плоскости листа, на растяжение  $\phi$  или ударный изгиб  $KCV$ . Такая постановка задачи обусловлена, в первую очередь, необходимостью оценки трещиностойкости основного металла

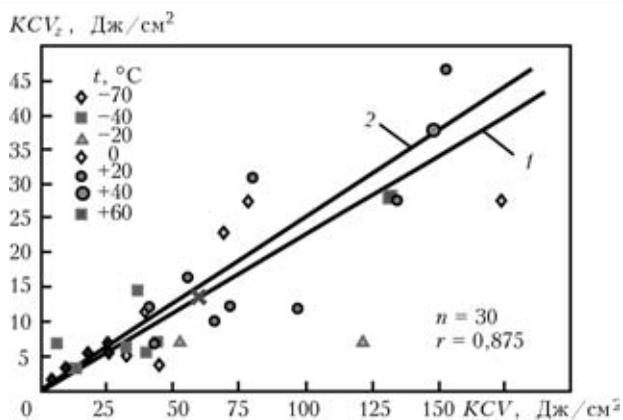


Рис. 2. Зависимость  $KCV_z$  от  $KCV$ , полученная на образцах, расположенных в плоскости листа методом наименьших квадратов (МНК): 1 —  $KCV_z$  по отношению к  $KCV$  (угловой коэффициент 0,227); 2 —  $KCV$  по отношению к  $KCV_z$  (угловой коэффициент 0,252);  $n$  — количество точек;  $r$  — коэффициент корреляции;  $\times$  — точка, соответствующая средним значениям  $KCV$  и  $KCV_z$

сварной конструкции, в нашем случае — его склонности к возникновению и развитию слоисто-хрупких разрушений как наиболее нестабильных. Принимая во внимание возможность изменения механических свойств основного металла технологического оборудования после длительного периода эксплуатации, решение такой задачи является актуальной.

В работе [8] было выдвинуто предложение, что между величинами ударной вязкости  $KCV$  и  $KCV_z$  для н/у и н/л сталей, а также для сталей, изготовленных с применением контролируемой прокатки, могут существовать корреляционные зависимости.

С целью изучения возможных корреляционных связей между величинами,  $KCV$ — $KCV_z, \phi_z$ — $KCV_z$  для статистической обработки были привлечены результаты лабораторных испытаний на ударный изгиб различных марок низкоуглеродистых, низколегированных сталей, а также сталей изготовленных с применением контролируемой прокатки.

В табл. 2 и на рис. 2 приведены результаты испытаний исследуемых н/у и н/л сталей на ударный изгиб.

Таблица 2. Результаты испытаний н/у и н/л сталей на ударный изгиб при разных температурах испытаний, °С

Марка стали	Толщина листа, мм	Поперек направления прокатки, Дж/см <sup>2</sup>							Z-направление, Дж/см <sup>2</sup>						
		-70	-40	-20	0	+20	+40	+60	-70	-40	-20	0	+20	+40	+60
16Г2АФ	20	25,5	40	-	40,7	40,7	-	-	5,3	5,3	-	11,3	11,7	-	-
Ст.3	70	-	6	-	-	97,3	148,3	131	-	6,67	-	-	11,7	38	28
16Г2АФ	40	-	43,7	52,3	-	55,3	-	-	-	6,7	7,5	-	16,3	-	-
14Г2АФ	40	-	12	-	32,3	71,7	-	-	-	3	-	5	12	-	-
14Г2АФ	35	25,3	37	-	78,3	79,7	-	-	6,5	14,5	-	27,5	30,5	-	-
16Г2АФ	40	18,3	-	-	-	65,7	-	-	5,3	-	-	-	10	-	-
09Г2С	15	4	10,5	-	45	43	-	-	1,3	3	-	3,7	6,7	-	-
09Г2СШ	50	9,7	32,7	-	69	153,5	-	-	2,8	6	-	23	46,5	-	-
02Г2С	35	-	-	-	174	134	-	-	8,5	-	-	27,5	28	-	-

Исходя из полученных результатов (рис. 1) между величинами ударной вязкости в плоскости листа и Z-направлении получено следующее приближенное уравнение:

$$KCV_z = 0,23 KCV.$$

По результатам испытаний угловой коэффициент составил: минимальный — 0,082, средний — 0,235, максимальный — 0,392.

Следовательно, ориентировочное значение коэффициента слоистого растрескивания будет:

$$KCP = \frac{KCV - KCV_z}{KCV} = \frac{1 - 0,23}{1} = 0,77.$$

По результатам испытаний оно составило: минимальное — 0,61, среднее — 0,765, максимальное — 0,918.

На втором этапе были проанализированы зависимости величины ударной вязкости  $KCV_z$  от величины относительного сужения  $\varphi_z$ , получен-

ные для различных марок н/у, н/л сталей в диапазоне температур вязкого-хрупко перехода (табл. 3, рис. 3).

Если предположить, что при  $\varphi_z = 0$   $KCV_z$  также равно нулю, то при аппроксимации экспериментальных точек линейной зависимостью можно использовать уравнение вида:  $KCV_z = a\varphi_z$ , где угловой коэффициент  $a$  является функцией температуры  $t$ :  $a = f(t)$ ,  $a = \text{tg}(\alpha)$ ,  $\alpha$  — угол наклона.

На рис. 3 также представлены результаты испытаний сталей электрошлакового переплава с высокими значениями величины относительного сужения  $\varphi_z^{\text{ср}} > 30$  %. Видно, что эти данные также сос-

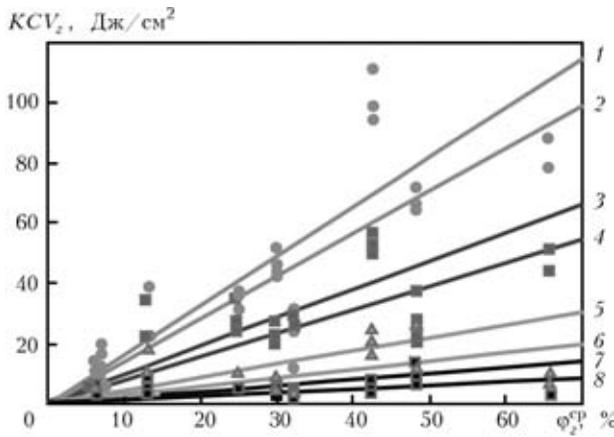


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости  $KCV_z$  от величины относительного сужения  $\varphi_z^{\text{ср}}$  в диапазоне переходных температур, полученные МНК: 1, 2 — для температуры испытаний +20°C; 3, 4 — 0 °C; 5, 6 — -40 °C; 7, 8 — -70 °C (прямые 1, 3, 5, 7 —  $\varphi_z$  по отношению к  $KCV_z$ ; 2, 4, 6, 8 —  $KCV_z$  по отношению к  $\varphi_z$ )

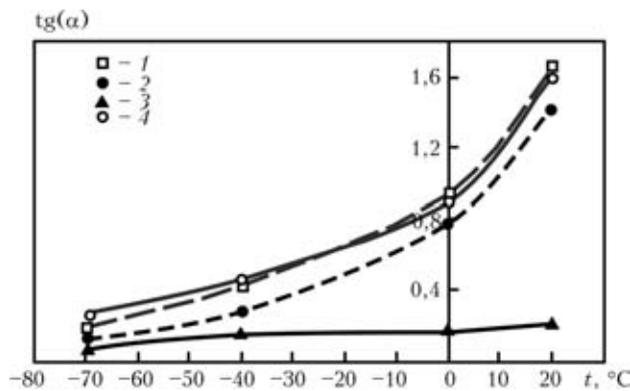


Рис. 4. Экспериментальные значения углового коэффициента  $a = \text{tg}(\alpha)$  для соответствующих прямых, полученных МНК: 1 — для  $\varphi_z$  по отношению к  $KCV_z$ ; 2 — для  $KCV_z$  по отношению к  $\varphi_z$ ; 3 — разница между 1 и 2; 4 — среднее значение параметра  $a$ , оцениваемое как отношение  $a = KCV_z / \varphi_z^{\text{ср}}$

Таблица 3. Относительное сужение  $\varphi_z$  (средние значения) и ударная вязкость  $KCV_z$

Марка стали	Толщина листа, мм	Относительное сужение $\varphi_{\text{ср}}$ , %	Ударная вязкость $KCV_z$ , Дж/см <sup>2</sup>			
			4	3	2,5	1
09Г2С	15	32	4	3	2,5	1
			4	4	2,5	1
			12	4	4	2
14Г2АФ	50	24,8	32	25	7	5
			35	27	10	5
			37	35	-	-
09Г2С	35	32	25	25	-	-
			31	30	-	-
12ХГДАФ	50	65,8	79	44	9	2,5
			90	51	6	4
			90	-	10	4
09Г2СШ	50	29,8	44	20	6	2,5
			45	22	6	3
			45	27	9	3
			46,5	-	-	-
			52	-	-	-
16Г2АФ	40	6,6	12	-	5	3
			17	-	7	3
			20	-	8	-
14Г2АФ	40	48,2	65	20	13	7
			67	27	25	12
			72	38	27	13
16Г2АФ	40	5,9	10	4	3	-
			11	5	3	-
14Г2АФ	35	12,9	15	6	3	-
			22	21	10	6
16Г2АФ	40	6,3	39	34	19	7
			10	-	-	5
			-	-	-	5
16Г2АФШ	40	42,4	-	-	17	6
			95	50	21	4
			99	52	25	7
			112	56	-	7



тавляют корреляционные зависимости величин ударной вязкости  $KCV$  и  $KCV_z$  для н/у н/л сталей.

Из рис. 3 видно, что с повышением температуры угол наклона прямых, построенных по МНК, а соответственно и их тангенс — коэффициент  $a$  в уравнении  $KCV_z = a\varphi_z$  — увеличивается нелинейно (рис. 4).

Функция  $a = f(t)$  должна лежать между кривыми 1 и 2, и в этом случае:

$$a = f(t) = 0,9e^{0,026t}$$

Таким образом,  $KCV_z = \varphi_z 0,9e^{0,026t}$ .

Остается найти дополнительный параметр, который бы дополнительно характеризовал рассеяние экспериментальных точек.

Таким образом, прослеживается устойчивая зависимость между характеристиками  $KCV$  и  $KCV_z$ ,  $\varphi_z$  и  $KCV_z$  а также температурами испытания образцов на ударный изгиб (см. рис. 2).

Следует отметить, что металлопрокат, изготовленный по методу контролируемой прокатки отличается высокими пластическими свойствами  $\varphi$ ,  $\varphi_z$  и величинами ударной вязкости при положительных температурах испытаний. Однако при понижении температуры испытаний на ударный изгиб, как правило, сопротивление возникновению слоисто-хрупким разрушениям (величина  $KCV_z$ ) резко снижается [1–3, 8].

В табл. 4 и на рис. 5 приведены результаты лабораторных испытаний на ударный изгиб.

Видно, что значения ударной вязкости, полученные на Z-образцах, отличаются, в первую очередь, большим разбросом в диапазоне переходных температур  $T_{исп} = -20...-40$  °С. На рис. 6 представлены обобщенные результаты для исследованных марок сталей контролируемой прокатки.

Исходя из полученных результатов можно предположить, что для исследованных марок ста-

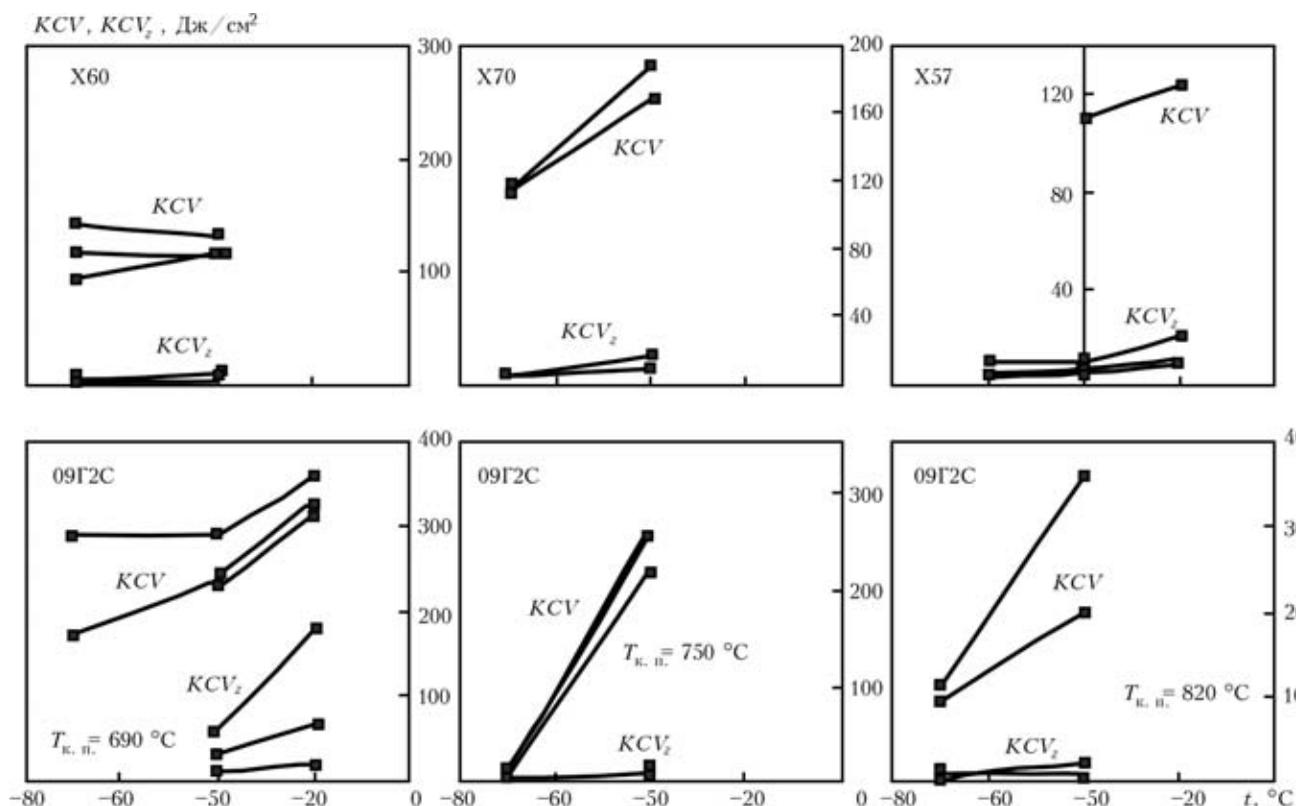


Рис. 5. Зависимости ударной вязкости от температуры испытаний для сталей, изготовленных по методу контролируемой прокатки

Таблица 4. Результаты испытаний сталей контролируемой прокатки на ударный изгиб при разных температурах испытаний, °С

Марка стали (температура конца прокатки)	Поперек направления прокатки $KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>					В направлении толщины $KCV_z$ , Дж/см <sup>2</sup>				
	-70	-40	0	+20	+10	-70	-40	0	+20	+10
09Г2С ( $T_{к.п.} = 740$ °С)	171,3	279,0	330,7	-	-	4,5	44,0	115,7	-	-
09Г2С ( $T_{к.п.} = 750$ °С)	6,5	240,0	353,3	360,0	-	4,5	93,7	358,3	253,0	-
09Г2С ( $T_{к.п.} = 820$ °С)	72,3	278	328,3	-	360	5,7	11,0	90,0	-	235,0
X60	118	122	221	163,7	-	2,5	3,2	21	163,7	-
X70	111,7	176,5	199,7	-	-	8,7	128,0	211	-	-
X57	-	-	112,5	224,5	-	-	-	7,3	13,3	-

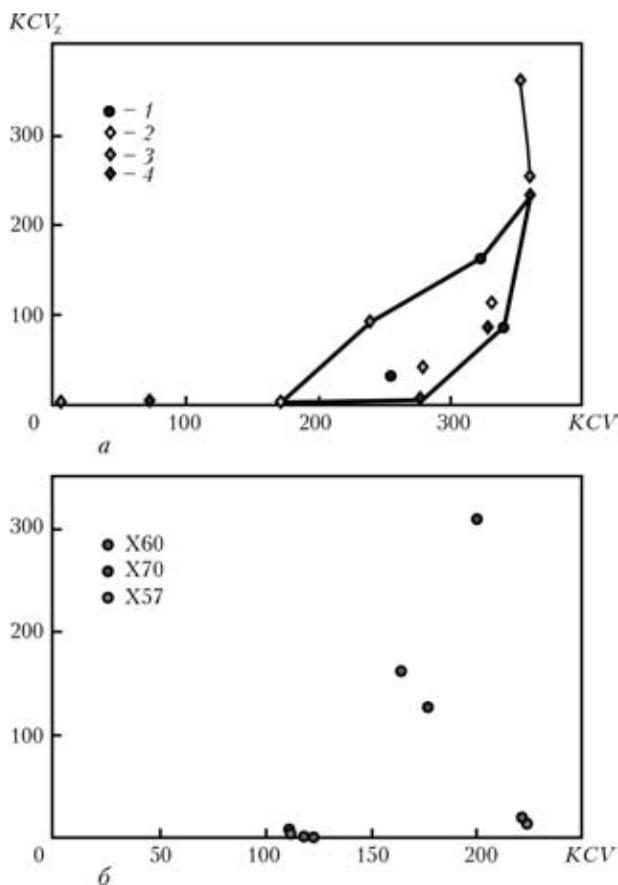


Рис. 6. Обобщенные результаты испытаний на ударный изгиб для исследованных сталей контролируемой прокатки: а — для сталей марки 09Г2С с различными температурами конца прокатки  $T_{к.п.}, ^\circ\text{C}$ : 1 — 660; 2 — 740; 3 — 750; 4 — 820; б — для сталей марок X57, X60, X70 (температуры конца прокатки неизвестны)

лей контролируемой прокатки прослеживаются возможности существования взаимосвязи между величинами  $KCV$  и  $KCV_z$ . Однако установление корреляционной зависимости требует дальнейшего изучения.

## Выводы

По величине относительного сужения, полученной на стандартных образцах, расположенных в плоскости листа  $\varphi^{cp}$  и в Z-направлении ( $\varphi_z^{cp}$ ) для н/у и н/л сталей можно приблизительно определить величину  $KCV_z^{max}$ .

По результатам испытаний стандартных образцов на ударный изгиб, расположенных в плоскости листа ( $KCV$ ), можно приблизительно определить величину  $KCV_z^{max}$  в диапазоне температур вязкохрупкого перехода для н/у н/л сталей.

Для наиболее объективной оценки взаимосвязей величин  $\varphi_z$ ,  $KCV_z$  и  $KCV$  целесообразно проводить сравнительные оценки для каждой марки стали или плавки.

1. Новиков В. И., Гиренко В. С., Бернацкий А. В. Анизотропия свойств металлопроката и работоспособность сварных конструкций // Автомат. сварка. — 1985. — № 12. — С. 13–19.
2. Гиренко В. С., Бернацкий А. В. и др. Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
3. Гиренко В. С., Бернацкий А. В., Козачек В. М. Хрупкое разрушение стали с развитой кристаллографической текстурой // Автомат. сварка. — 1991. — № 1. — С. 6–9.
4. Влияние кристаллографической текстуры на анизотропию характеристик разрушения низколегированной стали контролируемой прокатки / В. В. Усов, В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина и др. // Физ.-хим. механика материалов. — 1993. — № 2. — С. 47–52.
5. Микляев П. Г., Фридман Я. Б. Анизотропия механических свойств материалов. — М.: Металлургия, 1969. — 267 с.
6. Георгиев М. Н. Вязкость малоуглеродистых сталей. — М.: Металлургия, 1973. — 224 с.
7. ГОСТ 28870–90. Сталь. Методы испытания на растяжение толстолистового проката в направлении толщины.
8. Бернацкий А. В. Дополнительные подходы к оценке склонности низкоуглеродистых и низколегированных сталей к слоисто-вязким и слоисто-хрупким разрушениям // Автомат. сварка. — 2003. — № 5. — С. 22–25.

Поступила в редакцию  
21.07.2011

## 4-я Международная научно-техническая конференция и выставка «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ»

26-27 сентября 2012 г.,

Могилев, Республика Беларусь

### Организатор :

Белорусско-Российский университет

### Основная тематика:

Дефектоскопия материалов и промышленных изделий

Контроль структуры и физико-механических характеристик материалов изделий

Контроль геометрических параметров объектов

Мониторинг, диагностика и прогнозирование остаточного ресурса технических объектов

Компьютерные технологии в неразрушающем контроле

Тел.: (+375) 222 225 212, 297 433 868, sss.bru@tut.by



## 11-я Международная выставка NDT RUSSIA 2012 «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

В настоящее время **NDT Russia** является одним из самых значимых событий в отрасли НК, которое не только знакомит участников и посетителей с последними отечественными и зарубежными образцами разработок нового оборудования для НК и ТД в промышленности, но и вносит вклад в развитие промышленного потенциала России.

Ежегодно выставка **NDT Russia** проводится при официальной поддержке государственных структур и специализированных ассоциаций. В 2012 г. выставке поддержали такие авторитетные отраслевые организации, как *Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии* и *Российское общество по НК и ТД, Российское ядерное общество*.

Как часть экспозиции **MERATEK** традиционно в рамках **NDT Russia** представлено новейшее контрольно-измерительное оборудование, которое используется при технической диагностике. Постоянное развитие средств, методов и технологий НК ведет к росту потребностей в измерительных приборах и системах, поэтому участие в проекте **MERATEK** дает уникальную возможность обмениваться идеями, информацией, развивать взаимовыгодное научно-техническое и торговое сотрудничество с потенциальными клиентами и партнерами в области НК и ТД.

Торжественное открытие выставки **NDT Russia 2012** состоялась 28 февраля с участием представителей ведущих отраслевых предприятий и организаций.

В рамках экспозиции свои разработки и достижения представили более 140 компаний из 9 стран, а посетило выставку 5673 специалиста. Самые передовые разработки традиционно приняли участие в конкурсе «Иновация NDT», по результатам которого высококомпетентное жюри определило победителей:

**III место** Портативное устройство для визуального эндоскопического контроля **IPLEX UltraLite** (компания «Олимпас Москва»); **II место** Ультразвуковой томограф **A1040 MIRA** (компания «Акустические Контрольные Системы»); **I место** Малогабаритный рентгеновский микротомограф (Томский политехнический национальный исследовательский университет).

Кроме того, дипломами лауреатов конкурса были награждены:

- ООО «Центр МЕТ» за ультразвуковой мини-твердомер **MET-NV50**;
- ООО «Интерюнис» за многофункциональный портативный прибор **UNISCOPE**;
- ОАО «Константа» за многофункциональный

прибор «Константа К6».

Помимо интересной экспозиции в рамках выставки **NDT Russia** для специалистов была организована содержательная и актуальная деловая программа: все три дня были насыщены общением специалистов в рамках специально сформированных круглых столов для профессиональных переговоров. В этом году совместно с генеральным партнером выставки **РОНКТД** были организованы встречи специалистов авиакосмической и атомной отрасли по НК и ТД.

В первый день участники и профессиональные гости выставки смогли принять участие в семинаре «*Метрологическое обеспечение методов НК*», организованном ФГУП «ВНИИ оптико-физических измерений».

Гости и участники выставки могли посетить демонстрационную площадку, в рамках которой компания-участница имела возможность презентовать свои услуги и оборудование всем заинтересованным специалистам и привлечь дополнительное внимание к своим стендам.

Для участников и гостей было организовано два семинара:

- Семинар по вопросам использования методов НК в нефтегазовом секторе (промышленная ассоциация «Мега»);
- Защищенные ноутбуки **Panasonic**. Применение ноутбуков **Panasonic** в системах диагностики (компания **Panasonic**).

Деловая программа завершилась подведением итогов *IX Всероссийского конкурса специалистов НК*. Конкурс охватывает семь методов НК и проводится в несколько этапов. Организаторами конкурса выступают **РОНКТД** при поддержке Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору.

### **Организаторы:**

#### **«Примэкспо», ООО (Россия)**

Официальный партнер компании **ITE Group Plc**, организатор крупнейших международных выставок в России. Является членом Российского союза выставок и ярмарок.

#### **ITE Group Plc (Великобритания)**

Признанный лидер выставочного бизнеса, имеющий 15-летний опыт организации выставок на развивающихся рынках и играющий важнейшую роль в установлении деловых отношений между тысячами российских и иностранных компаний.

**Информационные спонсоры выставки:** журналы «В мире НК», «Контроль и диагностика», «Территория NDT», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».



### З. Т. НАЗАРЧУКУ — 60



Виповнилося 60 років відомому вченому в галузі фізики неруйнівного контролю та діагностики матеріалів, першому заступнику директора Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України доктору фіз.-мат. наук, професору, член-кореспонденту та академіку Національної академії наук

України **Зіновію Теодоровичу Назарчуку.**

Народився 1952 р. у м. Львові в сім'ї робітників. З відзнакою у 1974 р. закінчив фізичний факультет Львівського державного (нині – національного) університету ім. Івана Франка за спеціальністю «Оптичні прилади і спектроскопія», здобувши кваліфікацію фізик-оптик.

Після навчання в університеті та служби у ЗС СРСР зарахований на роботу у ФМІ, де пройшов шлях від старшого інженера відділу фізичних основ міцності матеріалів до першого заступника директора інституту з науково-дослідної роботи.

Кандидат фізико-математичних наук з 1982 р. (спеціальність – радіофізика, включаючи квантову радіофізику), доктор фізико-математичних наук з 1990 р. (спеціальність – радіофізика), старший науковий співробітник (1988 р.) зі спеціальності теоретична і математична фізика; професор (1998 р.) зі спеціальності теоретична фізика; член-кореспондент Національної академії наук України з 1995 р. (спеціальність – матеріалознавство, міцність матеріалів). Академіком Національної академії наук України обраний у 2006 р. за спеціальністю матеріалознавство, діагностика матеріалів. Науковий керівник ряду міжнародних дослідницьких проектів. Підготував 4 докторів та 7 кандидатів наук. Неодноразово читав курси лекцій з математичної теорії дифракції хвиль в університетах Японії. Автор 9 монографій та біля 300 робіт у науковій періодиці.

З.Т.Назарчук – відомий учений у галузі фізики неруйнівного контролю та діагностики матеріалів. Він створив теорію неруйнівного контролю дефектності матеріалу, основу на математично коректному врахуванні дифракційної взаємодії зондуєчих фізичних полів із системою тріщиноподібних дефектів.

Суттєво розширив теорію резонансного розсіяння хвиль на дефектах матеріалу, зробив значний науковий внесок у розвиток чисельно-аналітичних методів розв'язування сингулярних операторних рівнянь математичної фізики, побудував аналітичні розв'язки ряду змішаних крайових задач, що складають еталонну базу для діагностування стану об'єктів; сформулював і

теоретично обґрунтував шляхи вирішення проблеми селективного вихрострумовевого контролю дефектності матеріалів; надав якісно нового рівня інтерпретації даних акустико-емісійної діагностики елементів конструкцій під час зародження та поширення тріщин у матеріалах.

Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (1995 р.) у складі авторського колективу науковців ФМІ за цикл монографій з фізико-хімічної механіки руйнування і міцності матеріалів; премії НАН України ім. К. Д. Синельникова (2001 р.) за цикл робіт з теорії фізичних полів та премії ім. Є. О. Патона (2010 р.) за цикл робіт «Акустико-емісійна діагностика матеріалів і конструкцій». Нагороджений відзнакою НАН України «За наукові досягнення» (2007 р.) за творчий внесок у роботу «Розробка і впровадження засобів і технологій технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання тривалої експлуатації», удостоєну Державної премії України в галузі науки і техніки за 2006 р. Заслужений діяч науки і техніки України (2002 р.). Нагороджений орденом «За заслуги» III ступеня (2008 р.).

З.Т.Назарчук виконує значну науково-організаційну роботу в Україні як голова Західного наукового центру НАН України, член Президії та Бюро відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України, член Президії Наукового товариства імені Т.Г. Шевченка, член правління Українського товариства з механіки руйнування матеріалів. Він є співредактором спеціального випуску праць Інституту радіоінженерів і електроніків (ІЕІСЕ, Японія), присвяченому розсіянню і дифракції хвиль, а також міжнародної серії монографій «International Series of Monographs on Advanced Electromagnetics» (Science House, Tokio). Зараз — головний редактор міжвідомчого збірника «Відбір і обробка інформації», член редколегій ряду міжнародних наукових журналів.

З.Т. Назарчук є дійсним членом Наукового товариства імені Шевченка, членом Національного комітету України з теоретичної і прикладної механіки, сеньйором Міжнародного інституту інженерів-електроніків (ІЕЕЕ), членом Міжнародної електромагнітної академії та Міжнародного радіосоюзу (URSI).

*Шановний Зіновію Теодоровичу! Бажаємо Вам міцного здоров'я, невичерпної енергії і подальшої творчої праці на благо науково-технічного розвитку України!*

*Редколегія і редакція журналу «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»*

## ПОДПИСКА — 2012

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

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

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Подписка на электронную версию журнала  
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»  
на сайте: <http://www.rucont.ru>.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате \*.pdf. Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2011 гг. Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

## РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

**Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров**

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

**Технические требования к рекламным материалам**

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

**Стоимость рекламы и оплата**

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

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

**Контакты:**

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

Подписано к печати 24.05.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 6 цв. вклеек.  
Печать ООО «Фирма «Эссе».



## 7-я Национальная научно-техническая конференция и выставка

20-23 октября 2012, Киев, Украина



Организаторы

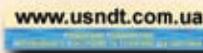


При содействии



Информационная поддержка

Международный выставочный центр  
г. Киев, Броварской пр.-т, 15



### Основные темы конференции:

- Ультразвуковой и акустико-эмиссионный методы контроля
- Вихрековый и магнитный методы контроля
- Радиационный, тепловой и оптический методы контроля
- Низкочастотный ультразвуковой контроль протяжных объектов с ограниченным доступом к поверхности
- Вибродиагностический метод контроля
- Мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса объектов повышенной опасности при эксплуатации
- Неразрушающий контроль и техническая диагностика в нефтегазовой области
- Неразрушающий контроль и техническая диагностика в авиации
- Вопросы стандартизации, сертификации и метрологического обеспечения в области НК и ТД

### Важные даты:

Представление докладов – до 20.09.2012 г.  
Заявка на участие – до 01.10.2012 г.  
Оплата за участие – до 01.11.2012 г.  
(льготная оплата – до 01.09.2012 г.)

### Адреса и телефоны Оргкомитета:

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики  
ул. Боженко, 11, 03680, г. Киев-150, ГСП  
Тел.: (+380 44) 200-46-66, 205-21-72, 205-22-49  
Факс: (+380 44) 205-31-66  
E-mail: usndt@ukr.net  
www.usndt.com.ua





ЦЕНТР СЕРТИФИКАЦІЇ ПРИ УКРАЇНСЬКОМУ ОБЩЕСТВЕ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ І ТЕХНІЧЕСЬКОЇ ДІАГНОСТИКИ

## **ПРОГРАММА ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

### **ОСВОЕНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

- визуально-измерительный
- визуально-оптический
- радиографический
- ультразвуковой
- капиллярный
- магнитный
- тепловой

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЖБК**

- методы обнаружения дефектов арматуры ЖБК
- методы обнаружения расположения арматуры в ЖБК
- контроль качества бетона
- правила составления технологических карт контроля

### **ЗА ПОДРОБНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ОБРАЩАЙТЕСЬ:**

03680, Киев, ул. Боженко, 17  
тел.: (044) 205-31-66  
Бородай Ольга Сергеевна

