

Учредители: Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Международная ассоциация «Сварка» (издатель)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Б. Е. ПАТОН

О. И. Бойчук, Э. Ф. Гарф,

Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,

Л. М. Лобанов, З. А. Майдан (отв. секр.),

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.), **Ю. Н. Посыпайко,**

В. А. Троицкий (зам. гл. ред.), **Е. В. Шаповалов**

ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина

В. А. Стрыжало

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

В. Л. Венгринович

Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь

М. Л. Казакевич

Ин-т физической химии, Киев, Украина

О. М. Карпаш

Ив.-Франк. нац. техн. ун-т нефти и газа, Украина

В. В. Ключев

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

Н. В. Новиков

Ин-т сверхтвердых материалов, Киев, Украина

Г. И. Прокопенко

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

В. А. Стороженко

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

С. К. Фомичов

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ», Киев

М. Г. Чаусов

Нац. ун-т биорес. и природопольз. Украины, Киев

В. Е. Щербинин

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,

ул.Казимира Малевича, 11

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Научные редакторы

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

Редакторы

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа, Т. В. Юштина

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

Журнал входит в перечень

утвержденных МОН Украины

изданий для публикации трудов

соискателей ученых степеней

СОДЕРЖАНИЕ

Интервью с президентом Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики В.А. Троицким 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ТРОИЦКИЙ В.А., КАРМАНОВ М.Н., ГОРБИК В.М., ЛУКАШЕВ Н.В. Низкочастотный ультразвуковой контроль технологических трубопроводов направленными волнами 7

НЕДОСЕКА А.Я., НЕДОСЕКА С.А. Возникновение трещин на внутренней поверхности трубопроводов в условиях высоких температур. Сообщение 3. Температура и напряжения в стенке трубы при охлаждении 13

МАСАЛОВ С.О., ПОЧАНІН Г.П., РУБАН В.П., ХОЛОД П.В. Радіолокаційний моніторинг технічного стану під поверхневої частини інженерних споруд 17

ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е.А., МИЛЕНИН А.С., РОЗЫНКА Г.Ф., ПИВТОРАК Н.И. Численное прогнозирование эффективности усиления дефектных трубопроводов бандажами из композиционных материалов 24

ШУЛЬЖЕНКО М.Г., ЄФРЕМОВ Ю.Г., ЦИБУЛЬКО В.Й., ДЕПАРМА О.В. Розробка мобільного багатофункціонального вимірювально-діагностичного комплексу неруйнівного контролю і оцінки технічного стану енергетичних і транспортних агрегатів тривалої експлуатації..... 32

СТАЩУК М.Г., ІВАНІЦЬКИЙ Я.Л., ДОРОШ М.І. Оцінювання міцності та довговічності полімерних трубних конструкцій 38

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ПОЗНЯКОВ В.Д., ДЯДИН В.П., ДАВЫДОВ Е.А. Диагностическое обследование поврежденного регенератора установки каталитического крекинга с целью определения необходимых ремонтно-восстановительных работ для безопасной эксплуатации..... 45

БОРЯК К.Ф., АФТАНЮК О.В. Увеличение межремонтного пробега железнодорожных колесных пар за счет их динамической балансировки 50

КРЫЛОВ Э.С., КУЛИШ В.А., ЛИТВИНЕНКО Л.Е. Обеспечение работоспособности и безопасности эксплуатации объектов технологических комплексов угольных предприятий 53

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Отчетная конференция по программе «РЕСУРС» 59

Календарь выставок и конференций по НК в 2016 г..... 62

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 of NASU, International Association «Welding» (Publisher)

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
B. E. PATON

O. I. Boichuk, E. F. Garf, E. A. Davydov,
A. T. Zelnichenko, L. M. Lobanov,
Z. A. Maidan (Executive Secretary)

A. Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),
Yu. N. Posypaiko,

V. A. Troitskii (Deputy Editor-in-Chief),

E. V. Shapovalov
 PWI of the NASU, Kiev, Ukraine

V. A. Stryzhalo

Institute for Problems of Strength, Kiev, Ukraine

N. P. Aleshin

N.E.Bauman MSTU, Moscow, RF

V. L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus

L. M. Kazakevich

Institute of Physical-Chemistry, Kiev, Ukraine

O. M. Karpash

Ivano-Frankovsk National Technical Institute of Oil and Gas, Ukraine

V. V. Kluev

CJOSC NIIIB MNPO «Spektr», Moscow, RF

Z. T. Nazarchuk, V. N. Uchanin

Physico-Mechanical Institute, Lvov, Ukraine

N. V. Novikov

Institute for Superhard Materials, Kiev, Ukraine

G. I. Prokopenko

Institute of Metal Physics, Kiev, Ukraine

V. A. Storozhenko

Kharkov National University of Radioelectronics, Ukraine

S. F. Fomichev

KPI National Technical University of Ukraine, Kiev

M. G. Chausov

National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, Kiev

V. E. Sherbinin

IMF UrD RAS, Ekaterinburg, RF

Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
 11, Kazimir Malevich str., 03680, Kyiv, Ukraine
 Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-23-90
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
 www.patonpublishinghouse.com

Scientific editors

E. A. Davydov, L. F. Kharchenko

Editors

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda, T. V. Ushtina

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

«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

Interview with V.A.Troitskii, President of Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics 3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

TROITSKII V.A., KARMANOV M.N., GORBIK V.M., LUKASHEV N.V. Low-frequency ultrasonic testing of process piping by guided waves 7

NEDOSEKA A. YA., NEDOSEKA S.A. Crack initiation on inner surface of pipelines at high temperatures. Information 3. Temperature and stresses in pipe wall at cooling..... 13

MASALOV S.O., POCHANIN G.P., RUBAN V.P., KHOLOD P.V. Radar monitoring of technical condition of subsurface part of engineering facilities 17

VELIKOIVANENKO E.A., MILENIN A.S., ROZYNKA G.F., PIVTORAK N.I. Numerical prediction of effectiveness of reinforcement of defective pipelines by composite material bands 24

SHULZHENKO M.G., EFREMOV Yu.G., TSIBULKO V.J., DEPARMA O.V. Development of mobile multifunctional measuring-diagnostic complex for non-destructive testing and evaluation of technical condition of energy and transport units in long-term operation..... 32

STASHCHUK M.G., IVANITSKII Ya.L., DOROSH M.I. Evaluation of strength and fatigue life of tubular structures 38

INDUSTRIAL

POZDNYAKOV V.D., DYADIN V.P., DAVYDOV E.A. Diagnostic examination of damaged regenerator of catalytic cracking unit, in order to determine the repair-reconditioning operations required for operating safety 45

BORYAK K.F., AFTANYUK O.V. Extension of interrepair run of railway wheel pairs due to their dynamic balancing..... 50

KRYLOV E.S., KULISH V.A., LITVINENKO L.E. Ensuring serviceability and safe operation of coal processing facility equipment 53

NEWS AND INFORMATION

Reporting Conference on «Resource» Program..... 59

Schedule of NDT exhibitions and conferences in 2016 62

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Technical Committee on standartization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic

Интервью с президентом Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики В.А. Троицким

Владимир Александрович Троицкий — доктор технических наук, заведующий отделом неразрушающих методов контроля качества сварных соединений ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, профессор, лауреат Премии СМ СССР, Государственной премии Украины, член многих обществ НКТД зарубежных стран, академик Международной академии НК, член ряда научных советов. Автор около 700 научных работ. Подготовил 12 кандидатов наук.

К 80-летию со дня рождения В.А. Троицкого редакция журнала взяла у юбиляра интервью.



Владимир Александрович, расскажите, пожалуйста, о профессии, которой Вы посвятили свою жизнь.

Я занимаюсь физическими методами контроля качества с 1976 г., т.е. ровно 40 лет. Но это только половина моей жизни, ведь мне исполнилось 80. Оценка качества без разрушения объекта, который вас интересует, не повреждая его целостности, — это искусство, подобное тому, как врач, не проводя операции, только на основании результатов диагностических исследований может указать на тромб в вене, каверну в легких или смещение позвонков у человека. Применяя физические методы диагностирования с использованием очень небольших энергий, можно визуализировать внутренние органы человека, состояние сосудов головного мозга и их зашлакованность. Я специально использую знакомую всем медицинскую терминологию, касающуюся тела человека. Это понятнее, чем термины «нераскрытые трещины», «несплавления», «непровары», «мелкие поры», «слипания», «зернистость», «межкристаллитная коррозия» и тому подобные несовершенства в сварных соединениях, металлопрокате, отливках и прочих продуктах промышленного производства, объектах производства. Мы сотрудничаем с медицинскими учреждениями, и, также как медики что-то заимствуют у нас, мы заимствуем у них. Разница состоит в том, что диагностика твердого тела, кристаллической структуры требует более высокой чувствительности и точности. Чтобы находить трещины с раскрытием менее 0,1 мм, нужны приборы с высоким разрешением, т.е. необходимо различать до 10...15 пар линий в пределах одного миллиметра. Сейчас мы уже можем различать до 20 пар линий на 1 мм, ширина которых составляет менее 30 микрон (0,03 мм). Естественно, в живых тканях фиксировать такие отклонения от нормы нет необходимости, а в сварных соединениях — обязательно. В швах есть такие нарушения, как матовые и черные пятна, слипания и др., т.е. зоны, которые имеют другое зерно. Они не имеют объема, но это дефекты, которые могут превратиться в трещины через некоторое время. Мы располагаем технологиями, которые могут выявлять такие отклонения от нормы. Другое дело — кому это надо? Обычно заказчику это надо, а сварщику — нет. Первый нас просит все проверять хорошо, никакие дефекты его не устраивают. А производители металлоконструкций, сооружений на этот счет имеют другое мнение. Ответственность обычно делят на троих — заказчик, дефектоскопист, изготовитель.

Какие этапы научного «взросления» Вы прошли?

Это трудно перечислить. Первое мое авторское свидетельство я получил в 1956 г., когда был на третьем курсе. Закончил я Московский институт инженеров железнодорожного транспорта, имея 5 авторских свидетельств и 4 научных статьи. Все они касались различных тем в направлении электротехники. Но всерьез я заинтересовался одной темой — применением магнитодиэлектриков в низкочастотной технике для увеличения удельной мощности и совершенствования технологии изготовления электрических машин. Через три года после окончания электротехнического факультета я на эту тему защитил кандидатскую дис-



Низкочастотный дальнедействующий УЗК без сканирования поверхности протяженного (до 500 м) объекта

ученых и специалистов, включая Б.Е. Патона, А.Е. Асниса, С.Л. Мандельберга и других не допускали совмещения мной двух профессий. Приходилось сложно. Бросать десятилетние заделы было нельзя, поэтому сварочной электродинамикой (переходные процессы, резонансные явления, особые формы кривых тока и напряжений, управления и т.п.) я перестал заниматься в 1980-х годах. Должен отметить, что с тех пор прошло более 30 лет, но многие из моих электротехнических работ актуальны и до сих пор. Однако дефектоскопия — это необъятное поле деятельности. В области НК за 40 лет было получено много различных технических решений в сфере диагностики ответственных промышленных объектов. Я, в конечном счете, состоялся как специалист именно в этой области, знаю практически всех ведущих дефектоскопистов планеты, имею публикации в ведущих журналах мира. На Ваш вопрос отвечаю: нет, я не жалею, что выбрал это направление.

Владимир Александрович, назовите Ваши наиболее важные достижения в дефектоскопии.

Дефектоскопическая техника, как и все в этом мире, изменчива. Проходит время, уходят в прошлое технические решения, идеи, люди. Поэтому вечными являются только фундаментальные, неподвластные времени идеи, решения. Действительно, за 40 лет деятельности в направлении дефектоскопии удалось кое-что сделать. Я перешел на это направление в са-

сертацию. Я жил в городе, в котором не было машиностроительных заводов, но были предприятия по ремонту сварочной техники. Так я познакомился с задачами создания сварочных источников тока, которые должны обеспечить плавное регулирование режимов. Сварщик должен иметь возможность изменять ток в четырехкратном размере, допустим от 50 до 200 А. Для этого конструкция сварочных трансформаторов предусматривает перемещение обмоток или задвигание между ними шунтов. И это обстоятельство определяет их габариты. Я сделал сварочный трансформатор тех же габаритов, но с удвоенным диапазоном плавного регулирования. Были у меня и другие работы, на которые обратил внимание чл.-корр. АН УССР В.К. Лебедев, начальник электротехнического отдела Института электро-сварки им. Е.О. Патона. Он и пригласил меня работать в Киев в отдел, которым до него руководил Б.Е. Патон. Коллектив отдела был очень профессиональным и в этой научной среде я работал над решением различных вопросов сварочной электродинамики.

В 1973 г. я защитил докторскую диссертацию. Таким образом, дефектоскопия — это мое уже третье научное направление. Первое — электротехническое материаловедение, второе — сварочная электродинамика и источники питания, разные, не только сварочные.

Не жалеете, что сегодня Вы всецело посвятили себя проблемам дефектоскопии?

Первые пять-шесть лет действительно было очень сложно. Громадный задел электротехнических работ, разработок по источникам тока нельзя было сразу бросить. Многие заводы производили или начинали производство источников питания в разных городах страны. Вместе с тем проблемы стройки века — гордости черной металлургии Харцызского трубного завода, а также советы крупных

мый ответственный момент завершения строительства ХТЗ и начала производства труб большого диаметра для газопроводов высокого давления. Все эти 40 лет наш коллектив совершенствует технологию, оборудование и сложную систему многократного НК с применением разных физических методов при производстве труб. Из нашего конструкторско- частного фирме по автоматизированному ультразвуковому контролю, которую возглавляет сейчас бывший наш сотрудник В.Л. Найда. Основная программа контроля изготавливаемых труб для магистральных газопроводов проводится на наших установках НК-205, созданных нами задолго до появления этой частной фирмы. Функциональные возможности НК-205 мы постоянно совершенствуем, как и другие средства НК, используемые в этом производстве и основанные на радиационном излучении, а также ручные, магнитные, визуально-измерительные средства. Служба НК ЦЗЛ этого завода насчитывает десятки специалистов, которые регулярно проходят аттестацию и сертификацию в нашем отделе. Разработанная нами и постоянно совершенствуемая система НК обеспечивает высокую надежность магистральных газопроводов. Пока не было разрушений продольных заводских швов, которые мы проверяли. Все аварии на магистральных газопроводах инициируются кольцевыми, монтажными швами. Наша система НК сейчас воспроизводится на трубопрокатных заводах России, Болгарии и других стран. В этом есть огромная заслуга Бориса Евгеньевича Патона, под руководством которого мы развиваем это направление.

Сорок лет назад в СССР не было профессии «инженер-дефектоскопист». Все наши разработки по радиационным, магнитным, акустическим и другим методам контроля подпадали под сферу деятельности Отделения физики и астрономии АН СССР. Чл.-корр. М.М. Михеев, директор Института физики металлов УрО РАН, организовал в 1965 г. выпуск журнала «Дефектоскопия», который до сих пор является основным академическим изданием России по этой тематике. Приборы для дефектоскопии разрабатывали и выпускали НИИ и заводы Минприбора, которых, к сожалению, на территории Украины не было. Так было до тех пор, пока наведением порядка не занялся Борис Евгеньевич Патон.

Опуская подробности, могу сообщить, что тема ТДНК в стране стала государственной. Несколько кафедр технических университетов сейчас ведут подготовку будущих дефектоскопистов, введены различного рода специализации на машиностроительных, металлургических, сварочных кафедрах. В этом направлении была проделана колоссальная организационная работа.

Бесспорной заслугой возглавляемого мной коллектива является создание Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УОНКТД) по европейским стандартам, которые мы освоили в процессе деловых контактов с аналогичными европейскими обществами. УОНКТД, являясь одним из фундаторов Европейской федерации EFNDT и Всемирного конгресса ICNDT принимает участие во всех мероприятиях, которые проводят эти международные организации. УОНКТД самостоятельно издает бюллетень «НК-Информ»,

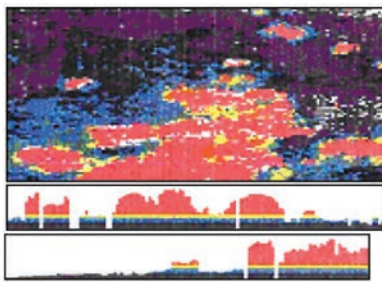


Устройства для разнонаправленного подвижного локального намагничивания металлоконструкций при поиске в них трещин

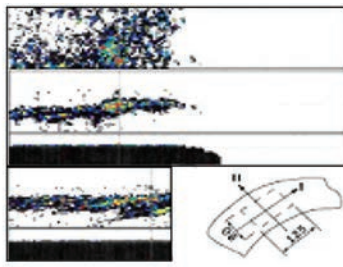
Флэш-радиография без промежуточных носителей информации



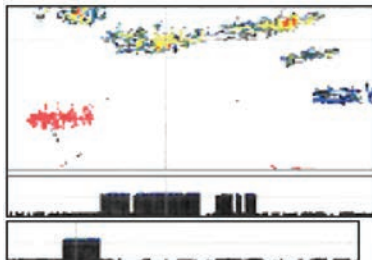
Флэш-радиография без промежуточных носителей информации



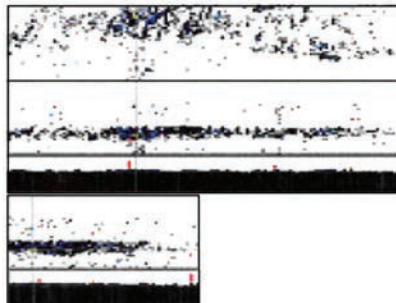
Остаточная толщина металла сосуда с внутренним коррозионным поражением



Распределение сигналов при наличии коррозионного поражения внутри металла (гиба паропровода)



Вид сверху, сбоку и с торца для металла с расслоениями



Распределение УЗ-сигналов питтинговой коррозии внутри металла, каждый отдельный дефект допустим, а металлоконструкция снята с эксплуатации

Визуализация несплошности, обратной (недоступной) стороны объекта и расслоения металла

ТК-135 — всемирной организации по стандартизации ISO. Украина, после долгих мытарств среди ГОСТов, DIN, EN и других систем стандартизации, остановилась на ISO. В 2014 г. к нам приезжал председатель ТК-135, профессор Н. Hatana, с которым у нас сложились хорошие деловые отношения. По его просьбе мною было опубликовано в японском журнале JSNI две статьи об УОНКТД и о новом направлении магнитной дефектоскопии.

Вы перечислили важные организационные моменты, направленные на развитие Вашей профессии в Украине. А какие научные идеи и технические решения по дефектоскопии занимают Вас в настоящее время?

Основные мои идеи и технические решения изложены примерно в 700-х опубликованных работах, среди которых 153 патента и авторских свидетельства. Я не могу объективно оценить, какая часть этих публикаций наиболее ценная. Могу отметить, во что я сейчас верю, над чем работаю. Это, пожалуй, четыре научных направления:

- низкочастотный дальнедействующий УЗК без сканирования поверхности протяженного (до 500 м) объекта;
- разнонаправленное подвижное локальное намагничивание металлоконструкций при поиске в них трещин;
- радиография без промежуточных носителей информации (пленок, п/п пластин) с чувствительностью и производительностью на порядок выше, чем было до сих пор;
- цифровые методы обработки УЗ-информации — визуализация толщинометрии, рельефа обратной (недоступной) для контроля стороны металлоконструкции.

Можете мне поверить, что последние годы своей жизни я не буду тратить на второстепенные вопросы. Каждое из этих четырех направлений является фундаментальным. Это плохо понимают в сварочном сообществе, где мне приходится работать, но очень ценят эти идеи в мире НК. Достаточно сказать, что на эти темы я публикую работы в профессиональных журналах США, Англии, Японии. В этих странах самый высокий уровень НК и высокие требования в нашей профессии.

Благодарим Вас, Владимир Александрович, за интересное и обстоятельное освещение проблем и желаем Вам крепкого здоровья и новых достижений на благо Украины.

распространяемый бесплатно среди членов УОНКТД (это издание очень популярно среди специалистов по НК), а также поддерживает издание журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Не последнюю роль я сыграл в создании международной Академии наук NDT со штаб-квартирой в г. Брешиа (Италия). Членами этой академии являются выдающиеся ученые, среди которых четыре лауреата Нобелевской премии, четыре академика НАН Украины во главе с Б.Е. Патеном. Сессии, пленарные заседания IANDT проходят параллельно с мероприятиями, проводимыми EFNDT и ICNDT.

Также я активно работаю в

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ НАПРАВЛЕННЫМИ ВОЛНАМИ

В.А. ТРОИЦКИЙ, М.Н. КАРМАНОВ, В.М. ГОРБИК, Н.В. ЛУКАШЕВ

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

Низкочастотный ультразвуковой контроль направленными волнами – это новый метод неразрушающего контроля, который обычно используется для высокоскоростного испытания отдельных участков труб. Приведен анализ некоторых особенностей практического применения низкочастотной ультразвуковой дефектоскопии трубопроводов. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 14.

Ключевые слова: низкочастотная ультразвуковая дефектоскопия, направленные волны, коррозия

Многие технологические трубопроводы в Украине эксплуатируются 40 и более лет. Они должны периодически диагностироваться с использованием различных методов неразрушающего контроля (НК). Обычно для выявления коррозионных поражений трубопроводов используют традиционные методы диагностики, связанные со снятием изоляции, что резко повышает трудоемкость и стоимость контроля [1, 2]. При этом многие участки трубопроводов, поднятые высоко над землей, погруженные в воду, расположенные под авто- и железнодорожными переходами недоступны для НК. Выборочный контроль в этом случае не гарантирует полного выявления поврежденных участков трубопровода. Невыявленные коррозионные поражения, возникающие в процессе эксплуатации технологических объектов повышенной опасности с огромным количеством технологических трубопроводов, конструктивных элементов и т.п., могут стать причиной утечек, пожаров, техногенных катастроф.

В последние годы развились методы оценки общего технического состояния технологических трубопроводов за счет разработки технологии интегральной их дефектоскопии с использованием дальнедействующего низкочастотного ультразвукового контроля (НЧ УЗК) направленными волнами. Это обеспечило возможность проводить 100%-ный контроль состояния внутренней и внешней поверхности трубопроводов на больших расстояниях без сканирования их поверхности [3–5]. В основу этого метода положен принцип анализа отраженных низкочастотных направленных волн, способных распространяться на большие расстояния. Это позволяет обнаруживать коррозионные поражения, глубина которых составляет не менее 10 % толщины стенки трубы на расстоянии до 100 м и более без перестановки блока преобразовате-

лей (антенны). При этом доступ к трубе необходим только в месте установки акустической антенны (кольца низкочастотных УЗ преобразователей), в остальных местах трубопровода не требуется снятия изоляции. Обеспечивается возможность дистанционного изучения удаленных труднодоступных участков трубопроводов. Обследование может выполняться в процессе эксплуатации труб, заполненных водой или газом, а также при повышенных температурах.

Выявленные с помощью НЧ потенциально опасные и подозрительные участки далее оцениваются с использованием традиционных методов НК.

Метод НЧ УЗК основан на возбуждении в контролируемом протяженном трубопроводе низкочастотных УЗ колебаний из зоны установки акустического блока. Акустические антенны создаются на основе различных типов излучателей: пьезоэлектрических, магнитострикционных или электромагнитно-акустических преобразователей. Чаще всего для этих целей используются акустические антенны на основе пьезоэлектрических преобразователей, которые обеспечивают как возбуждение УЗ колебаний в трубопроводе, так и прием отраженных эхо-сигналов от различных видов отражателей трубопровода. Принцип возбуждения НЧ УЗК волн и их отражения от несплошностей и конца трубы приведен на рис. 1.

Для акустического портрета общего состояния трубопровода с помощью НЧ УЗК исполь-



Рис. 1. Распространение направленных акустических волн в трубе: 1, 2 – соответственно направленная и отраженная волна; 3 – дефект

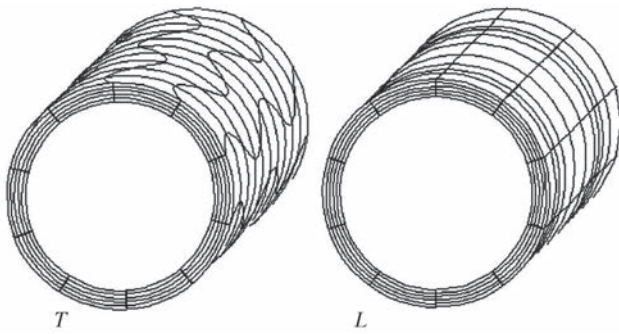


Рис. 2. Схематическое смещение структуры трубы при распространении крутильных (T) и продольных (L) волн

зуют в основном крутильные (T – *Torsional*) и продольные (L – *Longitudinal*) волны (рис. 2). Существенной особенностью этих волн является минимальная дисперсия их групповых скоростей в используемых диапазонах частот.

Визуально распространение крутильных направленных волн (T) можно представить в виде кольцевой волны, которая проходит вдоль трубы по всему сечению и взаимодействует с поперечным сечением трубы в каждой точке. Крутильные волны с модой нулевого порядка $T(0,1)$ характеризуются равенством фазовой и групповой скоростей и не обладают дисперсностью. Отсутствие дисперсии и низкая скорость (3250 м/с) крутильной волны позволяют уменьшить мертвую зону и улучшить разрешающую способность. Для продольных направленных волн (L) приемлемой модой является быстро движущаяся нулевая продольная мода $L(0,2)$, скорость которой для стали равна 5900 м/с. Она не зависит от частот, если они выше 20 кГц.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины в процессе выполнения проекта Р2.5 «Розробка методики безканівної ультразвукової дефектоскопії та впровадження розробленої системи контролю на промислових об'єктах» («Ресурс») розроблені НЧ УЗК-комплекси «Універсал-1П» (рис. 3) и «Універсал-2П» (рис. 4) для определения состояния и коррозионного износа трубопроводов диаметром до 330 и 630 мм с рабочими резонансными частотами 36 и 16 кГц соответственно.

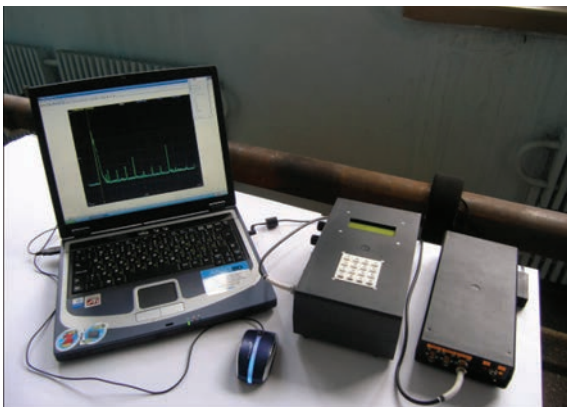


Рис. 3. Диагностический НЧ УЗК комплекс «Универсал-1П» (36 кГц) в процессе диагностирования трубы \varnothing 114 мм

Конструктивно комплексы состоят из следующих блоков:

- акустической антенны, представляющей собой кольцевой блок акустических преобразователей, расположенных равномерно по внешнему диаметру трубы с внешней стороны и прижимаемый к трубе;
- устройства возбуждения зондирующих импульсов, приема отраженных сигналов и программного управления режимами;
- персонального компьютера для регистрации, обработки и анализа полученной информации.

Акустическая антенна (рис. 5, 6) представляет собой кольцевой блок акустических пьезопреобразователей, расположенных равномерно по диаметру трубопровода с внешней стороны, и прижимателей к трубе.

Для проведения диагностирования необходим доступ к небольшому участку трубы без изоляции (до 0,5 м) для установки кольцевой антенны. Контроль проводится без использования контактной жидкости, может проводиться через краску и без зачистки поверхности. Акустический контакт является сухим и обеспечивается прижатием преобразователя к трубе ремнями или лентой с усилием порядка 20 кгс. В процессе исследований удалось создать совмещенные схемы антенн для приема и передачи акустических волн. Прием и передача разнесены во времени. Посылка и прием сигналов осуществляется одними пьезопреобразователями. Это позволило существенно упростить и удешевить конструкцию антенны.

Антенны состоят из двух рядов преобразователей, размещенных равномерно вокруг трубы с шагом d , равным или меньшим λ , и расстоянием между рядами по оси трубы $0,25 \lambda$, где λ – длина акустической волны. Сигналы на каждое из колец преобразователей подаются с задержкой на четверть периода акустических волны ($1/4 \lambda$). При этом в направлении ряда, сигнал которого задержан, сигналы оказываются синфазными и суммируются. В противоположном направлении сигналы оказываются в противофазе и вычитаются (ком-



Рис. 4. Диагностический НЧ УЗК комплекс «Универсал-2П» (16 кГц) на трубе газового сортамента

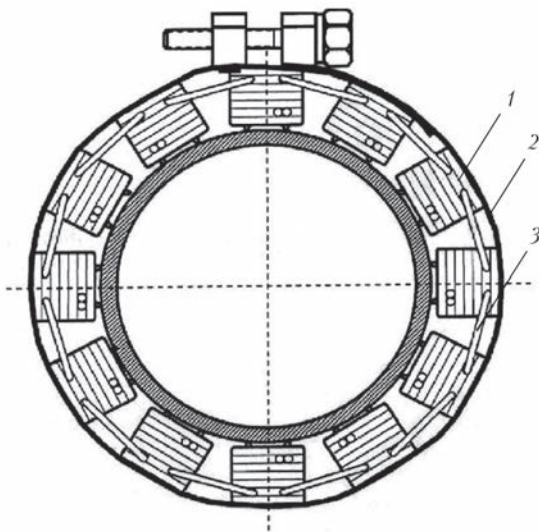


Рис. 5. Схема конструкции антенны: 1 – блок преобразователей; 2 – стягивающий хомут; 3 – скоба

пенсируются). Для изменения направления излучения акустических волн вдоль трубы устройства переключаются.

Для контроля труб диаметром до 330 мм используется акустическая антенна, состоящая из набора блоков преобразователей, масса каждого из которых 70 г. Антенна состоит из 4...24 блоков преобразователей в зависимости от диаметра трубопровода. При контроле труб диаметром до 630 мм разработаны более мощные пьезопреобразователи с массой каждого блока 850 г. Антенна состоит из трех автономных секции из 6, 12 и 14 блоков (всего 32).

Функциональная схема одноканальных комплексов НЧ УЗК «Универсал-1П» и «Универсал-2 П» с микропроцессорным управлением приведена на рис. 7.

Устройство по рис. 7 работает следующим образом. Генератор вырабатывает пачки зондирующих импульсов с частотой заполнения от 16 до 50 кГц с регулируемым количеством импульсов

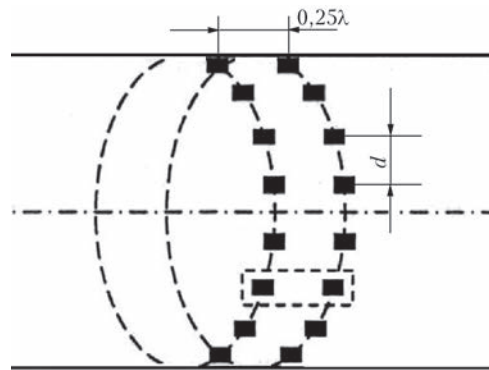


Рис. 6. Схема расположения пьезопреобразователей на трубе и параметры антенной решетки

в пачке от 1 до 10 и частотой посылки от 0,1 до 5 Гц, поступающих на пьезопреобразователи акустической антенны. Отраженные акустические импульсы возвращаются через антенну, предусилители, фильтры и в виде радиопульсов поступают в предусилители приемника. Усиленные и отфильтрованные сигналы поступают далее на детектор и преобразуются в видеоимпульсы, которые через цифровой осциллограф подаются на компьютер (ноутбук).

Для увеличения однонаправленности и повышения чувствительности контроля за счет повышения отношения сигнал/шум был разработан усовершенствованный двухканальный УЗК НЧ-6М (рис. 8) с узкополосной фильтрацией как зондирующих, так и принимаемых эхо-сигналов в каждом канале с автоматической системой сдвига фаз. Это позволило в несколько раз повысить отношение сигнал/шум при приеме относительно слабых сигналов, повысить направленность излучения и приема эхо-сигналов, уменьшить уровень помех.

Параллельно с разработкой аппаратуры проводятся исследования для развития данной технологии в направлении изучения возможности оценки старения металла на основе анализа его упругих характеристик и допустимости их дальнейшей

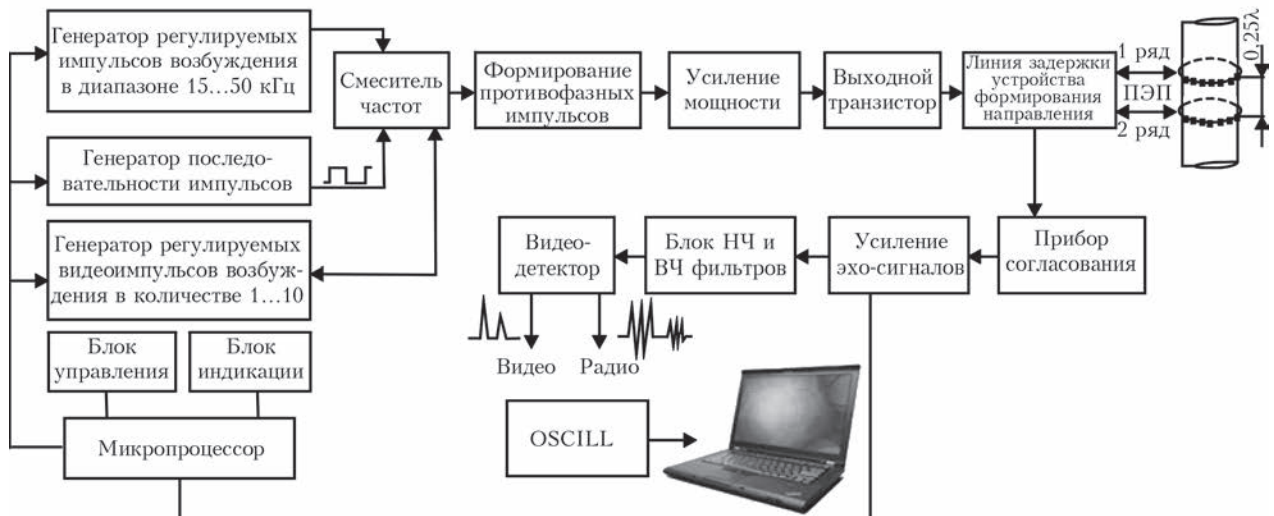


Рис. 7. Функциональная схема комплексов «Универсал-1П» и «Универсал-2П»



Рис. 8. Функциональная схема усовершенствованного НЧ УЗК-36М

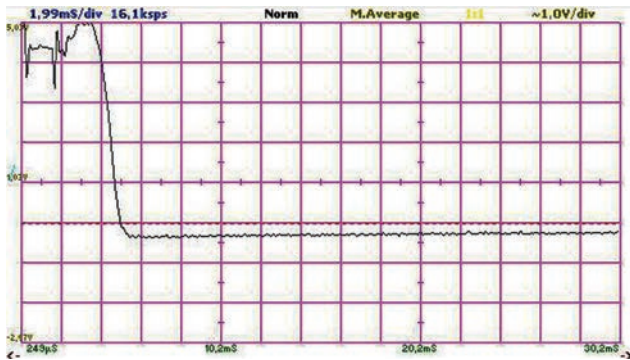


Рис. 9. Эхограмма поврежденного трубопровода длиной 5,2 м

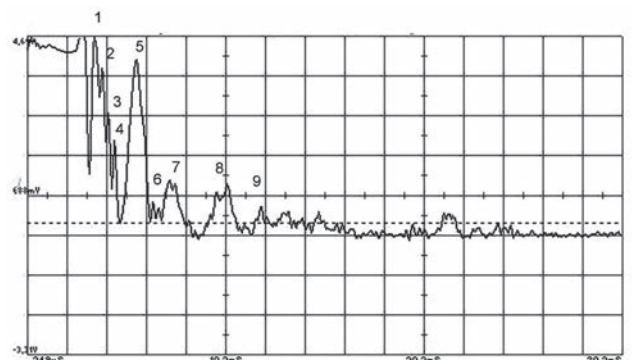


Рис. 11. Эхограмма аварийного участка трубопровода (обозн. см. в тексте)



Рис. 10. Демонтированный участок трубопровода

эксплуатации. Результаты данной работы уже нашли практическое применение при диагностировании состояния трубопроводов теплотрассы Института высокомолекулярных соединений НАН Украины в г. Киев в связи с порывами подводящих теплопроводов при гидравлических испытаниях. Контроль участков трубопровода теплотрассы проводили в камерах-колодцах № 1, 2, 3 и в шурфах 1 и 2 со снятием эхограмм и записью их в компьютер. После гидроиспытаний был определен участок утечки в подводящем теплопрово-



Рис. 12. Антенна в шурфе на врезанной трубе (60 см от шва врезки)

де диаметром 325 мм, эхограмма которого (рис. 9) показала полную потерю упругости металла.

После шурфования участка теплотрассы визуально было подтверждено наличие дефектного отрезка трубы длиной 5,2 м со сквозным отверстием



Рис. 13. Измерения выполнялись от края трубы (а) с учетом технологического разреза длиной 18 см (б)



Рис. 14. Дефектные участки трубопровода на расстоянии 90 см (а), 195 (б), 5,8 м (в) и сварной шов на расстоянии 256 см (г)

и сплошной коррозией. Демонтированный участок трубы (рис. 10) в результате коррозии имел утонения на 80...90 % толщины стенки трубы. После замены дефектного участка трубы и проведения повторных гидроиспытаний утечки появились на следующем участке трубопровода, примыкающего к сваренному отрезку новой трубы длиной 5,2 м, эхограмма которой приведена на рис. 11.

На эхограмме отражены распределения эхо-сигналов отражателей на трубопроводе, в частности: 1 – от сварного шва; 2 – от сквозного отверстия 40×30 мм; 3 – от отверстия 60×30 мм; 4 – от отверстия 40×40 мм; 5 – от сварного радиального шва; 6 – от коррозии; 7 – от отверстия 50×20 мм; 8 – от отверстия 40×40 мм; 9 и

далее – индикации акустических отражателей за пределами визуального контроля в шурфе.

Результаты снятой эхограммы сведены в таблицу, где указаны расстояния от антенны до отражателей в мс длительности развертки, расстояния в м, рассчитанные по формуле $L = vt/2$, где t – время прохождения отраженного эхо-сигнала на осциллограмме, мс; v – скорость распространения ультразвука для торсионных возбуждающих волн (3250 м/с) и результаты инструментальных измерений рулеткой.

После демонтажа дефектного участка трубопровода были проведены инструментальные измерения расстояний до дефектных участков со следующими уточнениями (рис. 12):

Результаты расшифровки эхограмм

Измеренное расстояние	Номер индикации эхо-сигнала									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
По эхограмме, мс	3,18	3,62	4,12	4,37	4,74	5,68	7,17	9,73	10,4	12,0
По эхограмме, м	5,08	5,79	6,59	6,99	7,58	9,09	11,47	15,57	16,64	19,2
Рулеткой, м	4,78	568	671	6,83	7,34	8,88	10,58	–	–	–

– антенна устанавливалась на расстоянии 60 см от сварного шва;

– учитывалась технологическая вырезка длиной 18 см (рис. 13).

В результате к указанным значениям измерений рулеткой добавлено ($5,2 - 0,6 = 4,6$ м) – расстояние от антенны до края дефектного участка трубы с учетом технологического разреза (18 см), всего 4,78 м.

На рис. 14 показаны дефекты демонтированного участка трубопровода.

Амплитуда отраженных эхо-импульсов дает информацию о глубине дефекта, ширина – о его площади или протяженности.

Выводы

Акустические сигналы на всех участках контролируемых трубопроводов распространялись на расстояние 20...30 м и затем затухали, что свидетельствует о большой потере упругости металла и высокой коррозионной пораженности.

Акустический сигнал демонтированного коррозионно-пораженного участка трубопровода имел однократный отклик и полностью затухает на длине 5,2 м, что подтверждает значительную потерю упругости стенок трубы.

Акустический сигнал новой трубы $L = 5,2$ м многократно отражается от ее края.

Трубопроводы с затуханием эхо-сигналов на расстоянии от 5 до 30 м требуют замены, поскольку их структура сильно изношена.

По сравнению с традиционными методами выявления коррозионных поражений предлагаемая технология контроля технологических трубопроводов позволяет сократить расходы на диагностику на 80 % [6] и при этом свести к минимуму снимаемую изоляцию.

Сплошная низкочастотная ультразвуковая диагностика обеспечивает 100%-ный контроль тела трубопроводов и сводит к минимуму возможность пропуска коррозионных поражений, снижает вероятность аварий.

Созданное оборудование позволяет обнаруживать коррозионно-эрозионные поражения и другие дефекты трубопроводов, находящихся в эксплуатации, на значительном расстоянии от места установки акустической многоэлементной антенны.

В настоящее время проводятся исследования для развития данной технологии в направлении оценки старения металла на основе анализа его упругих характеристик [7]. Предполагается разработать балльную систему оценки состояния объектов для определения условий и возможностей их дальнейшей эксплуатации.

1. *Троицкий В. А., Попов В. Ю.* Ультразвуковой контроль сварных соединений. – Киев: Феникс, 2010. – 220 с.
2. *Троицкий В. А., Радько В. П., Демидко В. Г.* Дефекты сварных соединений и средства их обнаружения. – Киев: Вища шк., 1983. – С. 144.
3. *Троицкий В. А., Карманов М. Н., Горбик В. М.* Опыт применения ультразвукового контроля для мониторинга состояния технических трубопроводов // Территория NDT. – 2015. – № 1. – С. 44–46.
4. *Works on Low-frequency ultrasonic testing of pipelines of the E.O. Paton Electric Welding Institute / V.A. Troitskiy, B.E. Paton V.M., Gorbik, S.A. Shvidkiy // The 2nd South-East European IAW International Congress, Sofia, Bulgaria, pct. 2010.*
5. *ASTM E2775-11. Standard Practice for Guided Wave Testing of Above Ground Steel Pipework Using Piezoelectric Effect Transduction.*
6. *Amerapex Guided Wave System. Heater and Boiler Tube Inspections сайт: amerapex.com/heater-boiler-tube-inspections/*
7. *Распространение нормальных волн в трубах, дисперсионные характеристики нормальных волн / Г.А. Комиссарова, В.П. Радько, В.А. Троицкий, Е.А. Давыдов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2008. – № 3. – С. 14–20.*

Low-frequency ultrasonic testing by guided waves is an NDT technique usually applied for high-speed testing of individual pipe sections. Analysis of some features of practical application of low-frequency ultrasonic flaw detection of pipelines is given. 6 References, 1 Table, 14 Figures.

Keywords: low-frequency ultrasonic flaw detection, guided waves, corrosion.

*Поступила в редакцию
12.11.2015*

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТРЕЩИН НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Сообщение 3. Температура и напряжения в стенке трубы при охлаждении*

А.Я. НЕДОСЕКА, С.А. НЕДОСЕКА

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

В Сообщении 3 подведен итог анализа тепловых полей и температурных напряжений, возникающих и перераспределяющихся на трех стадиях эксплуатации трубопроводов, работающих при высоких температурах – стадии пуска, стадии стационарного режима эксплуатации и на стадии остывания при прекращении эксплуатации. Установленные особенности теплового воздействия на материал стенки труб показывают причины появления трещин на их внутренней поверхности. Показано влияние теплоотвода на характер распределения и значение температуры в стационарном состоянии трубы при эксплуатации. Установлено, что нарушение режима теплоотвода приводит к необходимости увеличения тепловложения для компенсации отводимого тепла и ведет к росту температурных напряжений. Библиогр. 6, рис. 5.

Ключевые слова: температура, температурные напряжения, длительная прочность

Представленный ниже материал является заключительной стадией исследований влияния температурного поля, возникающего и изменяющегося в трубах при пуске, эксплуатации в стационарном режиме и прерывании его эксплуатации. Рассматривая этап остановки эксплуатации трубопровода и его охлаждения, получим аналитическое выражение, описывающее этот процесс (рис. 1). Так, проинтегрировав выражение (1) из работы [1], получим формулу для расчета температурного поля в этом случае:

$$\theta = \frac{q_a}{\pi\lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left\{ \exp\left[-\alpha_n^2 a_k (t-t_0)\right] - \exp\left(-\alpha_n^2 a_k t\right) \right\}}{\left(\alpha_n^2 + h^2\right)} \dots \frac{J_0\left(\alpha_n a\right) J_0\left(\alpha_n r\right)}{b^2 J_0^2\left(\alpha_n b\right)}, \quad (1)$$

где θ – температура в трубе, °С; q_a – поток тепла, передающегося внутренней стенке трубы движущимся паром, кал/с·см; a_k – коэффициент температуропроводности, см²/с; a и b – внутренний и наружный радиусы трубы, см; h – коэффициент теплоотдачи, см⁻¹; t_0 – время эксплуатации трубопровода в нагретом состоянии, с; t – текущее время, с; r – координата в направлении радиуса трубы, см; α_n – корни характеристического уравнения [2, 3]:

$$\alpha_n J_1(\alpha_n b) + h J_0(\alpha_n b) = 0,$$

где J_0 и J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка.

Следует отметить, что приведенная формула описывает квазистатическую часть температурного поля. При текущем времени $t = t_0$ формула позволяет рассчитать нагревающую часть поля в стационарном режиме, а при $t > t_0$ описывает процесс охлаждения трубы.

На рис. 2 показано изменение температуры в трубе диаметром 630 мм и толщиной стенки 25 мм от начала нагрева с выходом в стационарное состояние и охлаждение после рабочего режима в течение 30 ч, а также квазиста-

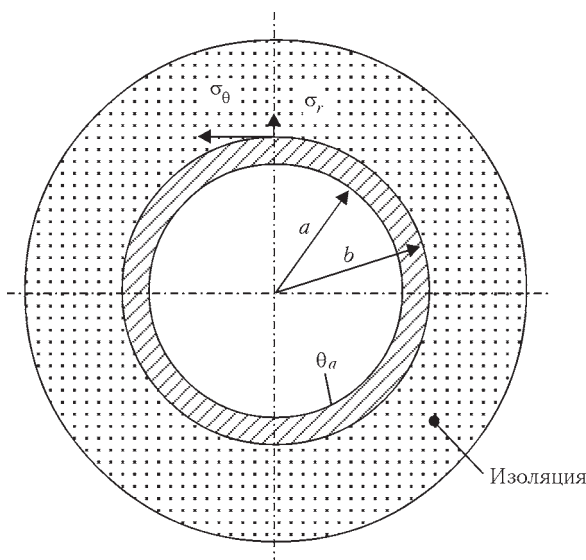


Рис. 1. Схематическое изображение трубы паропровода в изоляционном пакете

*Сообщения 1, 2 см. в журналах «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». – 2015. – №№ 3, 4.

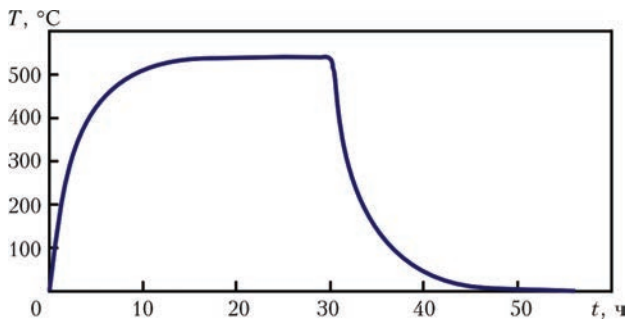


Рис. 2. Насыщение теплом трубы в процессе проведения пусковых работ. Квасистатическая составляющая. Расчет приведен для внутренней стенки трубы, $a = 29$ см; в момент $t_0 = 30$ ч прекращена подача тепла

тическая составляющая температурного поля. Расчеты были выполнены при следующих исходных данных: $q_a = 145$ кал/см·с; $h = 0,0161$ см⁻¹; $a = 29$ см; $b = 31,5$ см; $t_0 = 30$ ч; $\lambda_0 = 0,05$ кал/см·с °С; $a_k = 0,04$ см²/с.

График изменения температурного поля в трубе при нагреве показывает достаточно плавное и

медленное повышение температуры. В момент прекращения подачи тепла ($t_0 = 30$ ч) температура также достаточно плавно и медленно уменьшается до полного остывания примерно через 55 ч.

Напряженное состояние материала трубы для рассмотренного случая будет описываться формулами (2) из сообщений [1, 4], где величина γ_n в соответствии с формулой (1) настоящей публикации имеет вид:

$$\gamma_n = \frac{q_a}{\pi \lambda_0} \frac{\left\{ \exp\left[-\alpha_n^2 a_k (t - t_0)\right] - \exp\left(-\alpha_n^2 a_k t\right) \right\}}{\left(\alpha_n^2 + h^2\right) b^2} \dots \frac{J_0\left(\alpha_n a\right)}{J_0^2\left(\alpha_n b\right)} \quad (2)$$

Тогда

$$\sigma_\theta = \alpha_T E \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \left\{ -J_0\left(\alpha_n r\right) + \frac{J_1\left(\alpha_n r\right)}{\alpha_n r} + \frac{J_1\left(\alpha_n a\right)}{\alpha_n a} - \right.$$

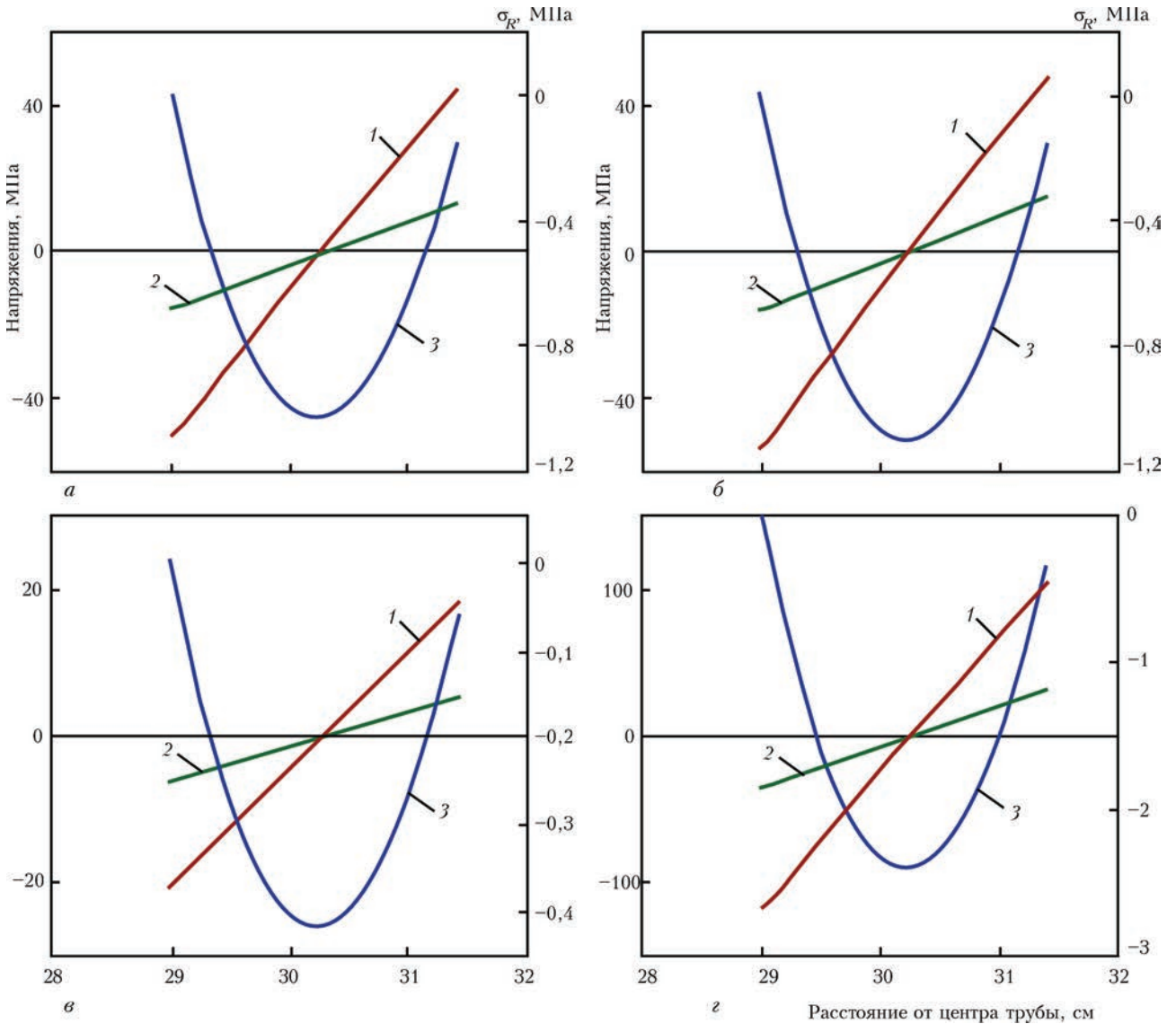


Рис. 3. Температурные напряжения в стенке трубы при остывании с различными условиями тепловода. Расчет в момент начала остывания (а, б, в) и спустя 5 ч после остановки трубопровода (г); а, в - $q_a = 145$ кал/см·с; $h = 0,0161$ см⁻¹; в - $q_a = 155$ кал/см·с; $h = 0,03$ см⁻¹; г - $q_a = 320$ кал/см·с; $h = 0,07$ см⁻¹ (1 - σ_0 ; 2 - σ_2 ; 3 - σ_R)

$$\sigma_r = \alpha_T E \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \left\{ -\frac{J_1(\alpha_n r)}{\alpha_n r} + \frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \left[\frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{J_1(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \right\} - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \left[\frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{J_1(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \quad (3)$$

$$\alpha_n J_1(\alpha_n b) + h J_0(\alpha_n b) = 0,$$

где $h = -\alpha_T / \lambda_0$; знак «-» учтен в формуле приведенного спектрального уравнения (далее используется абсолютная величина); α_T – коэффициент линейного расширения стали 15X1M1Ф, 1/°C, равный $12,5 \cdot 10^{-6}$ 1/см; E – модуль упругости стали МПа, равный $2 \cdot 10^5$ МПа.

На рис. 3 представлены графики распределения температурных напряжений в трубе, построенные в начале остывания (на границе стационарного состояния), и для случая снизившейся температуры (рис. 3, а, в). Начало отсчета по времени $t \geq t_0 = 30$ ч или 108000 с. Анализируя температурные напряжения в трубах в процессе охлаждения наблюдаем их уменьшение с течением времени. Это хорошо иллюстрируют графики на рис. 3. На рис. 3 б, г показано напряженное состояние трубы в процессе установившегося режима эксплуатации при повышенных значениях теплоотвода. Так, значение коэффициента теплоотвода для рассматриваемого случая принято равным $h = 0,03$ и $0,07 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3, б и г соответственно). Как видим, напряжения в стенке трубы увеличиваются с

ростом интенсивности теплоотвода. Особенно наглядно эта тенденция просматривается при значении коэффициента теплоотвода, равном $0,07 \text{ см}^{-1}$. В этом случае температурные напряжения существенно выросли до значения -110 МПа в отличие от нормального состояния, где они равны -50 МПа. На рис. 3 представлена также третья составляющая температурных напряжений σ_z . Эти напряжения получены при условии плоской деформации трубы вдоль оси z .

Напряжения от внутреннего давления складываются с температурными, а их результирующая показана на рис. 4. Суммарные напряжения при установившемся режиме и лучшей теплоизоляции находятся в пределах, представленных на графике. Следует учесть, что предел длительной прочности для стали 15X1M1Ф, наработавшей 200 тыс. ч, составляет 95 МПа [5, 6], и повышение внутреннего давления может привести к исчерпанию несущих свойств этой стали. График на рис. 4 построен для внутреннего давления в трубе 22 ат, что эквивалентно средним растягивающим напряжениям 28 МПа на наружной поверхности трубы диаметром 630 мм. Если изоляция трубы выполнена надежно (рис. 5) и коэффициент теплоотвода не превышает $h = 0,003 \text{ см}^{-1}$, то температурные напряжения на наружной кромке трубы не будут превосходить 5 МПа, что в сумме с напряжениями от внутреннего давления будет давать величину не более 30 МПа. Эта величина меньше длительной прочности материала после 200 тыс. ч наработки. Следует также отметить, что в этом случае потребуется всего 29 кал/с см для поддержания эксплуатационной способности трубопровода. Уменьшение коэффициента теплоотвода h ниже $0,003 \text{ см}^{-1}$ снижает разницу температур между внутренней и наружной стенками трубы. В этом случае температурные напряжения в трубе будут практически равны нулю (последние формулы для температурных напряжений в Сообщении 2) [4].

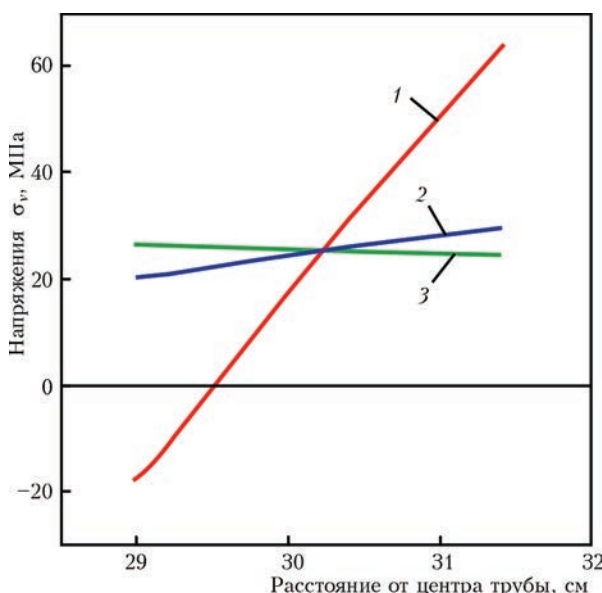


Рис. 4. Суммарные окружные напряжения от внутреннего давления (22 ат) и температурные при $h = 0,0161$ (1) и $0,003 \text{ см}^{-1}$ (2). На графике также представлены напряжения от внутреннего давления $P = 2,2$ Па (3)



Рис. 5. Восстановление теплоизоляции после установки волновода с датчиком акустической эмиссии

Выводы

Наиболее опасным для состояния труб, работающих при высоких температурах, является их нагрев при пуске в эксплуатацию. В этом случае динамическая составляющая температурного поля имеет высокий градиент, приводящий к образованию больших сжимающих напряжений, превосходящих предел текучести материала трубы в узкой зоне в данный момент времени. Последнее приводит к появлению остаточных растягивающих напряжений и возможному образованию продольных трещин на внутренней поверхности трубы.

Следующим по опасности состоянием трубопроводов является ухудшение свойств теплоизоляции, что приводит к повышению напряжений в трубе, а также требует повышения тепловложения для обеспечения штатного режима эксплуатации трубопровода. Необходимо тщательно следить за состоянием теплоизоляции труб во избежание роста температурных напряжений из-за перепада температуры на внутренней и наружной поверхностях трубы. (Следует обратить особое внимание на ремонт теплоизоляции. Свойства установленной изоляции не должны отличаться от таковых основной). Необходимо иметь в виду, что предел длительной прочности материала труб с течением времени уменьшается. Так, для стали 15Х1М1Ф после 200 тыс. ч эксплуатации он равен 95 МПа, а для стали 12Х1МФ равен 82 МПа [5]. Поскольку напряжения от внутреннего давления складываются с температурными, то при существенном нарушении теплоизоляции их сумма на наружной поверхности трубы может достигнуть предела длительной

прочности материала на данный момент времени и даже превзойти его.

Растягивающие напряжения, возникшие на внутренней поверхности трубы при воздействии высокоградиентного температурного поля в начальный момент времени, с образованием трещин частично уменьшаются.

Прекращение нагрева трубы, связанное с технологической остановкой эксплуатации трубопровода, при высоком качестве изоляции практически не влияет на несущую способность труб.

Каждый последующий пуск трубопровода в эксплуатацию ухудшает его несущую способность за счет повторного возникновения описанных в данной работе динамических процессов при нагреве и выходе на стационарный режим работы.

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. О трещинах, возникающих на внутренней поверхности трубопроводов, работающих при высокой температуре. Сообщение 1. Тепловые нагрузки на стенки труб при пуске и эксплуатации // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 3. – С. 11–14.
2. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
3. Грантер К.Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.
4. Недосека А.Я., Недосека С.А. О трещинах, возникающих на внутренней поверхности трубопроводов, работающих при высокой температуре. Сообщение 2. Напряжения в стенке трубы // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 4. – С. 14–17.
5. ТУ 14–3–460: 2009/ТУ 27.2–05757883–207: 2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.
6. О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 3. – С. 7–14.

Information 3 summarizes analysis of thermal fields and temperature stresses, developing and being redistributed in three stages of operation of pipelines exposed to high temperatures: commissioning stage, steady operation mode stage, and cooling stage at interruption of operation. Established features of thermal impact on pipe wall material reveal the causes for crack development on their inner surface. Influence of heat removal on the nature of temperature distribution and its values in the pipe steady state in operation is shown. It is found that violation of heat removal mode makes it necessary to increase the heat input to compensate for the removed heat and leads to increase of temperature stresses. 6 References, 5 Figures.

Keywords: temperature, temperature stresses, long-term strength

Поступила в редакцию
08.12.2015

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

III Международная научно-практическая конференция
19–21 апреля 2016 г., Андижан, Узбекистан

Андижанский машиностроительный институт совместно с Туринским политехническим университетом в г. Ташкенте и ЗАО «Дженерал Моторс - Узбекистан» проводят Международную научно-практическую конференцию «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении».

Тематика конференции: современное инженерное образование: проблемы и перспективы развития ♦ современное машиностроение ♦ энергообеспечение и энергосбережение в промышленности ♦ современные методы организации и управления производством.

Оргкомитет:

Тел.: (+99874) 223-43-67, 223-43-78

E-mail: andmiedu@umail.uz | <http://conf.andmiedu.uz/>

РАДІОЛОКАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДПОВЕРХНЕВОЇ ЧАСТИНИ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

С.О. МАСАЛОВ, Г.П. ПОЧАНІН, В.П. РУБАН, П.В. ХОЛОД

Ін-т радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова. 61085, Харків-85, вул. Академіка Г.Ф. Проскури, 12. E-mail: ire.kharkov.ua

Проаналізовано вимоги до енергетичних характеристик георадіолокаційної апаратури, які забезпечують виявлення дефектів під поверхню інженерних споруд та вимірювання товщини шарів шаруватого середовища. Запропоновано та теоретично і експериментально досліджено спосіб виявлення підповерхневих тріщин в монолітних блоках. Розроблено програмно керовану циклічну цифрову лінію затримки з розширеним до 200 нс діапазоном затримок. Запропоновано та досліджено способи підвищення енергетичного потенціалу радара за рахунок аналогового накопичення і використання антенної системи з глибокою розв'язкою між передавальним та приймальним модулями. Проаналізовано варіанти цільової цифрової обробки георадіолокаційних даних. Удосконалено і перевірено при моніторингу стану дорожнього одягу експериментальний зразок георадара. Бібліогр. 16, рис. 15.

Ключові слова: надширококутний георадар, радарограма, радіолокаційний моніторинг, енергетичний потенціал, підповерхнева структура

Під час експлуатації інженерні споруди, такі як автомобільні шляхи, залізничні колії та інші бетонні або земляні споруди, зазнають пошкоджень. Найбільшу загрозу становлять приховані дефекти, розташовані всередині споруд. Щоб подовжити термін використання таких споруд, необхідно мати змогу знаходити ці дефекти вчасно, а саме – на початковому етапі їх формування.

Серед перспективних нересурсномістких методів неруйнівного контролю стану інженерних споруд є надширококутний (НШС) георадіолокаційний метод. Особливістю цього методу є те, що він не вимагає багато часу для моніторингу. Тому діагностика стану споруд може виконуватися досить часто, що дозволить забезпечити своєчасне виявлення дефектів.

Апаратура для проведення діагностики надширококутним георадіолокаційним методом називається георадаром. В світі вже існують георадари, які використовуються для моніторингу стану інженерних споруд [1–3]. Більшість з цих приладів достатньо ефективні при пошуках відносно контрастних дефектів–границь, при переході яких діелектрична проникність та електропровідність змінюються на значну величину. До таких можна віднести діелектричні та металеві включення, порожнини, заповнені повітрям, або насичені вологою області (коли підповерхневі зони малої щільності заповнюються водою).

Але, разом з цим, існують дефекти – підповерхневі тріщини та розшліщення матеріалу споруди, які не є контрастними, але їхня поява сигналізує про початок руйнування. Відстеження динаміки розвитку тріщин і аналіз їх стану може дозволити своєчасно і з мінімальними затратами

відновити споруду. Іноді при будівництві та відновленні споруд необхідно точно контролювати товщини досить малих шарів діелектричних матеріалів. Так, наприклад, при будівництві та відновленні доріг потрібно контролювати товщини шарів асфальтобетону в кілька сантиметрів з точністю до 0,5 см.

Така вимірювальна апаратура не є широко представленою на ринку георадарів. Її розробка та виготовлення пов'язані з необхідністю вирішення складних завдань як на стадії пропозиції принципів роботи, так і на стадії конструктивних рішень і виготовлення. Найголовнішим завданнями є покращення енергетичних характеристик георадара: його динамічного діапазону та енергетичного потенціалу. Оскільки георадар складається з набору різних елементів, блоків та систем, бажаний результат може бути досягнуто тільки удосконаленнями, оптимізацією та взаємним узгодженням їх усіх водночас. Разом зі швидкодіючим багаторозрядним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) це надає змогу досягти підвищеної точності вимірювання параметрів сигналів, відбитих досліджуванним середовищем. При цьому важливо залишити надширокою смугу робочих частот радара. Саме вона забезпечує точність вимірювань. Разом з математичною обробкою сигналів така система є основою для вирішення завдань моніторингу стану підповерхневої частини інженерних споруд.

Розробка такого георадара потребує як удосконалення елементної бази, так і методів зондування, і, взагалі, особливих підходів до зондування, що відповідають конкретній задачі виявлення дефектів чи вимірювання товщини шарів і таке інше.

Останніми роками в ІРЕ ім. О.Я.Усикова НАНУ інтенсивного розвитку набули фундамен-

тальні дослідження з радіофізичної інтроскопії середовищ з поглинанням та дисперсією, результатами яких є низка патентів України [4–7], які застосовано в розробленому георадарі «ОДЯГ» [8], призначеному для моніторингу стану дорожнього покриття.

Головним чином, робота спрямована на удосконалення елементної бази георадарів з метою поліпшення їх енергетичних характеристик, що, відповідно, забезпечує більшу глибину і точність радіолокаційних вимірювань при моніторингу технічного стану підповерхневої частини інженерних споруд.

В теоретичній частині дослідження розглянуто задачі зондування і визначення наявності зон розуцільнення та тріщин в бетонних спорудах. Розрахунки показали, що для результативного пошуку зон розуцільнення в конструкціях доріг при глибинах зондування до 1,5 м і робочій смузі частот георадара від 400 до 1800 МГц (тривалість зонduючого імпульсу $\sim 0,7$ нс) потрібно забезпечити динамічний діапазон більший ніж 46 дБ. Подібні оцінки для пошуку зон розуцільнення на глибинах до 5 м в бетонних конструкціях споруд, таких як греблі, при робочій смузі частот від 100 до 500 МГц (тривалість зонduючого імпульсу $\sim 2,5$ нс) показали, що потрібно забезпечити динамічний діапазон не менше ніж 53 дБ. Поглинання хвиль цього частотного діапазону є меншим ніж у попередньому випадку, тому глибина зондування може бути більшою.

При оцінюванні вимог до динамічного діапазону приймача, які мають забезпечити виявлення наявності тріщини, останню можна було б розглядати як ту саму зону розуцільнення, заповнену повітрям або водою. Але явно виражена спрямованість тріщини дає змогу використати це при організації процесу зондування. В даному випадку коефіцієнт відбиття суттєво залежить від взаємної орієнтації тріщини та вектору поляризації електричного поля зонduючого сигналу. Це стало основою для запатентованого способу визначення місць знаходження підповерхневих тріщин [9].

За результатами виконання завдань теоретичної частини робіт з'ясовано наступне:

- для виявлення підповерхневих розуцільнень в інженерних спорудах потрібні георадари з динамічним діапазоном, не меншим ніж 53 дБ;
- для збільшення глибини виявлення розуцільнень потрібно збільшувати тривалість зонduючого імпульсу з одночасним підвищенням потужності зонduючого сигналу;
- для виявлення тріщин потрібно збільшити динамічний діапазон додатково на 25...30 дБ.

Енергетичний потенціал георадара має бути не меншим ніж 110 дБ.

Моделювання та оптимізація антенної системи. Для вимірювання товщини шарів шаруватого середовища запропоновано використовувати антенну систему, в якій забезпечено глибоку частотно-незалежну розв'язку між передавальним та приймальним модулями. Попередні експерименти з антенною системою [10, 11], виготовленою за принципом [5], продемонстрували, що можливо досягнуто є величина розв'язки, більша ніж 64 дБ. Завдяки розв'язці між передавальним і приймальним модулями антенної системи можна шляхом підвищення потужності збуджуючого сигналу довести енергетичний потенціал георадара до величини, яка забезпечить можливість використання усього динамічного діапазону приймача. При цьому, незважаючи на близьке розташування випромінюючої і приймальної антен, найбільший за амплітудою сигнал буде не той, що проходить напряду із випромінюючої антени в приймальну, а той, що відбивається неоднорідностями досліджуваного середовища.

Розроблено та виготовлено експериментальний зразок антенної системи (рис. 1).

За експериментальними даними оцінено, що при випромінюванні та прийомі енергетичні втрати досягають -28 дБ. Тому для зменшення втрат запропоновано роздільне знімання прийнятих сигналів з лівої та правої половин приймальної антени при використанні надширококутних симетруючих трансформаторів на лініях. У такий спосіб вдається досягти глибокої розв'язки між випромінюючим та приймальним модулями антенної системи і разом з цим краще узгодити приймальну антену з фідерною лінією, вдвічі збільшивши амплітуду прийнятого сигналу на вході приймача, а також зменшити вплив синфазної імпульсної завади.

Двоканальний стробоскопічний приймач з диференційними входами. Максимальна глибина зондування і чутливість георадара є важливими параметрами радіолокаційної системи. Ці параметри визначаються в основному можливостями приймача георадара. Так, глибина зондування за-

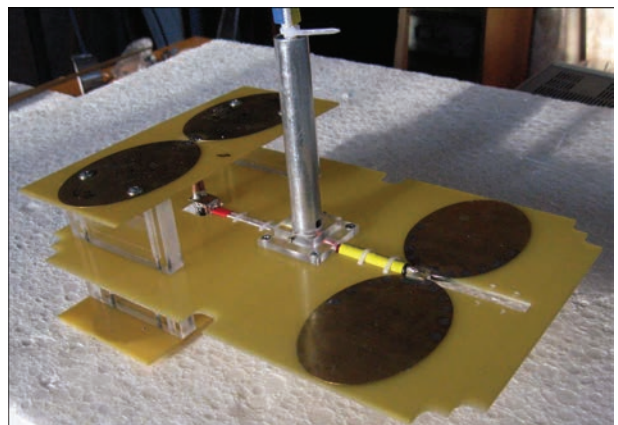


Рис. 1. Зразок антенної системи

лежить від характеристик системи синхронізації та лінії затримки стробімпульса для стробоскопічного перетворювача, а чутливість системи визначається коефіцієнтом перетворення стробоскопічного перетворювача.

Для ефективної роботи стробоскопічного приймача в режимі когерентного накопичення необхідно забезпечити стабільну синхронну роботу генератора коротких імпульсів, що збуджують випромінюючу антену, та цифрової лінії затримки (системи автоматичного зсуву) стробоскопічного перетворювача. У зв'язку з цим важливу роль в синхронізації сигналів відіграє вхідний компаратор запуску системи синхронізації. Від його параметрів залежить часова стабільність (джиттер дискретизації) системи і, відповідно, точність вимірювань параметрів прийнятих сигналів. Також, у зв'язку з тим, що на вхід синхронізації надходить імпульс наносекундної тривалості, компаратор має мати високу швидкодію.

Для вирішення цих завдань розроблено швидкодіючий компаратор на основі емітерно-зв'язаної логіки (ЕЗЛ). Блок-схема компаратора показана на рис. 2.

За параметрами мікросхем, використаних в компараторі, можуть бути визначені його характеристики: спектр вхідного сигналу і, відповідно, робоча смуга вхідного тракту – 8 ГГц, мінімальна тривалість імпульсу – 100 пс, нестабільність не більше 200 фс. Компаратор формує імпульси запуску лінії затримки тривалістю 2 нс, амплітудою 400 мВ (ЕЗЛ – рівні).

Тестування швидкодіючого компаратора проводилось спільно з цифровою лінією затримки і стробоскопічним змішувачем.

Стабільна робота системи синхронізації приймача також забезпечується завдяки малому джиттеру цифрових ліній затримок на основі ЕЗЛ-мікросхем. Їх нестабільність синхронізації (випадковий джиттер) має величину порядку 3 пс. Недоліком такої ЦЛЗ є малий діапазон часових затримок – 10 нс.

Циклічна цифрова лінія затримки. З метою розширення діапазону спостереження (за часом, а відповідно і за глибиною) було запропоновано оригінальний спосіб забезпечення розширеного діапазону затримок строб імпульсів за рахунок циклічності підключення мікросхем фіксованої цифрової лінії затримки. Для реалізації цього способу розроблено експериментальний зразок та

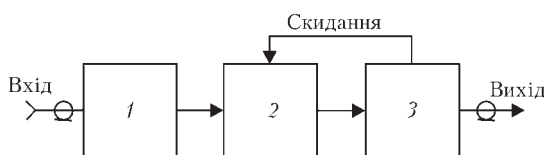


Рис. 2. Схема швидкодіючого компаратора: 1 – вхідний компаратор; 2 – тригер; 3 – розгалужувач сигналів

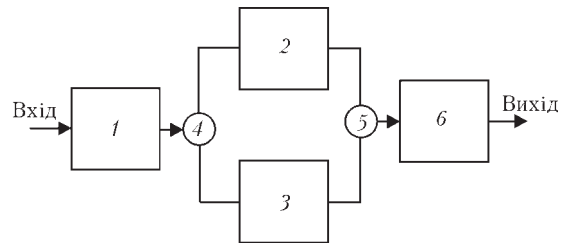


Рис. 3. Схема цифрової лінії затримки з розширеним діапазоном автоматичного зсуву синхроімпульсів: 1–3 – керувані цифрові лінії затримки на діапазон 10 нс; 4 – логічний елемент АБО; 5 – розгалужувач імпульсів; 6 – лічильник сигналів

проведено тестування циклічної цифрової лінії затримки, яке довело її працездатність і разом з тим високу точність задавання необхідних часових інтервалів.

Блок-схема лінії затримки наведена на рис. 3.

Особливість схеми – це циклічне включення цифрових ліній 2 і 3, що дозволяє згенерувати послідовність синхроімпульсів з періодом 20 нс. Після заданої кількості циклів проходження імпульсів через лінії затримки на виході лічильника 6 генерується синхросигнал. Параметри сигналу: амплітуда – 3 В, тривалість – 50 нс.

Оцінка часової нестабільності приймача (джиттера дискретизації) за методикою [12] показала, що середньоквадратичне відхилення склало близько 1 пс. На рис. 4 наведена діаграма розподілу часових помилок реєстрації короткого імпульсу приймачем з швидкодіючим компаратором і цифровою лінією затримки.

З діаграми видно, що часові помилки реєстрації лежать в межах ± 3 пс.

Експериментально досягнуто максимальне значення затримки до 200 нс. Це відкриває можливість прийому радіолокаційних сигналів з глибин, що приблизно дорівнюють 10 м. Слід зазначити, що, незважаючи на розширення діапазону затримок, точність і висока стабільність синхронізації залишилися тими ж самими. Про це свідчить ефективно використання аналогового накопичення при прийомі радіолокаційних сигналів.

Аналогове накопичення. Очевидним є факт, що чим більша чутливість георадіолокаційної апа-

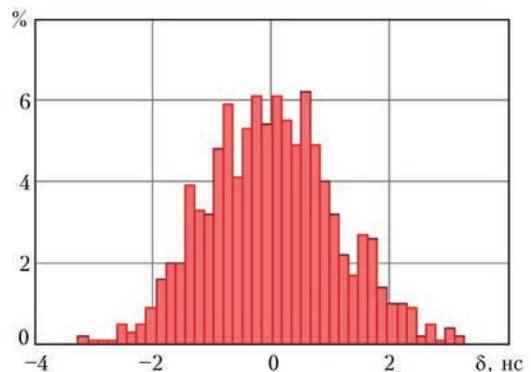


Рис. 4. Діаграма розподілу часових помилок

ратури, тим глибшим може бути зондування, тим менш контрастні дефекти можуть бути виявлені і тим точніше визначена підповерхнева структура. Тому в роботі продовжено теоретичне та експериментальне дослідження шляхів розширення динамічного діапазону георадара та підвищення чутливості стробоскопічного приймача, які базуються на матеріалах патенту № 96241 України [10].

Для розширення динамічного діапазону георадара в стробоскопічному приймачі застосовано аналогове накопичення сигналів. Розрахунки та експериментальні дані показали, що застосування режиму аналогового накопичення в простій схемі стробоскопічного перетворювача без зворотних зв'язків і без скидання накопиченого заряду дозволяє зменшити час наростання перехідної характеристики приймача і відповідно розширити робочу смугу частот [13].

Досліджено характер зміни характеристик перетворювача при використанні накопичення. На рис. 5 показано експериментальні та розрахункові залежності робочої смуги частот ΔF від кількості накопичень I при різних тривалостях вибірок δ (тривалостях стробімпульсів Δt).

Кількісна оцінка показує, що відносне розширення робочої смуги становить 80 % при малих тривалостях вибірки (рис. 6).

Таким чином, з'ясовано методи оптимізації та параметри змішувача, які забезпечують найбільш широкий робочий діапазон частот приймача та зменшення рівня шумів внаслідок накопичення.

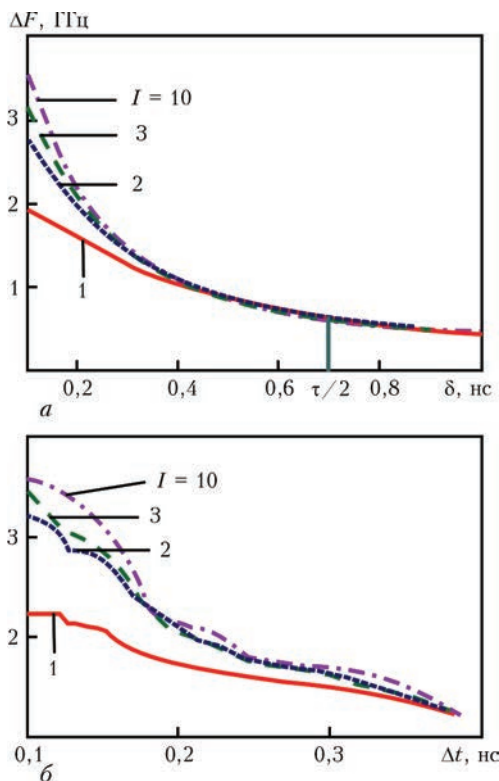


Рис. 5. Залежності робочої смуги частот від числа накопичень I та тривалості вибірки δ (теорія) (а) і тривалості стробімпульсів Δt (експеримент) (б)

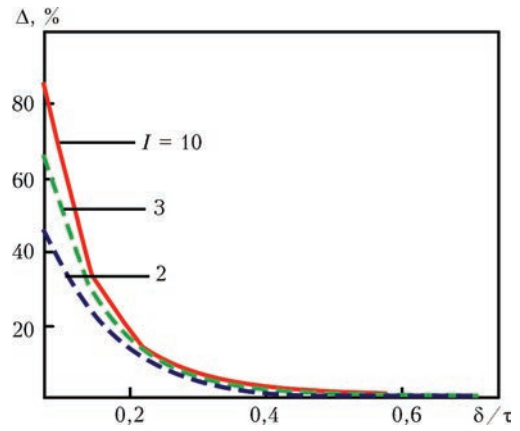


Рис. 6. Вплив аналогового накопичення на ширину робочої смуги частот

Двоканальний АЦП. Для підвищення точності вимірювання амплітудних параметрів приймача розроблено 24-розрядний АЦП (рис. 7) на основі мікросхеми AD7760.

Цифрова обробка результатів зондування. Сучасні алгоритми цифрової обробки радіолокаційних сигналів є продуктивним інструментом, який дає змогу суттєво покращити характеристики радіолокаційної системи. Особливо це стосується георадіолокації, в якій умови поширення сигналів зондування вкрай складні. Серед завдань, які розглядались виконавцями проекту, є визначення товщини шарів шаруватих середовищ (наприклад, задачі неруйнівного контролю стану доріг), виявлення підповерхневих (невидимих з поверхні) тріщин у монолітних блоках, та пошук і визначення габаритів, форми і др. підповерхневих дефектів.

Застосування георадарів з НШС імпульсними сигналами для виявлення та ідентифікації неоднорідностей діелектричної проникності в середовищах зі значним поглинанням і дисперсією накладає ряд специфічних обмежень на методи обробки відбитих сигналів. Зокрема, швидкість поширення радіохвиль в дисперсійних неоднорідних середовищах не є постійною, що зумовлює труднощі у визначенні справжніх відстаней до об'єктів пошуку. Крім того, велика частина ґрунтів складається з середовищ, що мають значну дисперсію та поглинання, які змінюються зі зміною вмісту води в шарах вздовж траси поширення сигналу. Тому для досягнення більшої глибини зондування доводиться застосовувати імпульси наносекундно-

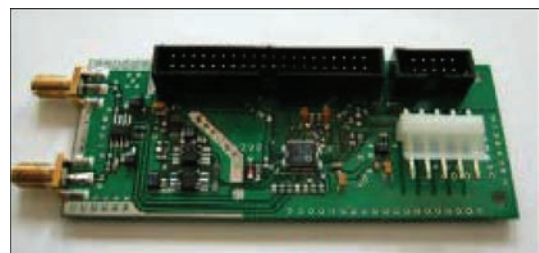


Рис. 7. Експериментальний зразок аналого-цифрового перетворювача

го діапазону тривалості. Ці імпульси мають просторову довжину (тривалість у часі, помножена на швидкість поширення електромагнітної хвилі), яка перевищує відстань між границями шару. Тому при застосуванні таких імпульсів без додаткових прийомів цифрової обробки сигналів роздільна здатність виявляється недостатньою для практичних потреб.

В задачах визначення радіолокаційними методами товщини шарів, товщини яких менше просторової довжини сигналу, у відбитому сигналі спостерігається інтерференційна картина, на якій без додаткових припущень неможливо розділити відбиття від кожної з границь окремо.

Проблема вирішується, якщо врахувати той факт, що відстань від поверхні середовища до його нижньої границі невелика (приблизно одиниці або десятки сантиметрів). При цьому рівень відбитого сигналу на вході приймача георадара на 20...30 дБ перевищує рівень власного шуму приймача. При таких співвідношеннях сигнал/шум виявляється ефективною нелінійна гомоморфна обробка сигналів [14].

Результати обробки сигналів за цим алгоритмом продемонстрували, що за умов великого співвідношення сигнал/шум нелінійна гомоморфна обробка сигналів є перспективною для ідентифікації близько розташованих границь підповерхневих структур. Але при використанні цього алгоритму для визначення границь за результатами експериментів виникли проблеми, обумовлені викривленнями форми відбитих сигналів через слабку контрастність.

Алгоритм пошарового визначення товщини шарів. Під час виконання досліджень на прикладі визначення товщини шарів дорожнього покриття дістав подальшого розвитку алгоритм пошарового визначення товщини шарів [15]. Використання цього методу для обробки георадарних даних, отриманих георадаром «ОДЯГ» при моніторингу відновленого дорожнього асфальтобетонного покриття, довело ефективність його застосування.

Метод мікрохвильової томографії. Радіолокаційні зображення (радарограми) локальних неоднорідностей, якими є тріщини або зони відмінної щільності, мають вигляд, який важко піддається ідентифікації. Це обумовлено способом збору георадарних даних. Для отримання більш зрозумілого зображення використовують алгоритми просторової обробки результатів зондування, до яких можна віднести алгоритм міграції, голографічний або мікрохвильової томографії. Останній був протестований на георадарних даних, отриманих з використанням розробленого експериментального зразка георадара на підготовленому полігоні (рис. 8).

Первинну радарограму (рис. 9, а) було оброблено за алгоритмом томографічної обробки. Ре-

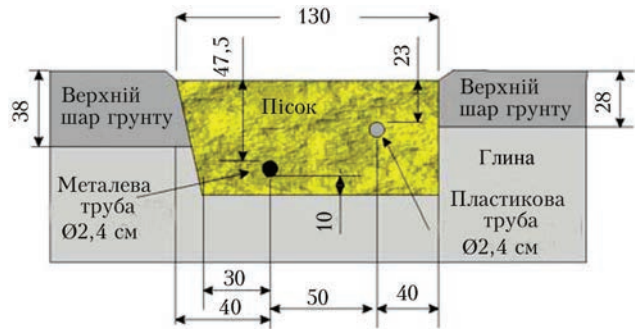


Рис. 8. Підповерхнева структура полігону (схема)

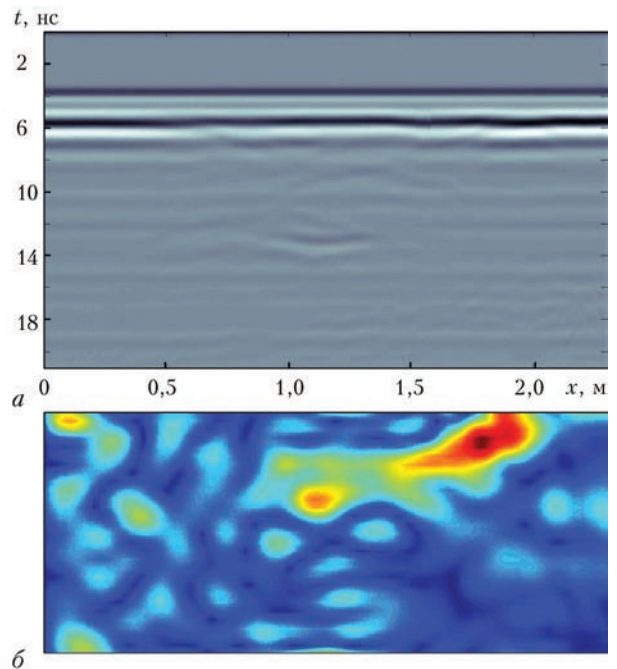


Рис. 9. Необроблена радарограма (а) та результат томографічної обробки (б)

зультат (рис. 9, б) продемонстрував, що зображення металеві труби (контрастного об'єкта) фокусується відносно добре. Помітними є також схили траншеї. Але діелектрична труба залишилась малопомітною.

Таким чином, підхід мікрохвильової томографії є перспективним, але потребує додаткових досліджень, метою яких є відновлення більш реалістичної картини підповерхневої структури об'єктів.

Тестування георадара. Виявлення тріщин. Розпочаті на першому етапі теоретичні дослідження стосовно виявлення тріщин було продовжено експериментально. Для експериментального дослідження з метою впровадження способу виявлення тріщин у асфальтобетонному покритті [9] було виготовлено приймально-передавальну пару надширококутних навантажених антен з експоненціальною щільною, які розміщено на юстирувальній основі (рис. 10). Після тестових випробувань цю антенну систему було застосовано в експериментах, в яких були задіяні асфальтобетонні блоки (рис. 11). З блоків утворювались поверхневі та підповерхневі тріщини різного роз-



Рис. 10. Приемально-передавальна антенна система для виявлення тріщин



Рис. 11. Асфальтобетонні блоки на щебені

криву та на різних глибинах, які в подальшому виявлялись георадіолокаційною апаратурою.

Результати тестування демонструють рис. 12 – рис. 15. Вони показують відбиті сигнали, які формуються при відбитті від тріщин при відповідних орієнтаціях антен та тріщин. Рис. 12 показує, що навіть якщо підповерхнева тріщина розташована вздовж передавальної антени, відбиття існує. Відбитий сигнал спостерігається в часовому інтервалі 1...4 нс. Якщо зорієнтувати передавальну антену під кутом 45° до тріщини, у відбитому сигналі з'являється крос-поляризована компонента, яка зумовлює потужний (до 0,12 В) сигнал (рис. 13) в

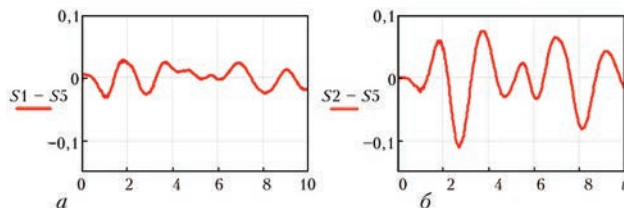


Рис. 12. Передавальна антена вздовж підповерхневої тріщини (а) та під кутом 45° до неї (б)

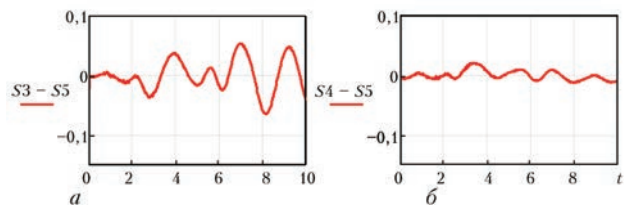


Рис. 13. Передавальна антена під кутом 45° до тріщини (а) та вздовж неї (б) (тріщина на поверхні)

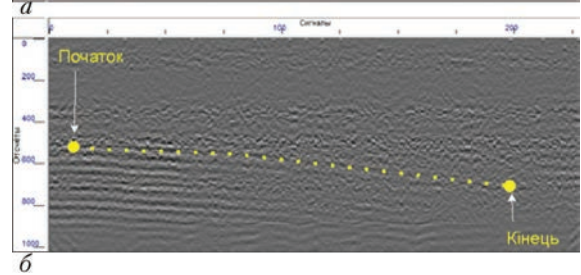
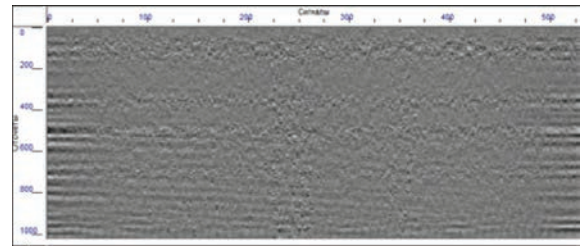


Рис. 14. Радіолокаційні профілі прихованого діелектричного об'єкта при зондуванні: а – без накопичення; б – з накопиченням п'яти сигналів

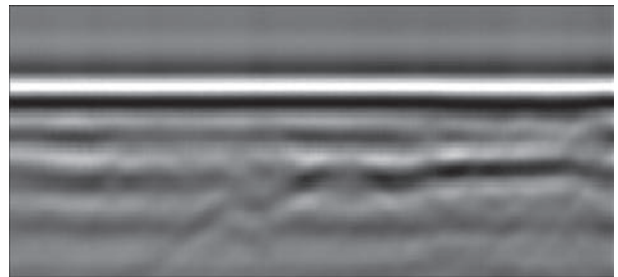


Рис. 15. Зондування та радарограма перетину доріг

приймальної антени. Цього цілком достатньо для виявлення тріщини.

Виявлення слабконтрастних об'єктів. За допомогою георадара, який працює в режимі з аналоговим накопиченням, проведені експерименти з виявлення слабконтрастних, заритих у ґрунті об'єктів [16]. Рис. 14 показує відповідні радарограми, записані в режимі з накопиченням і без накопичення. Помітно, що при накопиченні, зображення об'єктів (лінії, що нахилені) більш контрастні, ніж в радарограмі, записаній без накопичення, що свідчить про ефективність застосування аналогового накопичення.

Моніторинг відновленого та добудованого дорожнього полотна. При виконанні моніторингу структури відновленого та добудованого дорожнього покриття (рис. 15) було визначено, що поверхневий шар є однорідним, рівної товщини 5 см. Під поверхнею на глибині приблизно 0,5 м помітно ущільнення, що відповідає дорожньому полотну, яке існувало до ремонтних робіт.

Висновки

Таким чином, в роботі було виконано дослідження, що дають змогу покращити технічні характеристики георадара: глибину зондування, роздільну здатність, якість обробки та відображення отримуваної георадіолокаційної інформації, а також було проведено роботу щодо впровадження результатів досліджень.

Результати за окремими напрямками робіт:

- проаналізовано можливості методів обробки результатів зондування: гомоморфної ідентифікації границь розділу шаруватих середовищ, поширеного визначення товщини шарів дорожнього покриття, мікрохвильової томографії, та визначено перспективність використання кожного з них для вирішення конкретних завдань підповерхневої радіолокації;
- оптимізовано НШС імпульсну передавально-приймальну навантажену антенну систему з розв'язкою та трансформатор до неї;
- розроблено та перевірено функціонування та характеристики циклічної цифрової лінії затримки з розширеним до 200 нс діапазоном затримок;
- досліджено вплив тривалості вибірки та аналогового накопичення на характеристики стробоскопічного перетворювача, визначено методи оптимізації та параметри змішувача, які забезпечують найбільш широкий робочий діапазон частот приймача, та зменшення рівня шумів внаслідок накопичення;
- розроблений експериментальний зразок георадара перевірено на задачах виявлення підповерхневих об'єктів різних типів.

1. *Ground penetrating radar for road structure evaluation and analysis.* <http://www.geophysical.com/roadinspection.htm>
2. *Concrete & Pavement.* // <http://www.sensoft.ca/Applications/Concrete-and-Pavement.aspx> Engineering geophysical surveys for highways. URL: http://www.geotechru.com/en/filemanager/download/446/road_inspection.pdf
3. *Engineering geophysical surveys for highways.* URL: http://www.geotechru.com/en/file_manager/download/466/road_inspection.pdf
4. *Пат. № 84188* Україна, МПК (2006) G01R 29/08 G01V 3/12. Спосіб визначення швидкості поширення електромагнітної хвилі в ґрунті / Г.П. Почанін, М.М. Головка. Заявл. 27.07.2006; Опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18. – 5 с.
5. *Пат. № 81652* Україна, МПК7 (2006) H 01 Q 9/00 H 01 Q 19/10. Спосіб розв'язки між передавальним і приймаль-

ним модулями антенної системи / Ю.О. Копилов, С.О. Масалов, Г.П. Почанін; Заявл. 17.08.05; Опубл. 25.01.08, Бюл. № 2. – 4 с.

6. *Пат. № 95157* Україна, МПК (2006) H01Q 21/26. Поляриметрична антенна система надширокопasmового радіолокатора підповерхневого зондування / П.В. Холод, Г.П. Почанін Заявл. 28.12.2009; Опубл. 11.07.2011, Бюл. № 13, 2011.
7. *Пат. № 96241* Україна, МПК H04B 1/06. (2006.01) Стробоскопічний спосіб реєстрації сигналів / Г.П. Почанін, В.П. Рубан Заявл. 07.12.2010; Опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.
8. *[Електронний ресурс]* / G.P. Pochanin, V.P. Ruban, P.V. Kholod et al. // Журнал радіоелектроніки. – Електрон. журн. – 2013. – № 1. – С. 1–12. – Режим доступу: URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jan13/8/text.pdf>.
9. *Пат. № 81296* Україна, МПК .E01C 23/00, G01R 29/08 (2006.01) Спосіб виявлення та визначення місць знаходження у тому числі і підповерхневих тріщин в асфальтобетонному покритті / Д.О. Батраков, А.Г. Батракова Г.П. Почанін; Заявл. 08.01.2013; Опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 10 с.
10. *Enlarging of power budget of ultrawideband radar* / G.P. Pochanin, V.P. Ruban, P.V. Kholod et al. // 6th Intern. conf. on «Recent Advances in Space Technologies-RAST2013» June 12–14, 2013. Istanbul (Turkey). – P. 213–216.
11. *UWB antenna with high isolation between transmitting and receiving modules* / G.P. Pochanin, A.A. Orlenko, P.V. Kholod et al. // Proc. of the IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13) September 16–20, 2013, Odessa, Ukraine. – P. 341–343.
12. *Дудник А.В.* Методы измерения и анализа джиттера в приемниках георадаров // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 1/2. – С. 51–57.
13. *Стробоскопическое преобразование сигналов при аналоговом накоплении* / В.П. Рубан, А.А.Шуба, А.Г. Почанін, Г.П. Почанін // Радиофизика и электроника. – 2014. – 19, № 4.
14. *Сытник О.В.* Textural Analysis of Cepstrum Images of Subsurface Structure // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – 70, № 1. – P. 87–94.
15. *Определение толщин слоев дорожной одежды методом георадиолокационного зондирования* / Батраков Д.О., Батракова А.Г., Головин Д.В. и др. // Физические основы приборостроения. – 2014. – 3, № 2. – С. 46–56.
16. *Analog Signal Processing for UWB Sounding* / V.P. Ruban, O.O. Shuba, O.G. Pochanin et al. // 7th Intern. conf. on «Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals» September 15–19, 2014, Kharkiv, Ukraine. – P. 55–58.

Requirements to energy characteristics of geo-radar equipment were analyzed, which ensure detection of defects under engineering facility surface and measurement of layered medium layer thickness. Method of subsurface crack detection in monolithic blocks was proposed and theoretically and experimentally studied. Program-controlled cyclic digital line was developed with delay range extended up to 200 ns. Method of increasing radar energy potential due to analog accumulation and application of array system with profound decoupling of transmitting and receiving modules was proposed and studied. Variants of targeted processing of georadar data were analyzed. A pilot sample of georadar was retrofitted and tried out at monitoring of the condition of road pavement. 16 References, 17 Figures.

Keywords: ultra-wideband ground penetrating radar, radarogram, radar monitoring, energy potential, subsurface structure

Поступила в редакцию
22.01.2016



**8-я Международная конференция
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

2–3 июня 2016

Тимишоара, Румыния

www.isim.ro

ЧИСЛЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ БАНДАЖАМИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, А.С. МИЛЕНИН, Г.Ф. РОЗЫНКА, Н.И. ПИВТОРАК

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью исследования характерных особенностей напряженно-деформированного и предельного состояний дефектного участка магистрального трубопровода, несущая способность которого была восстановлена с помощью композиционного бандажа, а также для прогнозирования эффективности ремонта, был разработан соответствующий комплекс математических моделей, позволяющий проводить необходимый анализ состояния составной конструкции такого рода с учетом зарождения и развития повреждения в микро- и макромасштабе. На примере элемента магистрального трубопровода с множественными коррозионными дефектами продемонстрированы характерные особенности его напряженно-деформированного, поврежденного и предельного состояний, определяющих эффективность ремонта посредством бандажей из волокнистых композитов. Библиогр. 15, табл. 4, рис. 7.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, композиционный бандаж, дефект коррозионного утонения, эффективность ремонта

Накопление эксплуатационной поврежденности магистральных трубопроводов и элементов технологических трубопроводных систем является одним из основных факторов снижения их работоспособности и возникновения аварийных ситуаций. Поэтому проведение регулярной технической диагностики их состояния и восстановление несущей способности дефектных участков является необходимым условием безопасной долгосрочной эксплуатации [1–3]. Распространенными дефектами трубопроводов являются локальные коррозионные потери металла, которые формируют плавные концентраторы напряжений, и в случае существенного развития коррозионных процессов, могут приводить к снижению несущей способности конструкции, течи или разрушению трубопровода. При этом к наиболее опасным относятся множественные локальные утонения стенки, которые могут поражать протяженные участки конструкции.

Одним из современных методов восстановления несущей способности трубопроводных элементов с обнаруженными неглубокими множественными коррозионными повреждениями является усиление посредством бандажей из композиционных материалов (КМ) [4, 5]. Это позволяет достаточно эффективно разгружать трубопроводные элементы (табл. 1). При этом трудоемкость и финансовые затраты на ремонт композиционными бандажами (КБ) существенно меньше, чем в случае использования металлических муфт [6]. Кроме того, установка КБ возможна на локальные гибы трубопроводов, на области отводов,

тройников, другой трубопроводной арматуры, а также на усиления монтажных сварных швов. К недостаткам этой технологии можно отнести относительно небольшую долговечность КМ в условиях действия агрессивных сред, сложности в прогнозировании деградации свойств композита во времени. Кроме того, расчеты усиленной конструкции на статическую прочность требуют взаимосвязанных моделей развития напряженно-деформированного и поврежденного состояний при достижении предельных нагрузок от внутреннего давления в трубопроводе. Данная работа посвящена разработке методологических подходов описания предельного состояния волокнистых КМ применительно к проблеме эффективности разгрузки дефектных участков трубопроводов посредством КБ.

Поведение КМ в процессе нагружения определяется как физико-механическими свойствами отдельных компонентов, так и их структурой. Математическое описание таких макроскопических характеристик состояния сплошной среды, как механические напряжения и деформации принято рассматривать в рамках моделей однородного анизотропного материала [7], что при достаточном объеме экспериментальных исследований позволяет с высокой точностью прогнозировать развитие полей напряжений и деформаций при различных системах нагружения. Но прогнозирование предельного состояния конструкций из КМ предполагает моделирование процессов зарождения и развития разрушения, которые проявляются в мезо- и микромасштабе. В этом случае приближение однородно-

Таблица 1. Характеристики ремонта магистральных трубопроводов посредством композиционных бандажей в сравнении с другими методами [6]

Классификация		Давление, МПа	Окружные напряжения, МПа	Разрушение
Дефектная труба	А (труба из стали API 5L X65, 762×17,5 мм с локальным утонением по основному металлу)	17,15	373,70	Да
	В (труба с локальным утонением по окружному сварному шву)	17,84	388,65	->-
	С (труба с V-образным надрезом по основному металлу)	8,72	190,06	->-
Восстановленная труба	Металлический бандаж (А)	30,77	670,53	Нет
	Металлический бандаж (В)	30,18	657,72	->-
	Эпоксидно-стекловолоконный бандаж (А)	29,40	640,63	->-
	Эпоксидно-стекловолоконный бандаж (В)	29,89	651,31	->-
	Эпоксидно-стекловолоконный бандаж (С)	30,28	659,85	->-
	Композиционный бандаж «Clock-spring» (А)	25,87	563,76	Да (течь)
	Композиционный бандаж «Clock-spring»(В)	28,42	619,28	Нет
	Наплавка (А)	28,32	617,15	->-
Наплавка (В)	28,32	617,15	->-	

го материала не позволяет выявить специфику взаимодействия компонентов композита, разрушения отдельных микро- и макроячеек, распределения докритической поврежденности, поэтому требуется моделирование материала как разнородного. Но так как в современных КМ используются компоненты микро- и наноразмеров, то математическое описание без определенного упрощения потребовало бы значительных мощностей аппаратных средств расчета и длительного времени проведения численных экспериментов.

В рамках настоящего исследования был реализован алгоритм двухуровневого анализа состояния КБ, установленного на элемент трубопровода с множественной коррозионной поврежденностью (рис. 1), в рамках которого вначале решалась задача прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) (макроуровень), затем для каждого конечного элемента определялась степень повреждения в предположении регулярности структуры яче-

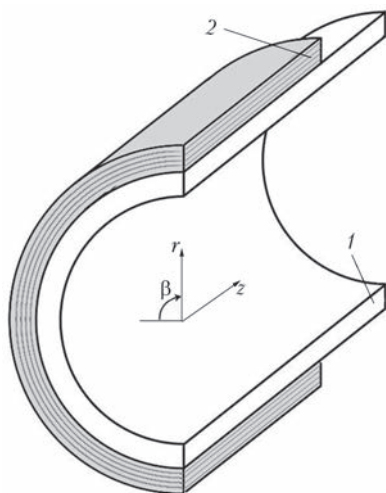


Рис. 1. Схема трубопроводного элемента (1) с установленным на него композиционным бандажом (2)

ек (мезоуровень). Связь между уровнями такого анализа реализуется путем передачи некоторого объема расчетных данных на каждом последующем этапе численного прослеживания. Так, решением задачи упругопластического деформирования сложной цилиндрической конструкции, состоящей из металлического трубопровода с множественными локальными полуэллиптическими поверхностными аномалиями геометрии и слоя анизотропного КМ, в рамках макроскопического анализа является поле перемещений узлов конечно-элементного разбиения. Кроме того, при определенном значении истинных напряжений в конечном элементе происходит его разрушение, что математически может быть описано «обнулением» элемента, т.е. заменой его свойств на свойства воздуха и соответствующим решением уравнения равновесия для оценки перераспределения напряжений и деформаций, вызванного локальным разрушением. Поле перемещений узловых точек композиционной части конструкции передается для решения задач НДС регулярных ячеек в рамках мезозадачи в неоднородной изотропной постановке. В этом случае каждый конечный элемент представляется суперпозицией матрицы (в рассматриваемом случае эпоксидной смолы) и армирующего компонента (стекловолокна) с соответствующими свойствами и собственным, более мелким разбиением на конечные элементы, которое позволяет с достаточной точностью описать особенности состояния КМ. Постановка граничных условий в перемещениях, линейно интерполированных по значениям в угловых точках, позволяет восстановить специфику распределения напряжений в неоднородной задаче (без предположения об усредненном значении, необходимом заложенном в решение макрозадачи). Соответственно полю

напряжений в каждой регулярной ячейке оценивается ее поврежденность путем аналогичного «обнуления» конечных элементов эпоксидной матрицы или стекловолокна, которая определяет несущее нетто-сечение конечного элемента при решении макрозадачи на следующем этапе прослеживания (рис. 2).

Предельное состояние трубопроводного элемента определяется зарождением и развитием макроскопического (критического) разрушения конструкции. Так как в рассматриваемом случае дефектный элемент не характеризуется острыми геометрическими концентраторами, то докритическое и критическое разрушение материала определяется вязким механизмом, заключающимся в зарождении и развитии равномерно распределенных микропор при интенсивном пластическом деформировании металла. В рамках данного исследования считается, что поведение металла трубопровода описывается упругопластическим поведением с условием текучести по закону Мизеса и упрочнением, тогда как компоненты КМ являются полностью упругими с идеальной адгезией между собой и металлом. При этом наличие несплошности материала в результате разрушения вызывает снижение несущего нетто-сечения отдельных конечных элементов, что необходимо учитывать в рамках постановки задачи численного прогнозирования напряженно-деформированного и предельного состояний трубопровода с КБ. Так, было принято, что зарождение пор вязкого разрушения определенной концентрации f_0 имеет место при выполнении модифицированного критерия Джонсона–Кука:

$$\int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c} > 1, \quad (1)$$

где $d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}$, $d\varepsilon_{ij}^p$ – компоненты тензора приращений пластических деформаций; ε_c – критическая величина пластических деформаций.

Дальнейший рост зародившейся несплошности может быть описан посредством закона Рай-

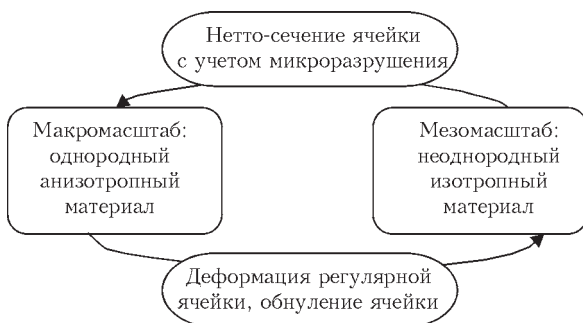


Рис. 2. Принципиальная блок-схема расчетной модели поведения композиционного материала при нагружении вплоть до предельных значений силового воздействия

са–Трейси [8], связывающего скорость роста концентрации пор вязкого разрушения с жесткостью напряженного состояния материала и интенсивностью накопленных пластических деформаций.

Наличие несплошности влияет на поведение материала конструкции при воздействии внешнего силового нагружения. Признанным подходом, позволяющим учесть эту особенность, является использование континуальных моделей описания поверхности текучести несплошного материала, в частности, модели Гурсона–Твергаарда–Нидлмана, в рамках которой поверхность текучести имеет следующее математическое выражение [8]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_T} \right)^2 - (q_3 f^*)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left(q_2 \frac{3\sigma_m}{2\sigma_T} \right) - 1, \quad (2)$$

где q_1, q_2, q_3 – константы; f^* – эквивалентная концентрация пор; σ_T – предел текучести материала; $\sigma_m = (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz})/3$ – среднее значение нормальных компонент тензора напряжений σ_{ij} , $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}}$ – интенсивность напряжений.

Конечно-элементное рассмотрение совместной задачи кинетики напряженно-деформированного и поврежденного состояний трубопроводного элемента с КБ предполагает, что приращение компонент тензора деформаций в пределах конечного элемента представляет собой суперпозицию следующих составляющих:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} (d\varepsilon_T + df/3), \quad (3)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e, d\varepsilon_{ij}^p, \delta_{ij} df/3$ – компоненты приращения тензора деформаций, которые определяются вязким механизмом деформирования, пластическим течением и пористостью соответственно.

Зависимость деформаций от напряжений описывается законом Гука и ассоциированным законом пластического течения [9, 10]:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Psi \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \right) + \delta_{ij} \left(K \sigma_m + \Delta f/3 \right) - \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \right)^* + \left(K \sigma_m \right)^*, \quad (4)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, т. е. $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$; $K = (1-2\nu)/E$ – модуль объемного сжатия; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона, $G = E/2(1 + \nu)$ – модуль сдвига; символ «*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания; Ψ – функция состояния материала, которая определяет условия пластического течения в соответствии с формой поверхности текучести (2):

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \sqrt{1 + (q_3 f^*)^2 - 2q_1 f^* \cosh \left(q_2 \frac{3\sigma_m}{2\sigma_T} \right)},$$

$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s, \quad (5)$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимо.

Исходя из изложенного, критерий разрушения стенки трубы по условию пластической неустойчивости может быть сформулирован следующим образом [8]:

$$\Psi > \frac{1}{2G} + \frac{\varepsilon_c - \kappa^*}{1,5\sigma_i(\kappa, T)(1-2f/3)}, \quad (6)$$

где κ^* – параметр Одквиста.

Кроме того, существенное развитие пористости металла конструкции вызывает значительное увеличение истинных напряжений, которое может быть математически ограничено условием $\sigma_s \rightarrow 0$ и из выражения (2) определяется величина критической объемной концентрации пор f_d^* , эквивалентной предельному состоянию и ограничивающей применимость указанных моделей условием пластической неустойчивости:

$$f^* \rightarrow f_d^* = \frac{2q_1}{q_3} \cosh\left(\frac{3q_2\sigma_m}{2\sigma_T}\right). \quad (7)$$

В случае, если значения истинных главных напряжений превышают величины микроскола S_K , то в металле реализуется хрупкий механизм локального разрушения:

$$\frac{\sigma_1}{1-2f/3} \geq S_K. \quad (8)$$

Одним из важных этапов решения данной задачи является математическое описание усредненных свойств КМ в приближении однородной анизотропной среды. Следует отметить, что имеющиеся экспериментальные данные по одноосному растяжению образцов из волокнистых КМ представляют собой значения конкретных механических характеристик материала в различных направлениях относительно расположения волокон. Поэтому для непосредственного использования таких данных без их дополнительной интерпретации в рамках данной модели на каждом этапе прослеживания определяется преимущественное направление деформирования для каждого конечного элемента и соответственно ему выбираются конкретные значения упругих констант.

Так, в зависимости от объемного содержания материала матрицы V_m и волокнистого наполнителя V_f значение модуля Юнга вдоль и поперек волокон вычисляется согласно правилу смесей [7]:

$$E_T = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}, \quad (9)$$

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f),$$

где E_m, E_f – модули Юнга материала матрицы и волокон соответственно; E_T, E_L – модули Юнга условно однородного анизотропного КМ вдоль и поперек волокон, соответственно.

Для определения коэффициента Пуассона может быть использована зависимость Уитни и Райли [7]:

$$v_{LT} = \frac{v_m - \{2(v_m - v_f)\}}{E_m(1 - V_f)(1 - v_f - 2v_f^2) + \dots} \frac{(1 - v_m^2)E_f V_f \dots}{+ E_f \{V_f(1 - v_m - 2v_m^2) + (1 + v_m)\}}, \quad (10)$$

$$v_{TL} = v_m V_m + v_f V_f,$$

где v_{LT}, v_{TL} – коэффициенты Пуассона для направления вдоль и поперек волокон, соответственно; v_m, v_f – коэффициент Пуассона материала матрицы и волокон, соответственно.

В качестве примера на рис. 3 приведена типичная экспериментальная зависимость модуля Юнга для системы «эпоксидная смола–стекловолокно» [7]. Введение поправки на конкретные значения коэффициентов по направлениям вдоль и поперек направления волокон согласно (9) позволяет восстановить упругие свойства КМ выбранной системы при различной комбинации составляющих его компонентов и конкретного направления деформирования.

В механике разрушения КМ при статическом силовом воздействии существует ряд критериев, основанных на различных параметрах состояния материала. В частности, внимания заслуживает критерий, являющийся модификацией формулы Хофмана для материалов при преимущественно растягивающем внешнем усилии [7]:

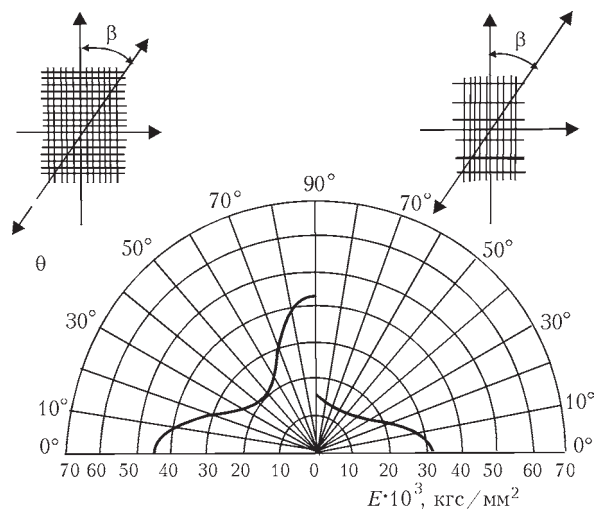


Рис. 3. Изменение модуля Юнга в зависимости от направления растяжения образцов из стекловолоконного композита с матрицей из эпоксидной смолы с параллельным (слева) и перпендикулярным расположением слоев (справа) [7]

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{xx}}{X}\right)\left(\frac{\sigma_{yy}}{Y}\right) + \left(\frac{\sigma_{yy}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S}\right)^2 = 1, (11)$$

где X, Y, S – параметры прочности конкретного КМ в зависимости от механических свойств и соотношения составляющих компонентов.

Таким образом, разработанная методика оценки НДС системы «трубопровод–композиционный бандаж» позволяет эффективно учитывать как влияние внешнего силового воздействия на систему, так и развитие разрушения в бандаже и трубопроводе вплоть до наступления предельного состояния. Верификация разработанных моделей была проведена на основе экспериментальных данных, полученных авторами [11] при лабораторных испытаниях на статическую прочность дефектных трубопроводных элементов с КБ. Как показывают результаты сравнения, приведенные в табл. 2, численная оценка предельного давления в трубе с полуэллиптическим дефектом на внешней поверхности, усиленной бандажом из КМ, соответствует экспериментальным результатам.

Также следует подчеркнуть, что интенсификация докритической поврежденности усиливающего элемента даже без его видимого макро разрушения снижает несущую способность и эффективность разгружающего действия КБ. Из этого можно заключить, что общепринятый метод экспериментального определения эффективности ремонта трубопроводов усилением, который заключается в сравнении предельных давлений для дефектного элемента без усиления и с бандажом, определенных при лабораторных испытаниях, не в полной мере отображает его работоспособность в рабочем диапазоне давлений, так как в этом случае накопление докритической поврежденности может быть незначительным и эффективность разгружения максимальна, а по мере приближения к предельному значению P эффективность КБ снижается вплоть до значений, близких к нулю, при макро разрушении усиливающей конструкции.

Как показывают экспериментальные исследования по одноосному нагружению образцов из типичных КМ, их разрушение начинается при относительно небольших нагрузках и постепенно накапливается по мере увеличения нагрузки вплоть до полного разрушения образца. Авторами

работы [12] был предложен параметр докритической поврежденности материала ξ , представляющий собой отношение площади ΔS образовавшихся микронесплошностей к объему V , в котором они зародились:

$$\xi = \Delta S / V. (12)$$

Применение такого количественного параметра удобно при использовании методов акустической эмиссии для оценки степени докритической поврежденности материалов. В качестве примера на рис. 4 приведены данные испытаний образцов из КМ системы «эпоксидная смола–стекловолокно», из которых видна нелинейность накопления докритических микроповреждений в композите начиная с относительно небольших значений статической нагрузки. Естественно ожидать аналогичное поведение материала КБ, установленного на трубопроводный элемент, при увеличении внутреннего гидростатического давления P в трубопроводе: чем выше P , тем больше микроповреждений накапливается в материале бандажа, уменьшая его фактическое нетто-сечение. Поэтому количественное определение эффективности разгружения дефектного участка трубопровода посредством КБ необходимо основывать на характеристиках состояния трубопровода в рабочем диапазоне внутренних давлений. Для этого может быть использован численный подход, разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, который базируется на анализе напряженного состояния стенки трубопровода с геометрическими аномалиями с позиции вероятности разрушения. Под эффективностью усиления КБ EPB подразумевается относительное уменьшение вероятности разрушения в результате усиления, а именно [13]

$$EPB = 1 - p/p_0, (13)$$

где p_0, p – вероятность разрушения трубопровода до и после ремонта усилением КБ, соответственно.

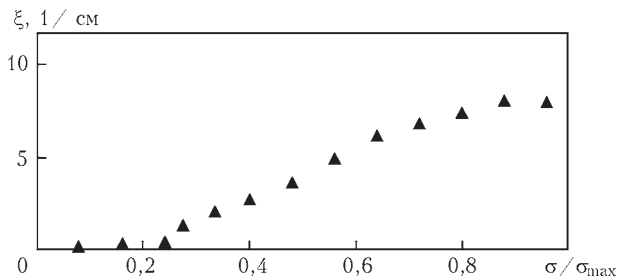


Рис. 4. Зависимость акустико-эмиссионной меры поврежденности композита ξ от приложенной квазистатической нагрузки [12]

Таблица 2. Геометрические параметры дефектных трубопроводных элементов с установленным композиционным бандажом и сравнение экспериментальных и расчетных значений давления разрушения

Номер эксперимента	Толщина стенки трубы, мм	Диаметр трубы, мм	Глубина дефекта, мм	Длина дефекта, мм	Давление разрушения бандажа (эксперимент/расчет), МПа
1	9,9	720	4,8	145	10,7/13,4
2	7,43	530	3,5	146	9,5/10,7

Вероятность разрушения конструкции вычисляется на основе результатов моделирования напряженного состояния стенки трубы путем интегрирования распределения главных напряжений σ_1 по критическому сечению S_c в рамках статистики Вейбулла:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_{S_c} \left(\frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \frac{dS_c}{S_0} \right], (\sigma_1 > A), \quad (14)$$

где S_0 – константа материала; $A = \sigma_{flow} = (\sigma_b + \sigma_r)/2$; $m = 4,0$.

Коэффициент распределения Вейбулла B определяется свойствами материала трубопровода и, как показано авторами в работе [14], может быть оценен исходя из класса прочности стали конструкции.

Использование приведенной методики численного анализа эффективности разгрузки дефектных участков магистральных трубопроводов (МТ) посредством КБ было рассмотрено в рамках следующего примера: на трубопровод из низколегированной стали 17Г1С диаметром 530 мм и толщиной стенки 11,4 мм, на внешней поверхности которого обнаружены шесть дефектов локального утонения полуэллиптической формы длиной $2s = 150$ мм (тангенциальное направление) и глубиной $a = 5$ мм, равномерно распределенных по окружности трубы. Данный участок МТ усилен КБ из стеклоткани (Е-стекло, 7 слоев) с матрицей из эпоксидной смолы, толщина бандажа – $\delta_m = 4$ мм. Свойства компонентов КМ и стали трубопровода приведены в табл. 3.

Результаты расчета вероятности разрушения трубопровода как с указанной множественной поврежденностью, так и с дефектами другой глубины (3 и 7 мм), согласно приведенным выше алгоритмам показаны на рис. 5. Из этих данных можно заключить, что наличие композиционного бандажа расширяет диапазон нулевых и низких вероятностей разрушения трубопровода не меняя при этом характера функциональной зависимости. Это объясняется тем, что без учета поврежденности, которая с ростом давления накапливается в композите, конструкция работает как разнородная контактная пара, что эквивалентно некоторому увеличению толщины трубопровода пропорционально соотношению модулей упругости металла МТ и бандажа.

Таблица 3. Механические свойства компонентов композиционного бандажа и стали трубопровода [7, 15]

Материал	E , ГПа	ν	σ_b , МПа	σ_r , МПа
Сталь 17Г1С	205	0,30	530	320
Эпоксидная смола	18,3	0,30	56	–
Е-стекло	54,8	0,25	2100	–

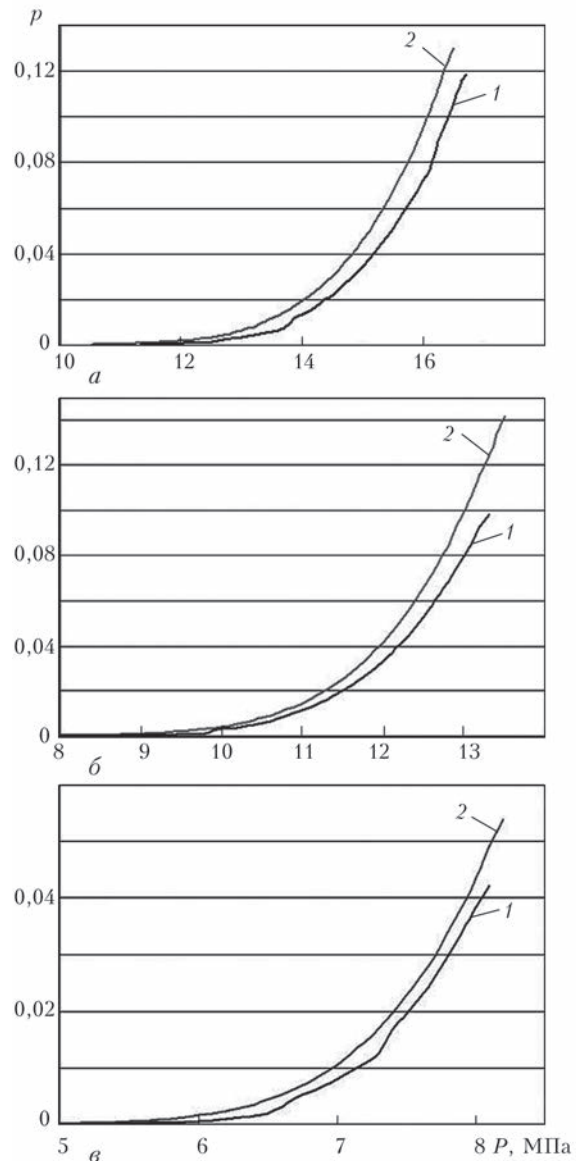


Рис. 5. Зависимости вероятности разрушения p трубопровода с многоочаговым дефектом утонения стенки различной глубины a от внутреннего давления P с усилением (кривая 1) и без усиления КБ (кривая 2), мм: а – 3, б – 5, в – 7

Относительная характеристика эффективности EPB для этих случаев эксплуатационной поврежденности МТ и ремонта усилением КБ более наглядно демонстрирует специфику разгрузки дефектного участка трубопровода (рис. 6).

Так, по мере увеличения внутреннего давления эффективность разгрузки постепенно снижается, что соотносится с накоплением поврежденности в поперечном сечении композита, равной количеству разрушенных на данном этапе нагружения конечных элементов мезоразбиения регулярных ячеек бандажа к общему количеству элементов аналогично характеристике ξ из выражения (12). Кроме того, при достаточно высоких значениях P наблюдается скачкообразное снижение эффективности разгрузки, что объ-

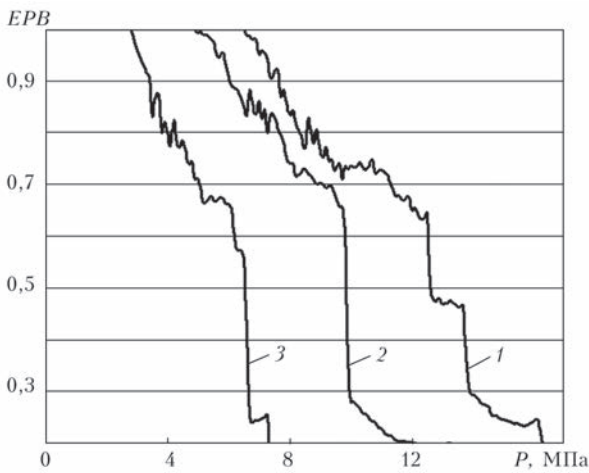


Рис. 6. Зависимость эффективности разгрузки EPB трубопровода с многоочаговым дефектом утонения стенки различной глубины a от внутреннего давления P : 1 – $a = 3$ мм; 2 – 5; 3 – 7

Таблица 4. Влияние количества слоев стеклоткани N и толщины бандажа δ_m на величину условного давления $P_{0,95}$

N	δ_m , мм	$P_{0,95}$, МПа
7	4	8,4
10	4	13,3
7	6	10,8

яняется разрушением волокон и существенным снижением несущей способности бандажа. При этом, чем больше глубина обнаруженных дефектов, тем меньшая докритическая поврежденность предшествует разрушению КБ: меньшая остаточная толщина стенки трубопровода вызывает большое локальное выпучивание в области дефекта, в результате чего разрушение бандажа при высоких внутренних давлениях более локализовано.

Для практического применения изложенной методики удобно рассматривать условное внутреннее давление в трубопроводе P_p , которое соответствует определенной величине эффективности усиления КБ. Это позволяет оптимизировать рассматриваемый метод ремонта с позиций известного диапазона эксплуатационных давлений, предписанных конкретному участку МТ. Так, в рамках численного исследования влияния толщины бандажа и количества слоев стеклоткани в нем на эффективность разгрузки дефектного участка МТ ($a = 5$ мм) показано, что при одинаковой толщине бандажа, но большем количестве слоев стекловолокна, равно как и при увеличении толщины усиливающего слоя КМ, локальное перераспределение напряжений в области дефекта обуславливает рост эффективности разгрузки (рис. 7).

Это можно количественно описать увеличением условного давления $P_{0,95}$, соответствующего эффективности $EPB = 0,95$ (табл. 4.)

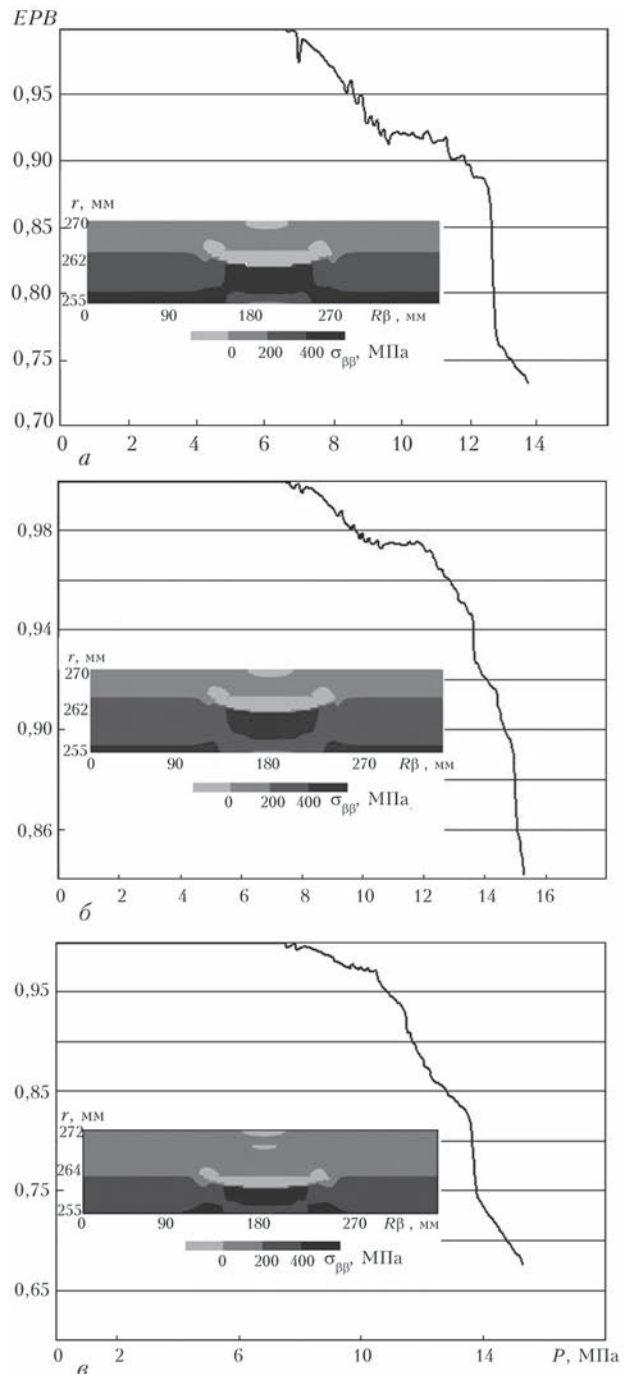


Рис. 7. Влияние количества слоев стеклоткани N в бандаже и его толщины δ_m на распределение тангенциальных напряжений в области каждого дефекта и на зависимость эффективности разгрузки EPB от внутреннего давления в трубопроводе P : а – $N = 7$; $\delta_m = 4$ мм; б – $N = 10$, $\delta_m = 4$ мм; в – $N = 7$; $\delta_m = 6$ мм

Выводы

Разработан и реализован комплекс математических моделей и компьютерных программ для оценки НДС волоконного бандажа, установленного на элемент трубопровода с множественными коррозионными повреждениями, в зависимости от внутреннего давления в трубопроводе и технологических параметров ремонта.

Предложены критерии оценки эффективности усиления элемента трубопровода с обнаруженными дефектами утонения стенки посредством КБ с учетом докритической поврежденности композита, обусловленной действием эксплуатационных нагрузок, на основе вероятностной оценки склонности трубопроводного элемента к разрушению.

Проведен численный анализ особенностей влияния технологических параметров ремонта усилением на эффективность восстановления несущей способности магистрального трубопровода с множественным коррозионным повреждением; на примере бандажа из стекловолоконного композита продемонстрирован характер влияния толщины усиливающего элемента и количества слоев стеклоткани на эффективность восстановления несущей способности дефектного участка трубопровода. Показано влияние докритической поврежденности материала бандажа на эффективность усиления участка магистрального трубопровода с обнаруженной множественной дефектностью коррозионной природы.

1. *Muhlbauer W. Kent. Pipeline Risk Management Manual. Ideas, Techniques, and Resources. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2004. – 422 p.*
2. *Махненко В.И., Великоиваненко Е.А., Олейник О.И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных конструкций // Автомат. сварка. – 2008. – № 5. – С. 5–10.*
3. *Kiefner J.F., Bruce W.A., Stephens D.R. Pipeline repair manual. – Houston: Technical Toolboxes, Inc., 1994. – 167 p.*
4. *A simple methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins / H.S. da Costa-Mattos, J.M.L. Reis, R.F. Sampaio et al. // Mechanics of Solids in Brazil 2009, H.S. da Costa Mattos & Marcilio*

Alves (Editors), Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2009.

5. *ВРД 39-1.10-013–2000* Руководящий документ по применению композитных материалов фирмы «Порсил ЛТД» (г. Санкт-Петербург) для ремонтных работ на объектах нефтяной и газовой промышленности. – М.: АО «ВНИИСТ», 2000. – 87 с.
6. *Baek J.-H., Kim W.-S., Kim Y.-P. Comparative study for various repair methods of in-service pipeline using full scale burst test // Proc. of 23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006, Netherlands.*
7. *Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Мир, 1982. – 232 с.*
8. *Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, А.С. Миленин и др. // Автомат. сварка. – № 9. – 2013. – С. 26–31.*
9. *Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.*
10. *Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев. Наук. думка, 2006. – 618 с.*
11. *Оценка эффективности композитных бандажей для восстановления дефектных участков трубопроводов / Э.Ф. Гарф, В.А. Нехотящий, Р.И. Дмитриенко и др. // Там же. – 2011. – № 7. – С. 44–49.*
12. *Назарчук З., Скальський В. Методика оцінювання докритичної пошкодженості скловолоконних композитів // Вісник Терноп. нац. техн. ун-ту. – 2011. – Спецвип. – Ч. 1. – С. 7–14.*
13. *Махненко В.И., Миленин А.С. Численный анализ степени усиления стенки трубопровода в зоне дефектов коррозионного утонения посредством муфты-бандажа // Сб. докл. конф. «Прочность материалов и конструкций», 28–30 сентября 2010 г., Киев, Украина, Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ.*
14. *Вероятностная оценка состояния трубопроводных элементов с обнаруженными дефектами утонения / Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, А.С. Миленин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 2. – С. 12–18.*
15. *Стали и сплавы. Марочник / Под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гарвасьева. – М.: Интернет инжиниринг, 2001. – 608 с.*

In order to study the characteristic features of stress-strain and limiting states of defective section of main pipeline, the load-carrying capacity of which was restored using a composite band, as well as to predict the effectiveness of repair, a respective complex of mathematical models was developed, which allows performance of required analysis of the state of this kind of composite structure, taking into account initiation and propagation of damage in micro- and macroscale. An element of main pipeline with multiple corrosion damage was used as an example to demonstrate the characteristic features of its stress-strain, damaged and limiting states, determining the effectiveness of repair by applying bands from fibrous composites.

Keywords: main pipeline, composite band, corrosion thinning defect, effectiveness

*Поступила в редакцию
26.01.2016*

**Международная конференция Немецкого союза сварки и родственных процессов DVS
«Современные тенденции в сварке
и соединительных технологиях в 21-ом веке»**

1–3 июня 2016

г. Таллин

Языки конференции: русский, английский, эстонский
Наш первый контакт для Вас, пожалуйста, свяжитесь с нами:

1. Frau Agne Plenaite agne.plenaite@gsi-baltikum.ee LT, ENG
2. Herr Vladimir Beloi vladimir.beloi@tlmk.ee EE, RUS
3. Herr Ilgonis Rungis irungis@3arodskola.lv LV, RUS
4. Frau Irina Pinneker pinneker@slv-rostock.de DE, RUS
5. Herr Sergei Boaga sergei.boaga@gsi-baltikum.ee EE, RUS
6. Herr Dr. Groß hans-g.gross@gsi-baltikum.ee DE, RUS, ENG



РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ВИМІРЮВАЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І ТРАНСПОРТНИХ АГРЕГАТІВ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

М.Г. ШУЛЬЖЕНКО, Ю.Г. ЄФРЕМОВ, В.Й. ЦИБУЛЬКО, О.В. ДЕПАРМА

Ін-т проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. 61046, м. Харків-46, вул. Пожарського, 2/10.

E-mail: root@ipmach.kharkov.ua

Описано апаратні засоби та методико-алгоритмічне забезпечення мобільного багатофункціонального вимірювально-діагностичного комплексу неруйнівного контролю і оцінки технічного стану енергетичних і транспортних агрегатів тривалої експлуатації. Наведено приклад використання мобільного комплексу на реальному об'єкті. Бібліогр. 14, рис. 6.

Ключові слова: вихрострумний датчик, перетворювач, вібраційний стан, система діагностики, спектральні характеристики

Проблема підвищення надійності і безпеки експлуатації енергоблоків з мінімальними витратами може вирішуватися з використанням засобів і новітніх інформаційних технологій діагностування вібраційного стану з визначенням небезпечних несправностей. У відповідності з нормативними документами [1–3] необхідно контролювати вібраційний стан потужних турбоагрегатів як по параметрах вібрації опор, так і по параметрах вібрації вала. На цей час стаціонарними системами вібраційної діагностики оснащено біля 10 % усіх турбоагрегатів електростанцій України. Аналіз пошкоджувальності устаткування турбін ТЕС і ТЕЦ показує, що більша частина ушкоджень допоміжного устаткування призводить до відмови турбоустановки в цілому [4]. Використання стаціонарних систем вібродіагностики для допоміжного устаткування економічно невиправдане. Для оцінки технічного стану по вібраційних параметрах турбоагрегатів, які не оснащені стаціонарними системами вібродіагностики, а також для діагностування вібростану допоміжного устаткування доцільно використовувати мобільні вимірювально-діагностичні системи.

Існуючі мобільні засоби мають не більше двох-чотирьох вимірювальних каналів, а при діагностуванні агрегатів використовуються лише параметри коливань їх необертюваних частин [5]. У зв'язку з цим, актуальним є створення мобільного багатофункціонального вимірювально-діагностичного комплексу з функціональними можливостями стаціонарної системи діагностики (багатоканальне безперервне та паралельне вимірювання вібраційних, механічних та інших ве-

личин), з можливостями вимірювання параметрів коливань обертових частин (роторів) в доступних місцях та оцінки наявності найбільш небезпечних несправностей агрегатів.

Для рішення задачі оперативного контролю, аналізу і діагностування технічного стану за вібраційними параметрами створено мобільні засоби вимірювальної техніки [6, 7]. До складу мобільного комплексу входять мобільний багатоканальний вимірювально-діагностичний комплекс «СКВД-10» на базі ноутбука (далі – комплекс) і автономні пристрої (рис. 1): вимірювач вібрації зі смуговим спектроаналізатором «ІВПА-07» (далі – віброметр); вимірювач вібрації «ІВПБ-1» з функцією визначення дисбалансу жорстких роторів (далі – прилад); тахометр оптичний «ТО-М» (далі – тахометр).

Віброметр дозволяє оперативно оцінити вібраційний стан агрегату шляхом вимірювання загального рівня й спектрального складу вібрації. Діапазон вимірювання середнього квадратичного значення (СКЗ) віброшвидкості 0,5...50,0 мм/с з дискретністю 0,1 мм/с у смузі частот 10...1000 Гц. Очікувана зведена похибка вимірювання СКЗ віброшвидкості на базовій частоті 160 Гц у межах 5 %, в діапазоні частот 20...800 Гц – у межах 10 %, на краях частотного діапазону – не більше 20 %. Тахометр дозволяє вимірювати швидкість обертання частин механізмів і машин оптичним способом. Діапазон вимірювання від 20 до 60000 об/хв (від 0,3 до 1 кГц). Прилад «ІВПБ-1» з функцією визначення дисбалансу жорстких роторів забезпечує вимірювання амплітуди оберто-



Рис. 1. Автономні пристрої: а – тахометр «ТО-М»; б – віброметр «ИВПА-07»; в –прилад «ИВПБ-1» з функцією визначення дисбалансу жорстких роторів

вої складової вібросигналу в діапазоні від 10 до 999 мкм з дискретністю індикації 1 мкм, фази у діапазоні 0...360° з дискретністю індикації 1° і частоти обертання у діапазоні 5,0...50,0 Гц (300...3000 об/хв).

Мобільні пристрої пройшли досліду експлуатацію на декількох електростанціях України і інших промислових підприємствах та використовуються персоналом для оперативного контролю та аналізу вібростану турбоагрегатів та іншого обладнання.

Мобільний багатоканальний вимірювально-діагностичний комплекс «СКВД-10» (рис. 2) складається з двох датчиків віброприскорення з напівпровідниковою мікроелектромеханічною системою (ДВК-хЭМ); шести вихорострумів датчиків віброшвидкості; двох вихорострумів датчиків вібропереміщення (переміщення); датчика мітки; восьмиканальної плати функціонального перетворення частотно-модульованого сигналу в сигнал по напрузі; 32-канальної плати АЦП Е-440 (виробництва L-Card); акумулятора; ноутбука.

Апаратні засоби комплексу забезпечують вимірювання відносних радіальних віброперемі-

шень шийок роторів валопроводу у двох ортогональних напрямках підшипника у діапазоні частот 5...500 Гц і амплітуд 10...1000 мкм; вимірювання вібрації опор підшипників у двох – трьох взаємноперпендикулярних напрямках у діапазоні частот не менших, ніж 5...1000 Гц з амплітудою виброшвидкості 0,5...16 мм/с; вимірювання вібрації опор підшипників у двох – трьох взаємноперпендикулярних напрямках в діапазоні частот не менших, ніж 0,5...2500 Гц з амплітудою віброприскорення 5 g; вимірювання переміщень об'єкта в діапазоні 0...100 мм; формування імпульсних сигналів для синхронізації вимірювання сигналів вібрації з обертанням валопроводу та вимірювання частоти обертання.

Похибка вимірювання параметрів вібрації не перевищує 5 % на базовій частоті.

Мобільний комплекс допускає приймання сигналів від штатних систем технологічного й вібраційного контролю як по цифровим інтерфейсам, так і по аналоговим каналам. Комплекс має модульну структуру. Його розширення може бути здійснено шляхом додавання відповідних датчиків з функціональними перетворювачами. Функціонування комплексу підтримується відповідним методично-програмним забезпеченням [8], що складається з модулів реєстрації, візуалізації і первинної обробки інформації, автоматизованого контролю технічного стану обладнання за параметрами вібрації, аналізу вібропараметрів та визначення дисбалансу роторів.

Функції реєстрації вібраційних та інших сигналів, їх візуалізації та первинної обробки (нормалізації, фільтрації та обчислення основних показників сигналу) у реальному часі виконує розроблений програмний модуль «RecParam». Модуль працює у двох режимах: реєстрації та візуалізації сигналів. У режимі реєстрації здійснюється опитування каналів, нормалізація, обчислення

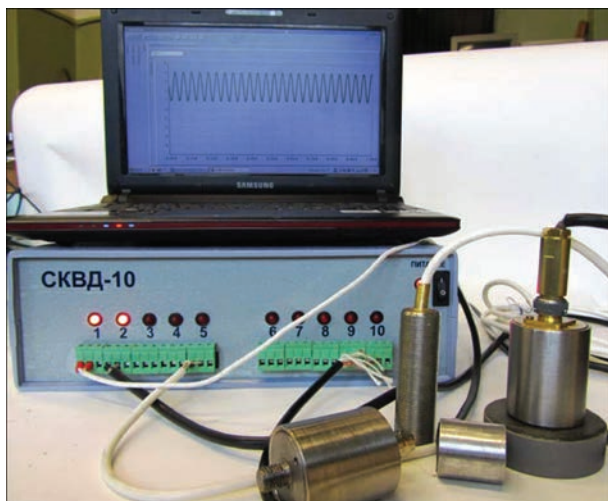


Рис. 2. Мобільний багатоканальний вимірювально-діагностичний комплекс «СКВД-10»

основних показників сигналу та реєстрація осцилограм у базу даних. Оптимальні настройки параметрів опитування вимірювальних каналів комплексу для реєстрації осцилограм наступні: період часової реалізації – 0,02 с, кількість реалізацій – 50, кількість точок у одній реалізації – 160, кількість записів осцилограм – не менше 3. Зареєстровані осцилограми користувач може експортувати в текстовий файл для подальшої роботи в інших пакетах обробки сигналів. У режимі візуалізації модуль «ResParam» виконує функції опитування каналів, нормалізації, обчислення основних показників сигналу та візуалізації у вигляді часової розгортки сигналу, його спектру та фігури Ліссажу.

Автоматизована оцінка вібраційного стану енергообладнання у реальному часі забезпечується за допомогою розробленого програмного модуля «Monitoring». Для цього щосекундно виконується обчислення по всіх контрольних точках (максимум 32 точки) паралельно (за миттєвим значенням вібропереміщень роторів і за миттєвим значенням віброшвидкості опор за 32 оберти з дискретністю 160 точок за період обертання) значень розмахів вібропереміщень і СКЗ віброшвидкості. За обчисленими значеннями контрольованих параметрів вібрації формуються на інтервалі часу 20 с обновлювані масиви. Їх значення після усереднення за перші 20 с приймаються за вихідні для подальшого використання. Значення обчислених параметрів щомиті обновлюються і порівнюються з допустимим рівнем параметрів вібрації.

По рівнях вібрації опор і валопроводу відповідно до нормативних документів устанавлюються три зони: одна – без обмеження терміну експлуатації і дві зони з обмеженими термінами експлуатації [1–3]. Інформація на екрані монітора обновлюється з секундним інтервалом, при зміні рівня вібрації і перевищенні припустимого рівня та при переході в зони з обмеженим терміном експлуатації стовпчикова діаграма змінює свій колір на жовтий чи червоний. Сформовані масиви можуть бути використані для обчислення статистичних показників зміни вібраційних параметрів за годину, добу, місяць і т.п., що дозволяє вчасно виявити повільні зміни параметрів вібрації і оцінити тенденцію розвитку вібраційного стану та вчасно попередити позаштатну ситуацію [9–11].

Основні функції програмного модуля «Monitoring»: обчислення, контроль та реєстрація розмаху вібропереміщення ротора, СКЗ віброшвидкості опор, частоти обертання та інших механічних величин; обчислення та контроль низькочастотної складової вібропереміщення ротора і віброшвидкості опор; контроль стрибка розмаху вібропереміщення ротора, СКЗ віброшвидкості опор, частоти обертання та інших механічних величин; сигналізація про зміну рів-

ня вібраційного стану обладнання; обчислення та візуалізація спектральних складових вібропереміщення ротора, віброшвидкості опор та інших механічних величин; візуалізація розмахів вібропереміщення ротора, СКЗ віброшвидкості опор та інших механічних величин у вигляді стовпчикової діаграми або їх зміни за часом; візуалізація фігур Ліссажу; реєстрація осцилограм; формування трендів параметрів вібрації та даних для аналізу причин зміни вібраційного стану.

Результати обробки інформації, що отримана за допомогою програмного модуля «Monitoring», користувач може експортувати в текстовий файл для подальшої роботи в інших пакетах обробки сигналів, надрукувати або зробити експорт зображення у графічний файл.

Особливістю балансування роторів за допомогою комплексу «СКВД-10» є використання для цього параметрів вібрації роторів поряд з параметрами вібрації опор. Метод роздільного зрівноважування [12] базується на властивості взаємозалежності, що полягає в наступному: вектори вібрації розкладають на симетричну й косиметричну складові; статична і динамічна складові дисбалансу урівноважуються роздільно: перша – по симетричних, друга – по косиметричних складових вібрації.

Процес динамічного балансування може здійснюватися у власних підшипниках або на балансувальному станку. Для цього необхідно виконати наступні операції: провести вимірювання при k -й критичній швидкості оборотних складових вібропереміщення опор або вала в підшипнику у вигляді векторів; розмістити на валу пробну систему вантажів, що відповідає k -й формі невідновженості та зробити пуск ротора із цією системою вантажів; провести вимірювання параметрів вібрації опор або вала із установленою системою пробних вантажів; по збільшенню параметрів вібрації і відомій величині пробного вантажу розрахувати балансувальну чутливість і необхідний для k -ї форми небалансу вантаж (величину та місце (кут) установки); повторити перераховані вище операції для $k = 1, 2, 3$, тобто від початкової частоти урівноважування до робочої частоти обертання вала.

Оцінка появи і розвитку вібронезбезпечних несправностей та позаштатних ситуацій виконується модулем експрес-діагностики відповідно до бази знань і бази даних. База знань – це формалізовані правила розпізнавання дефектів та їх ознаки, що сформовані на основі досвіду експлуатації турбоагрегатів (ТА) і даних досліджень про вплив механічних дефектів (несправностей) та режимних факторів на вібропараметри роторів і опор підшипників. База знань може поповнюватись, якщо отримані нові додаткові дані про вплив дефекту.

Діагностична база даних формується у відповідності до основних і допоміжних віброознак бази знань. Для цього в якості інформативних параметрів використовуються полігармонічні (інтегральні) і селективні (моногармонічні) параметри вібрації. База даних має три рівні. Перший містить осцилограми (миттєві значення вібропереміщення вала й віброшвидкості опор підшипників). Другий рівень містить інформативні масиви параметрів і ознак (спектральні, часові, кореляційні, амплітудно-частотні і фазочастотні), які сформовані за даними першого рівня блоком обробки інформації, містять неоднорідні дані і видаються в чисельній та логічній шкалі. Третій рівень містить масиви значень відносних (формалізованих) показників діагностичних ознак, які формуються блоком обробки третього рівня, де їх інформативні компоненти формалізуються (приводяться до безрозмірних значень у діапазоні від 0 до 1,0). Для цього використовуються функції належності нечіткої множини Ψ . Функції належності описуються в базі знань для всіх характерних ознак вібронезбезпечних дефектів. Функції належності, вагові коефіцієнти й базові значення параметрів можуть уточнюватися в процесі навчання (удосконалення) алгоритму діагностування і отримання додаткових даних на засадах досліджень та експертних оцінок. При цьому чутливість алгоритму щодо оцінки появи вібронезбезпечних несправностей ТА залежить від рівня початкових значень вібропараметрів (вібропереміщення вала й СКЗ віброшвидкості опор). Початкові значення вібропараметрів вибрані в межах не більше 0,5 від тих значень, по яких дозволяється експлуатація ТА без обмеження строку [1–3]. Отримані таким чином значення відносних показників ознак дефектів запам'ятовуються в третьому рівні бази даних і подаються на вхід модуля експрес-діагностики. Модуль експрес-діагностики обчислює значення ймовірності наявності того чи іншого дефекту шляхом застосування правил розпізнавання по відповідній сукупності діагностичних ознак. Алгоритми правил розпізнавання дефектів функції належності μ відповідно до множини Ψ можуть бути застосовані для оцінки появи таких дефектів, як поперечна тріщина в роторі, дисбаланс ротора, колінчатість вала, злам осі вала, ушкодження з'єднання півмуфти та порушення стійкості руху валопроводу в підшипниках ковзання.

З використанням розробленого мобільного комплексу проведено вібродослідження димососу Д-25Х2ШБ турбоагрегату К-300-240 для визначення вимог до стаціонарних засобів контролю вібраційного стану допоміжного енергообладнання. Димосос Д-25Х2ШБ призначений для відсмоктування димових газів з топок котлів на твердому паливі паропродуктивністю 640 т/год [13]. Ди-

мосос експлуатується при частотах обертання 600 і 500 об/хв. Шість датчиків віброшвидкості було встановлено спочатку на дві опори (№ 1, 2) димососа, а потім на дві опори (№ 3, 4) електродвигуна у трьох напрямках (вертикальному, поперечному та осьовому). Вимірювання та реєстрація миттєвих значень віброшвидкості проводилося паралельно по 6 каналах. Тривалість виборки 2,5 с. Період опитування 0,05 мкс. Вібраційний стан димососа задовольняє нормам вібрації [1–3], максимальне значення $V_{sl} = 1,8$ мм/с зареєстровано у вертикальному напрямку на четвертій опорі димососа. У якості прикладу наведено осцилограму віброшвидкості опори № 2 у поперечному напрямку (рис. 3) та її спектральні характеристики (рис. 4). Значний вклад у СКЗ віброшвидкості опор вносить низькочастотна вібрація (1...10 Гц), тому для контролю вібраційного стану димососа по вібропараметрах рекомендовано використовувати вимірювальні канали, що забезпечують вимірювання СКЗ віброшвидкості від 0,3 до 15 мм/с у діапазоні частот 1...1000 Гц.

Для оцінки вібростану турбоагрегату К-200-130 ЛМЗ з генератором ТГВ-200М, розробки рекомендацій щодо зниження рівня вібрації й визначення причин руйнування вкладиша підшипника першої опори проведено вібродослідження з використанням комплексу «СКВД-10». Вимірювання і реєстрація параметрів вібрації опор проводилися паралельно по п'яти каналах із синхронізацією від фазової мітки. Осцилограми віброшвидкості у трьох ортогональних напрямках (вертикальному (в), поперечному (п) і осьовому (о)) реєструвалися при номінальному навантаженні турбоагрегату. Найбільший внесок у СКЗ віброшвидкості опори в осьовому напрямку вносить перша оборотна гармонічна складова віброшвидкості (рис. 5), а на опорах № 6, № 7 у поперечному напрямку – перша й друга оборотна гармонічні складові

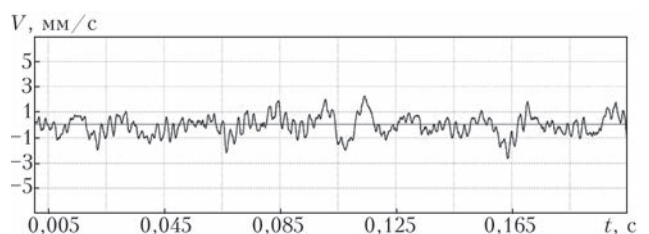


Рис. 3. Осцилограма віброшвидкості у поперечному напрямку (опора № 2)

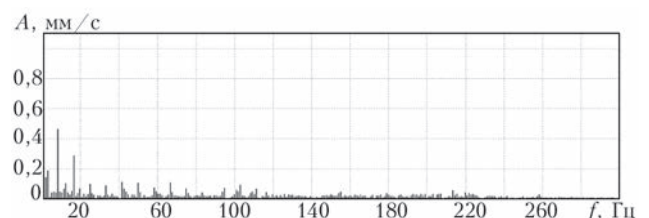


Рис. 4. Спектральні характеристики віброшвидкості у поперечному напрямку (опора № 2)

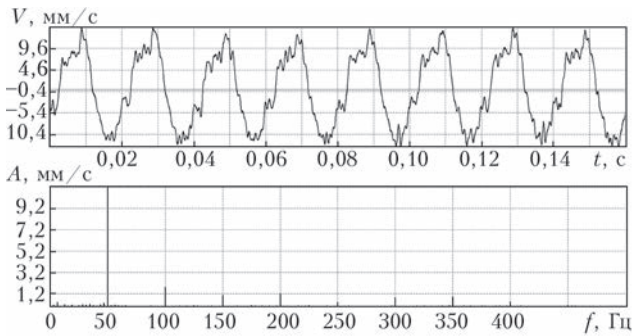


Рис. 5. Осцилограма та спектр віброшвидкості на номінальному навантаженні ТА (опора № 1, осьовий напрямок)

віброшвидкості опори. Підвищена вібрація на опорах генератора викликана електромагнітними силами статора генератора, про що свідчить наявність другої обертової гармонічної складової (100 Гц) в спектрі віброшвидкості.

Для визначення причин підвищеної вібрації першої опори виконана оцінка впливу режимів роботи на вібростан агрегату. Для цього безперервно, протягом декількох годин, на різних режимах роботи ТА (розвантаження від номінальної потужності до 130 МВт, робота при навантаженні 130 МВт, навантаження від 130 МВт до номінального навантаження і робота на ковзних параметрах) проводилося вимірювання та реєстрація віброшвидкості на опорі № 1 у трьох ортогональних напрямках (вертикальному, поперечному і осьовому) і на опорі № 2 у вертикальному й поперечному напрямках.

Підвищений рівень осьової вібрації на першій опорі залежить від паропотоку і паророзподілу. При роботі ТА на ковзних параметрах відносна зміна СКЗ віброшвидкості опори № 1 у вертикальному напрямку більша стосовно СКЗ віброшвидкості в поперечному і осьовому напрямках, що побічно свідчить про ріст вібрації вала у вертикальному напрямку. Причинами, що викликають осьову вібрацію на опорі № 1, можуть бути нерівномірність та пульсація паропотоку, експлуатаційна розцентровка опор № 1, № 2 під впливом нагріву фундаменту, тепловий прогин ротора циліндра високого тиску, дефекти у жорсткій муфті ротора високого тиску – ротора середнього тиску, віброактивність опорного вузла 1. Для уточнення причин, що викликали осьову вібрацію на опорі № 1, було проведено вимірювання вібропереміщення вала в розточці підшипника № 1. Рівень вібрації вала в опорі № 1 сумірний із зазором у підшипнику (розмах вібропереміщення досягає 800 мкм і більше в поперечному напрямку та 250...300 мкм у вертикальному напрямку). На рис. 6 зображена траєкторія відносного руху вала в розточці підшипника опори № 1. Спектр вібропереміщення вала та віброшвидкості опори збагачено

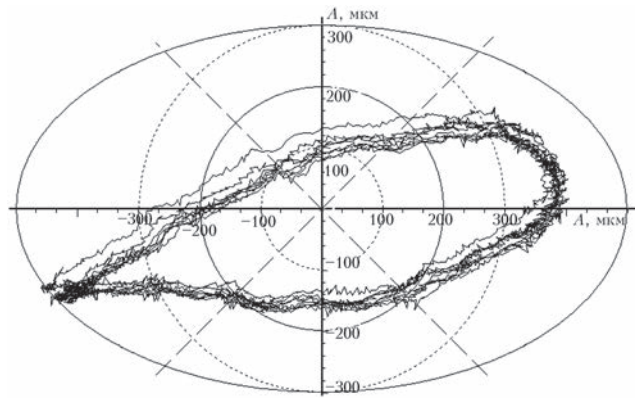


Рис. 6. Траєкторія відносного руху центра вала в розточці підшипника (опора № 1)

високочастотними складовими, що може вказувати на зачіпання ротора за нижній вкладиш підшипника.

Руйнування вкладиша першого підшипника відбувається внаслідок торкання вала об вкладиш у зв'язку зі значною вібрацією ротора, яка викликана його дисбалансом, неврівноваженими навантаженнями від паропотоку і його пульсації, розцентрованою опор. Не виключається наявність тріщини в роторі циліндра високого тиску (ЦВТ). Значна осьова вібрація першої опори породжується значними коливаннями ротора, що контактує періодично із вкладишем підшипника, і підтримується стільцем і фундаментом (значні осьові вібрації верху стільця й поперечного ригеля). Вона не є основною причиною руйнування вкладиша підшипника першої опори, хоча й сприяє цьому. Рекомендується зменшити неврівноваженість паропотоку і його пульсацію при подачі на регулюючий ступінь, провести дефектоскопію й балансування ротора ЦВТ, а також роботи зі зміцнення ригеля фундаменту для виключення перекидання стільця й розцентровки опор. Крім того, необхідно вести спостереження за трендами вібропараметрів вала і траєкторіями руху шийки ротора в розточці підшипника не тільки на опорі № 1, але й на інших опорах для аналізу вібростану після ремонту.

Висновки

Для оперативної або періодичної оцінки вібростану допоміжного устаткування енергоблоку та інших роторних агрегатів в ППМаш НАН України розроблено мобільний вимірювально-діагностичний комплекс на базі нетбука. Проведена державна метрологічна атестація вимірювальних каналів комплексу. Комплекс використано при діагностуванні вібростану роторного обладнання на декількох електростанціях України. Визначено причини підвищеної вібрації турбоагрегату та розроблено пропозиції щодо зниження її рівня. Створений вимірювач вібрації зі смуговим спектроаналізатором «ІВПА-07» використовується персоналом Хар-

ківської ТЕЦ-5 для періодичного контролю вібраційного стану турбоагрегатів.

1. *Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила / ОЕП «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики».* – Київ, 2003. – 597 с.
2. *Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений: ГОСТ 25364–97.* – Взамен ГОСТ 25364–88; Введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 6 с.
3. *Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации валопроводов и общие требования к проведению измерений: ГОСТ 27165–97.* – Взамен ГОСТ 27165–86; Введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 8 с.
4. *Плотник П.Н., Мурманский Б.Е., Руденко А.С.* Анализ повреждаемости оборудования турбин ТЭС // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Сб. тр. Междунар. науч-техн. конф. – Харьков, 2000. – С. 327–333.
5. *Гольдин А.С.* Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
6. *Мобільні засоби оцінки вібраційного стану енергетичних агрегатів / М.Г. Шульженко, Ю.Г. Єфремов, В.І. Цибулько, О.В. Депарма // Вісник НТУ «ХП».* Серія: Енергетичні та теплофізичні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 12(1055). – С. 104–110.
7. *Розроблення нових засобів оперативного контролю вібропараметрів енергетичного обладнання / М.Г. Шульженко, Ю.Г. Єфремов, В.І. Цибулько, О.В. Депарма // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доп. 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2014. – С. 87–88.*
8. *Єфремов Ю.Г.* Методико-алгоритмічне забезпечення функціонування мобільного комплексу з оцінки вібраційного стану енергетичних агрегатів // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплофізичні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХП», 2015. – № 17(1126). – С. 111–116.
9. *Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Зайцев Б.Ф.* Задачи термостойкости, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований). – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с.
10. *Технология оценки причин повышенной вибрации турбоагрегатов / Н.Г. Шульженко, Ю.Г. Ефремов, В.И. Цибулько, А.В. Депарма // Вибрації в техніці та технологія.* – 2012. – № 1 (65). – С. 89–92.
11. *Шульженко М.Г.* Діагностування вібрацій, термоміцності і ресурсу вузлів теплоенергетичних агрегатів // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доп. 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2014. – С. 4.
12. *Рунов Б.Т.* Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 351 с.
13. *Дымососы Д и ДН двустороннего всасывания.* URL: <http://www.donvent.com/ru/node/25>.
14. *Применение методов и средств вибродиагностики для оценки надежности работы турбоагрегатов / Н.Г. Шульженко, Ю.Г. Ефремов, В.И. Цибулько, А.В. Депарма // Авиационно-космическая техника и технология.* – 2013. – № 10(107). – С. 183–188.

Hardware and procedural-algorithmic support of mobile multifunctional measurement-diagnostic complex for non-destructive testing and evaluation of technical condition of energy and transport units in long-term operation are described. An example of mobile complex application in a real facility is given.

Keywords: eddy-current sensor; transducer; vibrational state, diagnostic system, spectral characteristics. 14 References, 6 Figures.

Надійшла до редакції
13.01.2016



Ассоциация «Электрод»

ООО Промышленная
компания «ХОБЭКС электрод»



при поддержке

Российского научно-технического сварочного общества и Общества сварщиков Украины

IX Международная конференция «Дуговая сварка. Материалы и качество»
Посвящается 50-летию Первой всесоюзной конференции
по сварочным материалам (1966 г.)
и 25-летию создания ассоциации «Электрод» (1990 г.).

31 мая – 3 июня 2016 г.

г. Волгоград

Тематика конференции

- Совершенствование дуговых процессов сварки
- Разработка инновационных сварочных материалов
- Технологии производства материалов и подготовка кадров
- Качество и конкурентоспособность материалов

<http://association-electrode.com>; тел./факс: (+38044) 200 63 02.

E-mail: office@association-electrode.com

ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБНИХ КОНСТРУКЦІЙ

М.Г. СТАЩУК, Я.Л. ІВАНИЦЬКИЙ, М.І. ДОРОШ

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 79060, м. Львів-60, вул. Наукова, 5. E-mail: pmainasu@ipm.lviv.ua

Систематизовано результати українських та зарубіжних дослідників у галузі науки про методи оцінювання міцності та довговічності полімерних трубних конструкцій. Наведено методи визначення напружено-деформованого стану великогабаритних полімерних трубних конструкцій з порожнистою стінкою для оцінювання їх міцності та ресурсу за реальних умов експлуатації. Сформульовані рекомендації для інженерної практики, що стосуються методів і засобів оцінювання роботоздатності полімерних трубних конструкцій. Бібліогр.18, рис. 12.

Ключові слова: напружено-деформований стан, стільникова циліндрична конструкція, полімери, мінімальна довготривала міцність, кільцева жорсткість, тріциноподібний дефект-непровар

Важливе місце серед технічних матеріалів, які широко використовують у інженерній практиці, належить полімерним матеріалам. Розрахунок міцності, надійності та довговічності елементів конструкцій з таких матеріалів становить одну з актуальних проблем сучасної науки про матеріали, зокрема в галузі оцінювання довговічності трубопровідних систем у різних експлуатаційних середовищах.

Застосування полімерних труб для інженерних мереж розпочалося з середини 1950-х років. Упродовж цього періоду нагромаджувались дані про їх експлуатаційну надійність. Продовжується постійне оновлення полімерних матеріалів та самих виробів з них. Так, широкого впровадження у виробництві набувають полімерні трубопроводи з порожнистими стінками, що забезпечує значну економію матеріалу. У зв'язку з цим дуже важливим стає розроблення методів оцінювання міцності та довговічності таких конструкцій. В європейських країнах для розв'язання цієї проблеми вводяться єдині стандарти, розроблені в рамках СЕН (European Committee for Standardization). Вирішення цієї проблеми потребує синтезу наявних результатів, відомих у світовій практиці.

Дана робота присвячена синтезу результатів розробок українських та зарубіжних вчених у цій галузі науки про матеріали. Сформульовані реко-

ментації для інженерної практики з питань, що стосуються методів і засобів оцінювання роботоздатності полімерних трубних конструкцій із порожнистою стінкою, зокрема:

- методів визначення напружено-деформованого стану (НДС) великогабаритних полімерних трубних конструкцій з порожнистою стінкою;

- оцінювання міцності та ресурсу стільникових трубних конструкцій з урахуванням реальних умов експлуатації;

- рекомендацій щодо прогнозування терміну надійної експлуатації полімерних тонкостінних виробів з порожнистою будовою стінки.

У роботі [1] наведено огляд праць з питань розрахунку напружено-деформованого та граничного станів стільникових трубних конструкцій. Проаналізовано праці, присвячені суцільним полімерним (гнучким) трубам, що експлуатуються в умовах дії ґрунтів. Виокремлено найважливіші чинники та критерії міцності для інженерних розрахунків при проектуванні стільникових труб.

Полімерні трубні конструкції великого діаметра із суцільним профілем стінки не забезпечують повною мірою оптимальної масоємкості. Тому при забезпеченні відповідної міцності та довговічності актуально використовувати легші конструкції із порожнистими стінками (рис. 1).

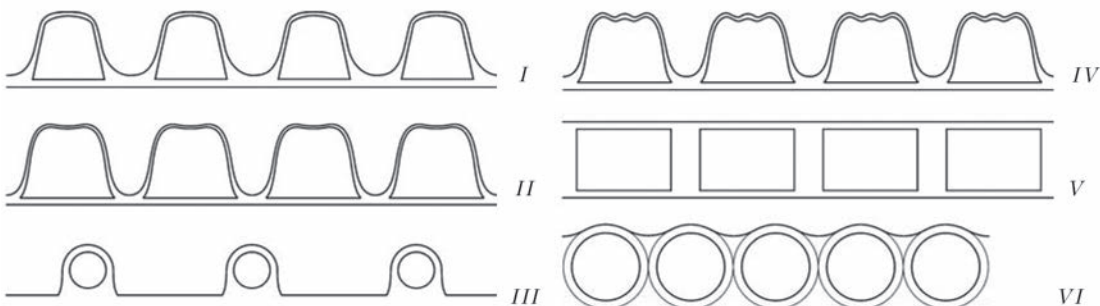


Рис. 1. Схематичне зображення різних типів (I–VI) профілів структурованої стінки у трубній конструкції

© М.Г. Стащук, Я.Л. Іваницький, М.І. Дорош, 2016

Одним із варіантів таких конструкцій є полімерні тонкостінні вироби з трубчастим профілем стінки (рис. 1, тип VI). Їх називають стільниковими [2, 3]. Стільникові конструкції виробляють компанії «Енергоресурс-Інвест» (Львів), «Євротрубпласт» (Росія), «KWH Pipe» (Фінляндія) та інші підприємства. Технологія виробництва стільникових трубних елементів – це неперервне намотування на спеціальних пристроях-барабанах поліетиленових трубок з одночасним екструзійним їх зварюванням між витками. Матеріалом, що використовується для виготовлення, є поліетилен HDPE марки ПЕ-80 та 100 [2, 3]. Труби стільникового типу зображені на рис. 2 і 3.

Традиційно виділяють низку необхідних чинників для розрахунку та проектування полімерних тонкостінних конструкцій, в тому числі й для стільникових. Особливо важливо під час розрахунку таких конструкцій врахувати наступні фактори: конструкційні особливості (геометрію конструкції та особливості будови її стінки (одношарові (рис. 4), двошарові та тришарові); фізико-механічні властивості поліетилену; вплив ґрунту (активний та реактивний тиски ґрунту); технологічні дефекти-непровари (рис. 5), що неминуче виникають під час формування порожнистих стінок труб.

Врахування цих факторів дало змогу розробити рекомендації для розрахунків, які забезпечують

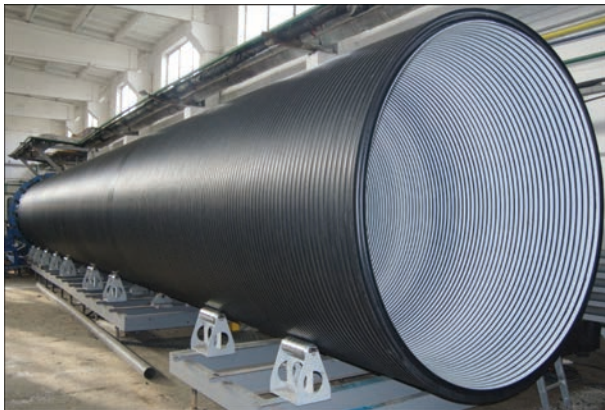


Рис. 2. Стільникова одношарова труба



Рис. 3. Поліетиленовий резервуар зі стільниковою будовою стінки

довготривалу та надійну експлуатацію стільникових конструкцій.

Полімерні конструкції з порожнистими стінками мають вигляд, зображений на рис. 1. Описано основні технології виготовлення таких конструкцій. Обґрунтовано економічну та технологічну доцільність використання полімерних трубних конструкцій з порожнистими стінками у порівнянні із суцільними.

Труби, в тому числі і стільникові, призначені для водовідведення та мереж каналізації, класифікують за кільцевою жорсткістю S_n [4], яка характеризує здатність трубопроводу протистояти тиску ґрунту та іншим зовнішнім механічним чинникам. Цей параметр є базовим класифікатором підземних каналізаційних труб, затвердженим стандартами [4–6]. Теоретично його визначають згідно формули

$$S_n = EI/D^3, \quad (1)$$

де E – модуль пружності матеріалу труби; D – середній діаметр труби; I – момент інерції профілю стінки труби на одиницю її довжини.

Для практики нормовані кільцеві жорсткості S_n приймають значення: 2; 4; 8; 16 кПа. Однією з головних вимог до трубопроводів великого діаметра, що працюють під впливом зовнішніх навантажень, є забезпечення достатньої кільцевої жорсткості конструкції. Використання стільникових труб (з порожнистими стінками) спричинене тим, що для достатньої кільцевої жорсткості потрібно використати в 2,0...2,5 рази менше матеріалу порівняно з трубою із суцільною стінкою (у вартості полімерної труби лівову частку займає сировина).

В американському штаті Техас функціонує спеціалізований інститут з вивчення властивостей полімерних труб (Plastics Pipe Institute). У 2010 р. інститут провів масштабне дослідження, яке довело можливість безпечної роботи труб з поліетилену в побутовому і промисловому водопостачанні протягом більш ніж 100 років. Дослідження включало досліди із впливу на поліетиленові тру-

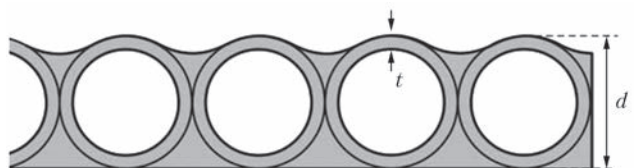


Рис. 4. Схема стінки стільникової конструкції

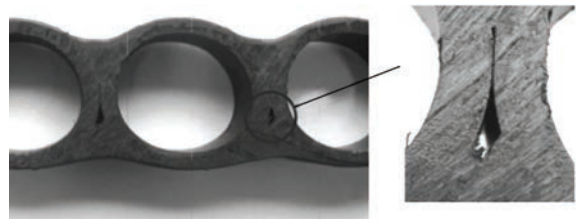


Рис. 5. Приклад реального дефекту-непровару типу тріщини у стінці стільника

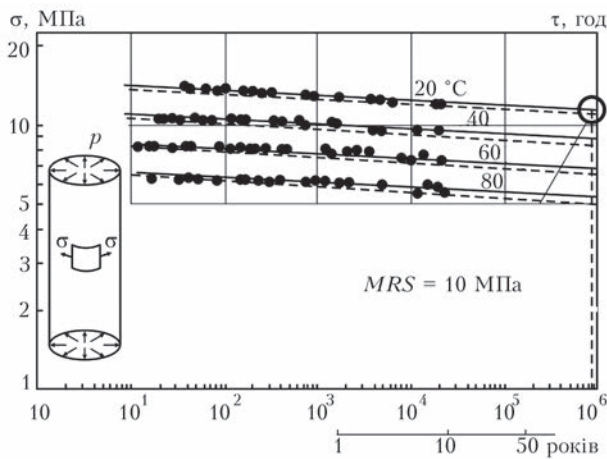


Рис. 6. Результати випробувань поліетилену марки ПЕ-100 згідно Міжнародного стандарту ISO 9080 (Фірма «Bodyscote», Німеччина)

би різноманітних середовищ, агресивних ґрунтів, дезінфікуючих засобів і різних режимів обслуговування. Проведені випробування за цих досліджень довели, що прийнятий за норму середній термін служби поліетиленових труб в системах водопостачання, що становить 50 років, значно занижений. Труби з поліетилену низького тиску можна експлуатувати протягом ста і більше років без втрати їх початкової міцності, герметичності і стійкості.

В загальному можна зробити наступну класифікацію призначень полімерних труб та трубопроводів: полімерні труби для зовнішнього водопроводу; полімерні трубопроводи в системах гарячого водопостачання і опалення; обсадні труби для свердловин; застосування полімерних труб при будівництві газопроводів; полімерні труби для каналізації; полімерні труби для кабельних ліній; полімерні труби для очисних систем і т.п.

Експлуатаційні характеристики різних полімерів значно відрізняються між собою. Найбільшою мірою ці відмінності проявляються в хімічній і температурній стійкості, а також в характеристиках міцності. Чим вище температура середовища та інтенсивність зовнішнього навантаження, тим менший термін служби полімерних трубопроводів. Залежності «температура–напруження–час» визначаються для термопластів у відповідності з Міжнародним стандартом ISO 9080:2003. В даний час класифікація трубних марок полімерів здійснюється відповідно до MRS – мінімальної тривалої міцності (Minimum Required Strength). Класифікація поліетилену за показником MRS прийнята Міжнародними стандартами ISO 12162 і ISO 9080. Згідно цих стандартів показник MRS визначається в залежності від стійкості трубних зразків, виготовлених з розглянутого матеріалу, до внутрішнього тиску й часу його впливу при заданій температурі. У випробуваннях на визначення MRS зразки труб навантажують внутрішнім тиском, внаслідок чого в стінці труби вини-

кають кільцеві напруження σ , які спричиняють руйнування. Випробування проводяться як мінімум при трьох температурах (20, 60 і 80 °C), а їх тривалість досягає 9000 год. Залежність (рис. 6) кільцевого напруження σ від часу до руйнування і температури випробування, знайдена при обробці отриманих даних, дає можливість оцінити властивості міцності полімеру і екстраполювати їх на заданий період часу. Для визначення значення MRS екстраполюють отримані показники кільцевих напружень σ (рис. 6), які поліетиленова труба може витримати протягом 50 років за температури навколишнього середовища 20 °C. Мінімальний термін служби полімерних труб 50 років прийнятий як в міжнародних, так і у вітчизняних нормативних документах (ГОСТ Р 50838–95, ПБ 12-529-03 та ін.).

Представлені графіки (рис. 6) уможливають визначення величини допустимого напруження для більш короткого терміну служби і для підвищених температур.

На основі літературних даних для лінійних деформацій при навантаженнях, статичної міцності полімерів, відповідних фізико-хімічних процесів при механічних навантаженнях в залежності від впливу часового та температурного факторів проведено [7, 8] відповідні дослідження міцності полімерних матеріалів та виробів з них. Хоча руйнування полімерів є складне та багатостадійне, однак для оцінки міцності полімерних виробів в інженерній практиці використовують два найбільш поширених розрахункових критерії [9]: забезпечення допустимих напружень ($\sigma \leq \sigma_c$) та допустимих деформацій ($\epsilon \leq \epsilon_c$). Тут, відповідно, σ_c , ϵ_c – допустимі напруження та деформації для полімерного матеріалу. Частіше поліетиленові труби розраховують за першим критерієм. На основі цього були розроблені Міжнародні стандарти ISO 12162:1995 та ISO 9080:2003. Згідно з ними допустимий тиск у поліетиленовій трубі встановлюється з умови

$$\max \sigma \leq MRS, \tag{2}$$

де σ – кільцеві напруження у стінці порожнистої труби; MRS – мінімальна довготривала міцність.

Найбільш вживаними є поліетилену марки ПЕ-80 та ПЕ-100. Відповідно до висновків роботи [10], вони мають MRS = 8 та 10 МПа. Аналогічно умові (2), критичні навантаження на стільникові трубні конструкції за складного напруженого стану оцінюємо за критерієм [1]:

$$\max \{ \sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33} \} \leq MRS, \tag{3}$$

де σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} – головні напруження у поліетиленовому виробі.

Для проектування полімерних труб з порожнистою будовою стінки за критерієм (3) необхідно попередньо оцінювати їх НДС.

Шляхом моделювання порожнистого тонкостінного елемента [11–13] конструкційно ортотропною оболонкою запропоновано методику оцінювання НДС стільникової трубної конструкції і модифіковано відповідну систему рівнянь оболонкового типу для знаходження зусиль і згинальних моментів.

Оскільки відношення товщини стінки d (рис. 4) до діаметра D (рис. 7) такої трубної конструкції становить $d/D < 1/10$, то для оцінки НДС застосували теорію оболонок [14]. Стільникову трубну конструкцію моделюємо циліндричною оболонкою (рис. 7). Оболонку вважаємо конструкційно ортотропною [14], що означає, що анізотропні властивості проявляються через стільникову будову полімерного виробу [12, 13].

В даному випадку рівняння рівноваги для цієї оболонки аналогічні рівнянням теорії оболонок з суцільними стінками, тобто

$$\begin{aligned} R \frac{\partial T_{11}}{\partial x} + \frac{\partial S_{12}}{\partial \varphi} &= -Rq_1, \quad R \frac{\partial S_{21}}{\partial x} + \frac{\partial T_{22}}{\partial \varphi} - N_2 = -Rq_2, \\ R \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} + T_{22} &= -Rq_3, \\ R \frac{\partial H_{21}}{\partial x} - \frac{\partial G_{22}}{\partial \varphi} + RN_2 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

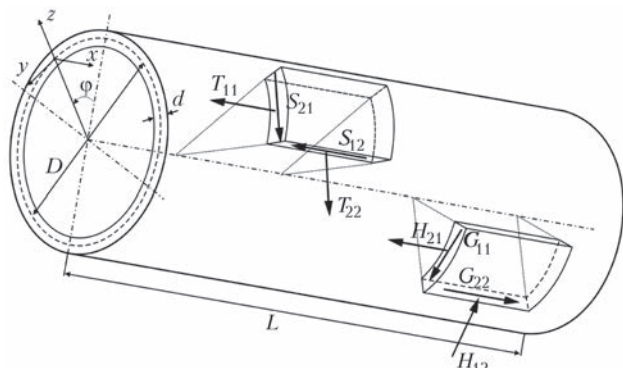


Рис. 7. Внутрішні зусилля й моменти в циліндричній оболонці товщиною d

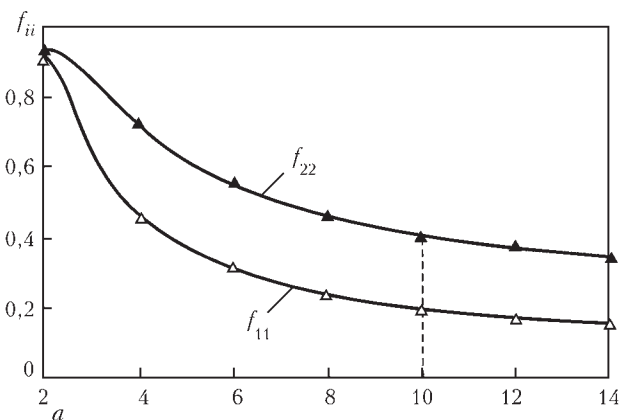


Рис. 8. Зміна параметрів $f_{ij}(s)$, $p_{ij}(s)$ від величини $s = d/t$ (розраховували для точок, позначених трикутниками або квадратиками): $a - f_{12} = f_{21} = \nu f_{11}$; $b - p_{12} = p_{21} = \nu p_{11}$

$$R \frac{\partial G_{11}}{\partial x} - \frac{\partial H_{12}}{\partial \varphi} - RN_1 = 0,$$

де q_i – компоненти зовнішнього навантаження; T_{ij} , S_{ij} та G_{ij} , H_{ij} ($i \neq j = 1, 2$) – внутрішні зусилля й моменти, додатні напрямки яких зображено на рис. 5; R – радіус серединної поверхні оболонки.

Компоненти деформацій серединної поверхні ϵ_{ii} , ω , χ_{ii} , τ виражаються через компоненти переміщень u , v , w так:

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= \partial u / \partial x, \quad \epsilon_{22} = (\partial v / \partial \varphi - w) / R, \quad \omega = \partial v / \partial x + R^{-1} \partial u / \partial \varphi, \\ \chi_{11} &= \partial^2 w / \partial x^2, \quad \chi_{22} = (\partial^2 w / \partial \varphi^2 + \partial v / \partial \varphi) / R^2, \\ \tau &= (\partial^2 w / \partial \varphi \partial x + \partial v / \partial x) / R. \end{aligned} \quad (5)$$

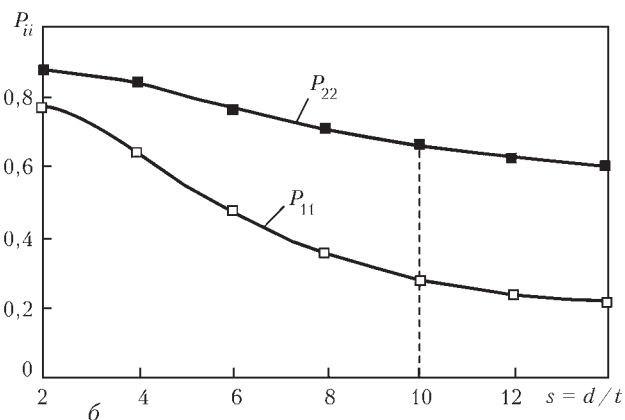
Стільникову структуру враховуємо шляхом відповідного запису рівнянь стану, які зв'язують зусилля T_{ij} , S_{ij} й моменти G_{ij} , H_{ij} з компонентами деформацій ϵ_{ii} , ω , χ_{ii} , τ . Рівняння стану записуємо за їх структурним аналогом до рівнянь теорії оболонок із суцільною стінкою [14]:

$$\begin{aligned} T_{11}(x, \varphi) &= B_{11}^* \epsilon_{11}(x, \varphi) + B_{12}^* \epsilon_{22}(x, \varphi), \\ G_{11}(x, \varphi) &= -D_{11}^* \chi_{11}(x, \varphi) - D_{12}^* \chi_{22}(x, \varphi), \quad \begin{pmatrix} 1 \rightarrow 2 \\ \leftarrow 1 \end{pmatrix} \\ S_{12}(x, \varphi) &= B_{33}^* \omega(x, \varphi), \\ S_{21} &= B_{33}^* \omega(x, \varphi) + D_{33}^* \tau(x, \varphi) / R, \\ H_{12}(x, \varphi) &= H_{21} = D_{33}^* \tau(x, \varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

де коефіцієнти B_{ij}^* , D_{ij}^* , B_{33}^* , D_{33}^* ($i, j = 1, 2$) – ефективні жорсткості для конструкційно ортотропної оболонки, якою моделюємо стільникову трубну конструкцію.

Коефіцієнти B_{ij}^* та D_{ij}^* залежать від будови стінки стільника, тобто від діаметра поліетиленової трубки d та її товщини t (рис. 4), а також – від механічних характеристик поліетилену (модуля пружності E та коефіцієнта Пуассона ν). Записуємо їх у вигляді:

$$\begin{aligned} B_{ij}^* &= f_{ij} \frac{Ed}{1 - \nu^2}, \quad D_{ij}^* = p_{ij} \frac{Ed^3}{12(1 - \nu^2)}, \\ B_{33}^* &= f_{33} \frac{Ed}{2(1 + \nu)}, \quad D_{33}^* = p_{33} \frac{Ed^3}{12(1 + \nu)}. \end{aligned} \quad (7)$$



Тут f_{ij}, p_{ij} – параметри, що враховують стільникову структуру, їх значення характеризують зменшення відповідних жорсткостей порівняно з такими ж для оболонки зі суцільною стінкою товщини d . Жорсткості B_{ij}^*, D_{ij}^* та відповідні їм параметри f_{ij}, p_{ij} визначають [12, 13] з числового експерименту з використанням методу скінченних елементів. Зміни параметрів f_{ij}, p_{ij} від величини s графічно зображено на рис. 8. Як бачимо з формули (7) та графіків на рис. 8, жорсткості B_{11}^*, D_{11}^* циліндричної оболонки стільникового типу в осьовому напрямку є меншими порівняно з такими ж (B_{22}^*, D_{22}^*) за кільцевим напрямком.

Зауважимо, жорсткості стільникової трубної конструкції для найбільш поширеної величини $s = d/t = 10$ набувають значень [13, 16]

$$B_{11}^* = \frac{0,18Ed}{1-\nu^2}, B_{22}^* = \frac{0,432Ed}{1-\nu^2}, D_{11}^* = \frac{0,251Ed^3}{12(1-\nu^2)},$$

$$D_{22}^* = \frac{0,672Ed^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (8)$$

Порівняння між собою останніх співвідношень показує, що жорсткості у відповідних напрямках різняться більше, ніж у два рази. Отже, міцність стільникової труби в осьовому напрямку є меншою порівняно з міцністю за кільцевим напрямком.

Встановивши з рівнянь (4)–(8) зусилля T_{ij} , S_{ij} й моменти G_{ij} , H_{ij} , розраховуємо напруження σ_{ij} у стінці стільника [13, 16].

Метод оцінювання НДС стільникових трубних конструкцій підтверджено експериментально. На рис. 9–11 наведено результати експериментів та теоретичних розрахунків, виконаних на основі запропонованого методу, з яких видно, що:

– жорсткості на розтяг стільникового зразка, встановлені теоретично та експериментально, корелюють між собою;

– напруження, отримані на основі експериментальних досліджень з використанням цифрової кореляції зображень та із запропонованих співвідношень, кількісно збігаються [17];

– розраховані теоретичні значення зміни висоти стільникового резервуара, навантаженого паралельними зусиллями до його твірної, добре співпадають з експериментальними замірами [13]; встановлені експериментально та розраховані критичні зусилля мають відхилення до 7 %;

– розраховане значення критичного внутрішнього тиску за статичного навантаження стільникової труби (діаметр труби $D = 768$ мм та товщина її стінки $d = 32$ мм) становило $5,3 \cdot 10^5$ Па, тоді як визначене з експерименту $5,6 \cdot 10^5$ Па.

Суттєвим стало оцінювання впливу тиску ґрунту на НДС стільникових труб для двох схем їх

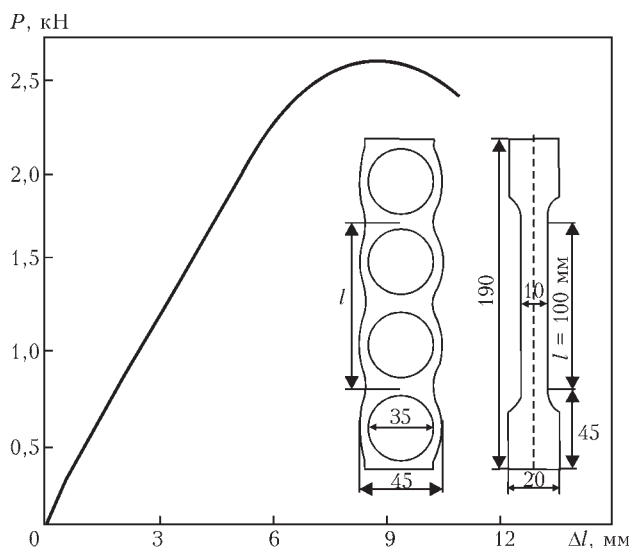


Рис. 9. Діаграма «зусилля навантаження P –видовження Δl » стільникового зразка

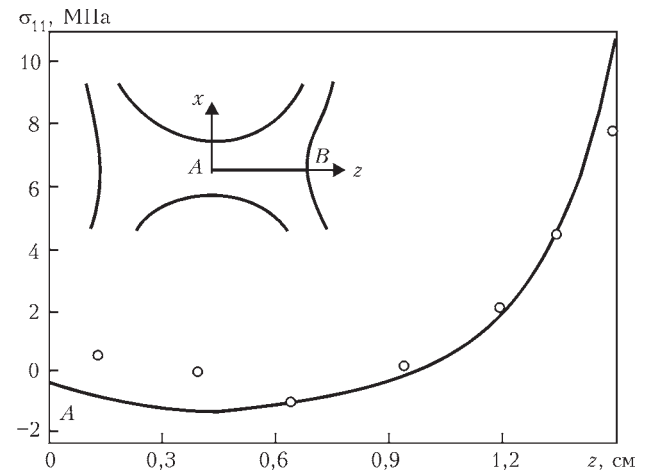


Рис. 10. Напруження σ_{11} , отримані з експериментальних даних на основі цифрової кореляції зображень (кружечки), та теоретичних розрахунків (крива) ($E = 600$ МПа, $\nu = 0,42$)

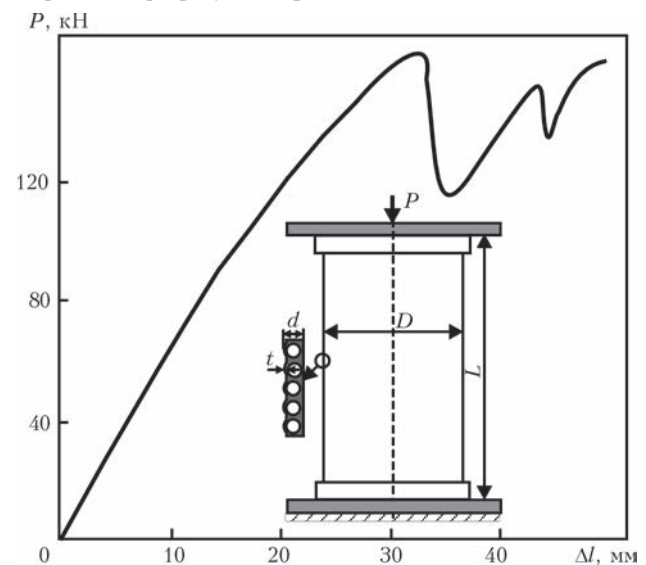


Рис. 11. Діаграма «навантаження–стискування» стільникового резервуара ($D = 618$ мм, $L = 1600$ мм, $d = 32$ мм)

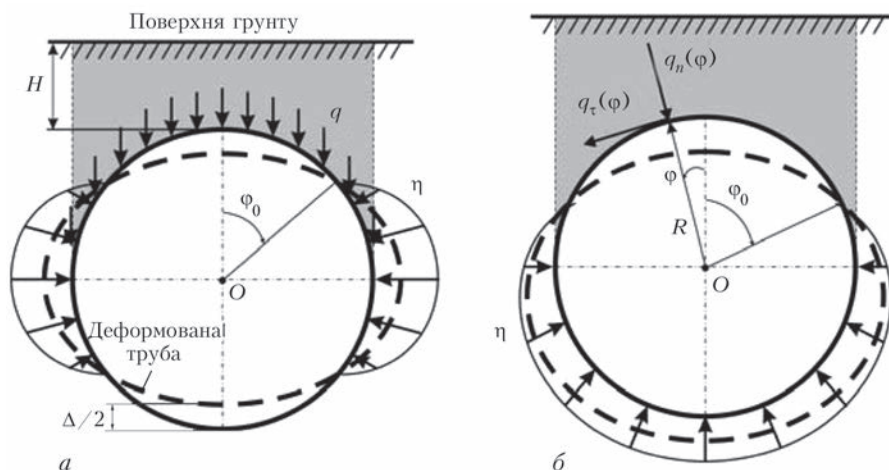


Рис. 12. Схема навантаження стільникової конструкції (поперечний переріз): $q_n(\varphi)$ та $q_\tau(\varphi)$ – нормальні та дотичні навантаження, спричинені вагою ґрунту q , розміщеного над трубою

укладання (з жорсткою (а) та м'якою (б) основою (рис. 12).

Запропонована методика оцінки НДС стільників дала можливість розробити рекомендації [15, 16] прогнозування довготривалості та надійної експлуатації основних типів стільникових конструкцій, а саме:

1. Для довгої стільникової труби, укладеної у ґрунт, початкові відносні прогини повинні задовольняти нерівності

$$\text{ПЕ-80 (MRS=8 МПа): } \frac{\Delta}{D} 100 \% \leq 4 \%,$$

$$\text{ПЕ-100: (MRS=10 МПа) – } \frac{\Delta}{D} 100 \% \leq 5\%, \quad (8)$$

де величину відносного прогину (Δ/D) розраховували згідно з будівельним стандартом [5] за формулою $\Delta/D = 0,11H\gamma / (8S_n + 0,06E_s)$.

2. Для безнапірного стільникового резервуара, вертикально укладеного у ґрунт, необхідно забезпечити умову

$$\max \left\{ \left| \frac{H\gamma D}{d} \left(-3,85 + \frac{D}{d} \right) \right|, \left| -\frac{H\gamma D}{d} \left(3 + 0,32 \frac{D}{d} \right) \right| \right\} \leq MRS, \quad (9)$$

а внутрішній тиск p за довготривалої експлуатації такої стільникової труби має задовольняти умові

$$p \leq \frac{2d \left[0,933 - \pi \left(1/2 - t/d \right)^2 \right] \times MRS}{D}. \quad (10)$$

Висновки

На основі розрахунків НДС досліджено міцність стільникових трубних конструкцій з наявними тріщиноподібними дефектами. Для цього здійснено оцінювання міцності стільникового елемента з технологічними тріщиноподібними несправками, що виникають між поліетиленови-

ми трубками під час виготовлення стільникових стінок [18]. Встановлено критичну довжину таких непроварів.

Результати такого плану мають безпосереднє практичне спрямування і можуть бути використані науковими працівниками та інженерами, які працюють у галузі проектування, технічної діагностики та експлуатації відповідальних полімерних трубних конструкцій.

1. Стацук М.Г., Дорош М.І. Методи розрахунку міцності поліетиленових труб із стільниковою стінкою (огляд) // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 5. – С. 51–62.
2. Великогабаритні полімерні конструкції з порожнистою (стільниковою) будовою стінки // Вода і водоочисні технології. – 2008. – № 5. – С. 65–66.
3. Корпорация «Энергоресурс-инвест» представляет новую технологию производства крупногабаритных полимерных изделий с пустотелой (сотовой) конструкцией стенки // Полимерные трубы. – 2007. – № 2–3. – С. 6–7.
4. ГОСТ Р 54475–2011. Трубы полимерные со структурированной стенкой и фасонные части к ним для систем наружной канализации. Технические условия. – Введ. 13.12.2011.
5. ДСТУ-Н Б В.2.5-40:2009. Проектування та монтаж мереж водопостачання та каналізації з пластикових труб. – Введ. 21.12.2009.
6. ISO 9969:2007. Thermoplastics pipes. Determination of ring stiffness. – Introduced 31.01.2008.
7. Кауш Г. Разрушение полимеров / Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 440 с.
8. Нарисава И. Прочность полимерных материалов. – М.: Химия, 1982. – 400 с.
9. Janson L.E. Plastic pipes for water supply and sewage disposal. – Stockholm: Borealis, 1996. – 156 p.
10. Характеристики сырья ПЭ-100 ПЭ-80 (PE-100 PE-80) // <http://www.etp.com.ua/?page=24>
11. Стацук М.Г., Дорош М.І. Встановлення деформованого стану тонкостінних конструкцій зі стільниковою структурою // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – № 4. – С. 67–75.
12. Стацук М.Г., Дорош М.І. Розрахунок великогабаритних поліетиленових труб з порожнистою стінкою // Там само. – 2012. – № 4. – С. 39–45.
13. Стацук М.Г., Дорош М.І. Оцінка напруженого стану полімерних трубних конструкцій з порожнистою (стільниковою) будовою стінки // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2012. – № 4. – С. 143–151.

14. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций / А.В. Кармишин, В.А. Лясковец, В.И. Мяченков, А.Н. Фролов. – М.: Машиностроение, 1975. – 376 с.
15. Стацук М.Г., Дорош М.І. Розрахунок стільникових трубопроводів великого діаметра в неоднорідному ґрунтовому середовищі // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 6. – С. 47–50.
16. Стацук М.Г., Дорош М.І. Розрахунок стільникових полімерних трубчастих елементів конструкцій для експлуатації в ґрунтах // Пробл. прочності. – 2013. – № 3. – С. 135–147.
17. Stashchuk M.H., Dorosh M.I., Sokil M.B. The analysis of service ability of polyethylene pipes and tanks with the hollow wall by strength criterion // Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – 2013. – № 759. – С. 112–118.
18. Стацук М.Г. Оцінювання допустимих розмірів непроварів стільникових тонкостінних елементів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 2. – С. 60–68.

Results obtained by Ukrainian and foreign researchers in the field of science of methods for evaluation of strength and fatigue life of polymer tubular structures were systematized. Methods are presented for determination of stress-strain state of large-sized polymer tubular structures with a hollow wall to evaluate their strength and life under real operation conditions. Recommendations for engineering practice were set forth, concerning the methods and means for evaluation of performance of polymer tubular structures. 18 References, 12 Figures.

Keywords: stress-strain state, honeycomb cylindrical structure, polymers, minimum long-term strength, ring stiffness, cracklike defect – lack-of-penetration

Надійшла до редакції
13.01.2016

ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Украина, Одесса, отель «Курортный» (www.inkurort.com)
19 – 23 сентября 2016 г.



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

Тематика конференции

Математическое моделирование:

- ♦ физических явлений, определяющих эффективность и распределение тепловложений при сварочном нагреве;
- ♦ процесса переноса металла при сварке;
- ♦ образования и гидродинамики сварочной ванны при сварке плавлением сплошных и пористых материалов;
- ♦ кристаллизации сварочной ванны, химического состава зоны проплавления и образования химической неоднородности;
- ♦ кинетики микроструктурных изменений при одно- и многопроходной сварке;
- ♦ зависимости химического состав — микроструктура — механические свойства;

- ♦ транспорта водорода в сварных соединениях;
- ♦ оценки риска образования холодных (водородных) трещин;
- ♦ остаточных напряжений и деформаций при многопроходной сварке с учетом изменений микроструктуры металла;
- ♦ деградации свойств материала сварных соединений под воздействием высоких температур, химически агрессивных сред и ядерного облучения;
- ♦ процесса идентификации дефектов в сварных соединениях при неразрушающих методах испытаний
- ♦ кинетики деформационных процессов в температурных интервалах образования горячих трещин.

Информационные технологии в сварке, наплавке и нанесении покрытий.

Рабочие языки конференции — украинский, русский, английский. Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и направить ее в Оргкомитет до 21 июня 2016 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов. Требования к оформлению тезисов. Текст следует набирать на одном из рабочих языков в редакторе WORD (кегль 12, через 1,5 интервала). Объем тезисов — 1 страница.

Основные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 21.06.2016 г. Рассылка второго информационного сообщения до 01.07.2016 г. Рассылка приглашений на конференцию и подтверждение участия до 15.07.2016 г. Оплата организационного взноса производится на основании счетов Оргкомитета или непосредственно во время проведения конференции.

Оргкомитет

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua, romanova@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2016> | www.patonpublishinghouse.com

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОГО РЕГЕНЕРАТОРА УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМЫХ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.Д. ПОЗНЯКОВ, В.П. ДЯДИН, Е.А. ДАВЫДОВ

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

Рассматриваются основные особенности, на которые следует обращать внимание при проведении диагностического обследования поврежденного нефтехимического оборудования. Отмечены наиболее типичные ошибки, которые допускаются при выполнении обследований. Табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: ремонт нефтеперерабатывающего оборудования, неразрушающий контроль, сквозные трещины в сварных соединениях

Необходимость проведения диагностического обследования была вызвана тем, что в процессе предварительного пневмонагружения регенератора обнаружилось сквозные трещины в сварных соединениях, а также в местах приварки ремонтных накладок. Выявленные повреждения ставили под сомнение возможность его безопасной эксплуатации.

В этой связи одной из основных задач, которая была поставлена заказчиком на первом этапе исследований специалистом ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, являлось определение возможности проведения ремонтно-восстановительных работ для дальнейшей безопасной эксплуатации регенератора.

Для решения этой задачи на начальном этапе обследования были проведены стандартные исследования, которые включали:

- анализ технической документации и результатов предыдущих диагностических обследований;
- визуальный контроль поврежденных мест регенератора и определение мест возможных вырезов поврежденного металла для дальнейших лабораторных исследований;
- УЗ-контроль наиболее характерных зон повреждения регенератора, оценка размеров трещин;
- определение границ поврежденных участков околосшовных зон сварных соединений, подверженных интенсивному растрескиванию.

На момент проведения обследования специалистами ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ регенератор отработал более 130000 ч.

Анализ технической документации. Принимая во внимание, что основные повреждения по результатам визуального контроля были сконцентрированы в районах монтажных сварных соеди-

нений регенератора, при изучении технической документации уделялось особое внимание особенностям монтажной сборки и необходимости проведения последующих текущих ремонтов. Опуская детальный анализ, отметим лишь наиболее важные моменты, связанные с особенностями сборки регенератора.

Монтажная сборка регенератора выполнялась спецуправлением «Химмонтаж» укрупненными элементами, поставляемыми из России. Вальцовку царг и их сборку с применением сварки проводили без последующей термообработки. Толщина основных элементов аппарата составляла 20...22 мм, что очень близко к толщинам, необходимым для термообработки сварных соединений после сварки.

Опрос персонала, участвовавшего в монтаже регенератора, позволил выявить определенные сложности при стыковке укрупненных элементов в связи с необходимостью их предварительного натяга перед сваркой. Наибольшие нестыковки в процессе сборки укрупненных элементов наблюдались в местах геометрических переходов корпуса в верхней части регенератора, где его диаметр составлял 11000 мм. Регенератор был введен на данном предприятии в эксплуатацию в 1993 г.

Технические характеристики регенератора

Давление рабочее, МПа	
вверху, не более	0,14
внизу, не более	0,17
расчетное	0,35
Температура рабочая, °С	
среды, не более	700
стенки	150
расчетная	300
Рабочая среда	дымовые газы, воздух, водяной пар, микросферический цеолитсодержащий катализатор

Геометрические размеры ($D_{нар.} \times$ толщину) элементов конструкции регенератора: обечайки 11000/9000×22; днища полусферического 11000×20; верхнего конуса 11000/9000×22; нижнего конуса 9000/1400×36; высота каждого элемента 500 мм; полный объем 1800 м³; материал 09Г2С-12; ГОСТ 19282–73.

Сведения о ремонтах.

2010 г. Обнаружено массовое растрескивание сварных соединений вварки штуцеров в корпус аппарата, выполненных аустенитным сварочным материалом. Часть штуцеров была отремонтирована, другая – удалена и заменена вставками. При вварке вставок проводился дополнительный ремонт в связи с их растрескиванием по околошовной зоне.

При проведении испытания регенератора на плотность в сварных кольцевых соединениях обечайки диаметром 11000 мм и верхнего днища выявлены сквозные трещины. В процессе проведения ремонта из корпуса регенератора в местах большого сосредоточения трещин были вырезаны участки металла для исследования и заменены вставками.

2013 г. При пневматическом нагружении регенератора с использованием акустической эмиссии (АЭ) были выявлены новые сквозные трещины в сварных соединениях обечайки диаметром 11000 мм и верхнего днища, что не позволяло закончить процесс АЭ обследования.

Для завершения испытания методом АЭ было предложено закрыть выявленные сквозные трещины с помощью приварных накладок. Это привело к дополнительному растрескиванию металла в околошовной зоне и в местах приварки накладок с дальнейшим выходом в основной металл.

Сведения об экспертных обследованиях. Регенератор допущен к эксплуатации: 2002 г. – на 2 г.; 2004 г. – на 2 г.; 2006 г. – на 2 г.; 2008 г. – на 4 г.

По результатам технического диагностирования и результатам лабораторных исследований металла темплетов, вырезанных из корпуса в 2010 г., регенератор к дальнейшей эксплуатации не допускается.

Техническим надзором завода на основании проведенного анализа результатов технического диагностирования, выполненного в 2010 г. двумя экспертными предприятиями, принято решение о допуске к эксплуатации регенератора до конца 2012 г. без изменения рабочих параметров.

В 2013 г. при проведении диагностического обследования экспертной организацией работы были временно приостановлены из-за наличия массового растрескивания сварных соединений.

Виды контроля при проведении предыдущих диагностических обследований и их основные результаты. Как следует из технической докумен-

тации, диагностические обследования с 2002 г. выполнялись несколькими организациями.

Важно отметить, что до 2010 г. ни одной из этих организаций дефекты обнаружены не были. В то же время, если судить по представленным выводам: «коррозионное растрескивание в результате длительного воздействия коррозионно-активных веществ рабочей среды и наличия остаточных напряжений в металле», является основной причиной обнаруженных в 2010 г. дефектов.

Развитие таких дефектов до их выхода на поверхность на практике является длительным процессом. На это также не было обращено внимание. Исключение могут составлять случаи перегрева и перегрузки стенки регенератора (из анализа представленной документации такие случаи не были зарегистрированы). Однако косвенным признаком возможного перегрева стенки может служить появление «отдушины» в нижней части регенератора, которая была выявлена в 2010 г. одной из диагностических организаций.

Следует отметить, что представленные данной организацией результаты контроля являются более полными и практически не вызывают сомнений за исключением нескольких позиций. Для простоты анализа результатов контроля отчета за 2010 г. они представлены в таблице.

Так, в частности, настораживают противоречия между результатами УЗК и металлографическими исследованиями: по результатам УЗК дефектов не было выявлено, а по результатам металлографии выявлены микро- и макротрещины. Причем, наличие трещин зафиксировано в основных выводах: «на внутренней поверхности корпуса регенератора имеются как макротрещины, так и микротрещины, которые находятся в стадии развития, не выходящие на внешнюю поверхность».

В то же время специалисты, проводившие УЗК-контроль, утверждают, что на проверенных участках сварных соединений и их околошовных зонах дефекты отсутствуют. Действительно, почти на всех участках, где проводился контроль, растрескивания в сварных соединениях отсутствуют. Выбор этих участков осуществлялся, очевидно, совершенно независимо от результатов обследования, которые были получены другими методами.

Возникает вопрос, каким образом осуществлялся выбор зон ультразвукового контроля. Если эти зоны выбирались специалистами по УЗК в силу собственного разумения, то результат вполне закономерен. Почему контроль не выполнялся в местах, где было обнаружено растрескивание и почему параметры контроля не были адаптированы к выявлению несплошностей типа обнаруженного растрескивания? Без проведения подобной коррекции вероятность обнаружения не будет высокой. Кроме того, совершенно очевидно, что при

Результаты контроля регенератора за 2010 г.

Вид контроля	Результаты контроля
ВК	В основном металле корпуса регенератора на отдельных участках наблюдается язвенная коррозия глубиной до 0,8 мм. На отметке 16,8 м над люком-лазом имеется вспучина диаметром до 400 мм. В сварных швах корпуса – поры, усадочные раковины и подварки. Под штуцерами Ду50, расположенными на высотных отметках 25,2 м и 16,8 м, выявлены раковины с трещиноподобными дефектами. Выборка этих дефектов показала, что глубина дефекта под штуцером на высотной отметке 25,2 м распространяется на всю толщину стенки регенератора, глубина дефекта под штуцером на высотной отметке 16,8 м достигает 9 мм. Внутри патрубков отдельных штуцеров регенератора выявлена питтинговая коррозия. Все штуцеры с дефектами были отремонтированы. При проведении испытания регенератора на плотность в сварных соединениях обечайки диаметром 11000 мм и верхнего днища были выявлены сквозные трещины. В процессе проведения ремонта из корпуса регенератора в местах большого сосредоточения трещин были вырезаны участки, которые затем были порезаны на темплеты для проведения исследований. На внутренней поверхности этих участков металл подвержен коррозионному растрескиванию.
УЗТ	Измеренные значения толщин металла элементов регенератора не выходят за пределы расчетных значений. Толщина стенки штуцеров регенератора не ниже отбраковочной.
МПД	На проконтролированных участках сварных швов дефектов не обнаружено.
ЦД	В патрубках штуцеров и в сварных швах вварки их в корпус регенератора выявлены трещиноподобные дефекты. На высотной отметке 36,4 м пять штуцеров удалены и на их место вварены вставки или накладки. На высотной отметке 25,2 м штуцер, под которым был выявлен сплошной дефект, был удален.
УЗК	На проконтролированных участках сварных швов дефектов не обнаружено.
Проведенные исследования	
Металлографические исследования	В металле вспучины выявлены микроразрушения, развивающиеся по границам зерен. На основном металле обечайки регенератора диаметром 9000 мм выявлены микротрещины.
Измерения твердости	Твердость металла регенератора находится в допустимых пределах для стали, из которой изготовлен регенератор.
Лабораторные исследования	Основной металл и сварные швы корпуса регенератора подверглись коррозионному растрескиванию в результате длительного воздействия коррозионно-активных веществ рабочей среды и наличия остаточных напряжений в металле. В основном металле и в сварных швах корпуса регенератора образовались как микро-, так и макротрещины, часть из которых сквозные. Трещины начинаются с внутренней поверхности корпуса регенератора. Ускоряющими факторами зарождения новых и развития имеющихся трещин являются произошедшие в металле корпуса регенератора структурные изменения (разложение перлитной составляющей, образование пор и цепочек пор ползучести по границам зерен, микротрещин по границам зерен) и наводороживание металла. Результаты лабораторных исследований позволяют утверждать, что на внутренней поверхности корпуса регенератора имеются и микро-, и макротрещины, которые находятся в стадии развития и не вышли на наружную поверхность. Такие трещины могут быть уверенно выявлены только с внутренней поверхности корпуса регенератора. Прочностные характеристики металла корпуса регенератора удовлетворительные.

обнаружении растрескивания в сварных соединениях программа проведения НК должна быть пересмотрена в соответствии с новой информацией.

По правилам обследования общий анализ результатов, полученных в рамках отдельных методов, проводит эксперт и он же при необходимости должен вносить изменения в план обследования. В данном случае специалист УЗК должен был получить задание на выявление несплошностей определенного типа, поскольку после вырезки и последующих лабораторных исследований такая информация стала доступной. Дополнительные места контроля также должны быть указаны экспертом исходя из конструктивных особенностей регенератора.

В нашем случае был выполнен формальный контроль на очень ограниченном количестве

участков, которые являлись просто удобными для проведения работ по УЗК и мало подходили для реальных задач диагностического обследования.

Вырезка образцов (см. приведенную выше таблицу: «Металлографические исследования»; «Лабораторные исследования»). Вырезку образцов проводили газовой резкой. В случае, когда участок вырезки располагался в зоне с высокими остаточными напряжениями, велика вероятность развития трещиноподобных дефектов от поверхности реза, т.е. они могли образоваться в процессе термической резки. Поэтому представленные выводы подлежали уточнению.

Подтверждение наличия трещиноподобных несплошностей на других участках, например, ультразвуковым исследованием, практически не оставил

бы никаких сомнений в правильности сделанных выводов и соответственно этому линия дальнейшего поведения по отношению к перспективе безопасной эксплуатации регенератора была бы более обоснованной и, следовательно, надежной.

Определение мест вырезки контрольных образцов для лабораторных исследований. Визуальный контроль поврежденных мест регенератора. Для уточнения мест вырезки образцов для контрольных проб металла с учетом высказанных замечаний специалистами ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ был проведен визуальный осмотр обнаруженных повреждений сварных соединений регенератора.

Визуальный осмотр сварных соединений проводился в то время, когда значительная часть дефектов была уже обварена накладками, что несколько затрудняло выбор мест с наиболее характерными типами повреждений сварных соединений. Вместе с тем даже в этом случае были выявлены дополнительные трещиноподобные дефекты в заводских сварных соединениях, выполненных при укрупнении цагг перед их вальцовкой (рис. 1).

Абсолютное большинство выявленных дефектов располагались в монтажных кольцевых швах и на их пересечениях в верхней части регенератора. Исключения составляли только дефекты в местах ремонтных подварок или накладок, которые развились за пределы околошовной зоны (рис. 2, 3).

Учитывая данные особенности повреждения верхней части регенератора, основное внимание при выборе мест вырезки контрольных проб металла уделялось сварным соединениям монтаж-



Рис. 1. Растрескивание по линии сплавления заводского сварного шва при укрупнении цагг обечайки диаметром 11000 мм



Рис. 2. Типичное растрескивание монтажных кольцевых швов в верхней части регенератора



Рис. 3. Растрескивание монтажных кольцевых швов в верхней части регенератора в местах ремонтных подварок

ных кольцевых швов и их околошовным зонам в местах их пересечения с продольными швами.

Выбор методов НК для предварительной оценки состояния регенератора. Принимая во внимание достаточно большое количество сквозных трещин, которые были обнаружены при выполнении АЭ испытаний, был сделан вывод, что регенератор требует обширного восстановительного ремонта. На момент обследования практически отсутствовала информация о количественных характеристиках повреждения металла корпуса реактора: геометрические размеры трещин, их расположение и преимущественные места образования. Ответы на эти вопросы были определяющими при решении задачи о возможности и целесообразности разработки технологии ремонта.

Решение поставленной задачи усложнялось следующими обстоятельствами:

- наличием достаточно большой площади для обследования, даже участки с известной поврежденностью были значительны по площади;
- отсутствием доступа к внутренней поверхности стенки регенератора;
- в связи с предыдущим обстоятельством ограниченный выбор методов НК.

Действительно, возможность выявления трещин на внутренней стороне аппарата, которая закрыта слоем торкрет бетона, существенно сужена для выявления физическими методами НК. Из всех возможных методов НК целесообразно применить только УЗ исследования. Относительно простые и дешевые методы типа капиллярного и магнитного контроля в этом случае можно использовать лишь в ограниченном объеме. Поэтому надежное выявление внутренних трещин и относительно точная оценка их геометрических размеров, которые в массе своей не выходят на наружную поверхность, требовало разработки специальных подходов к проведению УЗК.

Выводы

Программа проведения диагностического обследования, которая по формальным требованиям научно-технической документации разрабатывается

до начала работ, должна предполагать возможность ее корректировки в зависимости от текущих результатов обследования.

Эффективное использование методов НК может потребовать серьезной адаптации имеющихся (штатных) методик или даже разработки специальных.

Экономическая целесообразность проведения ремонтно-восстановительных работ зависит от сте-

пени поврежденности основного металла, находящегося вне зоны сварных соединений, и поэтому должна быть определена, что всегда предполагает выполнение значительных объемов работ НК.

Обязательным условием надежной эксплуатации является использование технологий ремонтно-восстановительных работ, позволяющих разгрузить остаточные напряжения в наиболее нагруженных поврежденных местах.

The paper presents the main features to be taken into account during diagnostic examination of damaged petrochemical equipment. The most typical errors made during examination are noted. 1 Table, 3 Figures.

Keywords: repair of petrochemical equipment, NDT, through-thickness cracks in welded joints

*Поступила в редакцию
19.01.2016*

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕЛЕЖКА КВ-1П ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ШИРИНЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ КОЛЕИ И ВЗАИМНОГО ПРЕВЫШЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ НИТЕЙ

Путеизмерительная тележка КВ-1П предназначена для сплошного автоматизированного контроля ширины железнодорожной колеи и взаимного превышения рельсовых нитей (уровня колеи) с привязкой к путевой координате. Для взаимодействия с оператором предусмотрены жидкокристаллический цветной дисплей и мембранная клавиатура. Результаты измерений сохраняются в энергонезависимую память микропроцессорного блока. Для детальной обработки результатов измерений и формирования отчетных документов разработано специализированное программное обеспечение. Определяются следующие неисправности пути: сужения и уширения колеи; перекосы и плавные отклонения уровня пути.



Основные особенности путеизмерительной тележки КВ-1П:

- индикации результатов измерения в виде цифровых значений и графических диаграмм;
- обнаружение значительных отклонений от норм содержания железнодорожного пути «на лету» непосредственно в процессе работы тележки;
- возможность ввода паспортных данных железнодорожной колеи и просмотра результатов измерений на дисплее микропроцессорного блока;
- быстрый ввод особых отметок оператора (электронные заметки).

Основные технические характеристики:

- диапазон измерения ширины колеи, мм 1500...1560
- точность измерения ширины колеи, мм 1,0
- диапазон измерения уровня колеи, мм 160
- точность измерения уровня колеи, мм 1,5
- точность измерения пройденного пути, % ±2,5
- время автономной работы, часов, не менее 7
- степень защиты по IP IP 64
- диапазон рабочих температур, °С от -25 до +50

Путеизмерительная тележка КВ-1П по техническим характеристикам, уровню исполнения и автоматизации не уступает лучшим зарубежным устройствам данного типа.

УВЕЛИЧЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО ПРОБЕГА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСНЫХ ПАР ЗА СЧЕТ ИХ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

К.Ф. БОРЯК, О.В. АФТАНЮК

Одесская гос. акад. техн. регулирования и качества. 65020, г. Одесса, ул. Кузнечная, 15. E-mail: ndi_pssem@mail.ru

Предложен новый оригинальный способ корректировки дисбаланса железнодорожных колесных пар, отличающийся от известных традиционных способов своей универсальностью и возможностью его применения в условиях существующей технологии освидетельствования колесных пар на предприятиях Украины. Практическая ценность нового способа заключается в увеличении межремонтного пробега (технического ресурса) железнодорожных колесных пар, а также в экономии материальных затрат, связанных с приобретением специализированного дорогостоящего технологического оборудования, необходимого для осуществления процедуры корректировки дисбаланса колесных пар. Библиогр. 5, рис. 4.

Ключевые слова: дисбаланс, неуравновешенность колесной пары, корректирующие грузы, балансировочные станки, технический ресурс, межремонтный пробег

По результатам многочисленных исследований [1] установлено, что техническое состояние формы профиля рабочих поверхностей железнодорожных колес и самих рельсов оказывают значительное влияние на развитие критической скорости по автоколебаниям («виляния») тележки транспортного средства в движении. На рис. 1 показаны совмещенные графики горизонтальных поперечных перемещений колесных пар во времени для двух случаев технического состояния формы профиля колес скоростного вагона: профиль нового колеса (по ГОСТ 9036) в начальном состоянии (рис. 1, а) и в изношенном (рис. 1, б).

Исходные графики получены путем компьютерного моделирования движения скоростного экипажа [2]. Из рис. 1, а видно, что для новых колес автоколебания затухают значительно (почти в два раза) быстрее, чем для изношенного профиля колес (рис. 1, б). Эти примеры подтверждают высокую чувствительность величины критической скорости к форме профиля (техническому состоянию поверхности катания колес). Величина критической (пороговой) скорости является определяющим параметром при выяснении условий устойчивости движения рельсовых экипажей. В режиме автоколебаний резко ухудшаются показатели качества хода экипажа, отбирается мощность локомотива для поддержания этих паразитных колебаний, усиливается воздействие на путь и появляется реальная угроза безопасности движения. Для каждой единицы подвижного состава, локомотива или вагона, имеется своя величина критической скорости движения. В результате, например, для грузовых вагонов с заявленной в технической документации конструкци-

онной скоростью 120 км/ч, в эксплуатации по мере износа колес приходится ограничивать скорость грузовых поездов до 70...80 км/ч ввиду повышенной опасности схода с рельсов вагонов.

Главным показателем устойчивости рельсового экипажа от схода с рельсов является отношение горизонтальной силы взаимодействия колеса и рельса Y к вертикальной нагрузке Q (рис. 2).

Для предотвращения возможности вкатывания гребня колеса на головку рельса отношение Y/Q не должно превышать 0,8 [3]. Наличие превышающего дисбаланса колесной пары может нарушить это соотношение. Интересен тот факт, что действующими на сегодня правилами ремонта [4] регламентируется

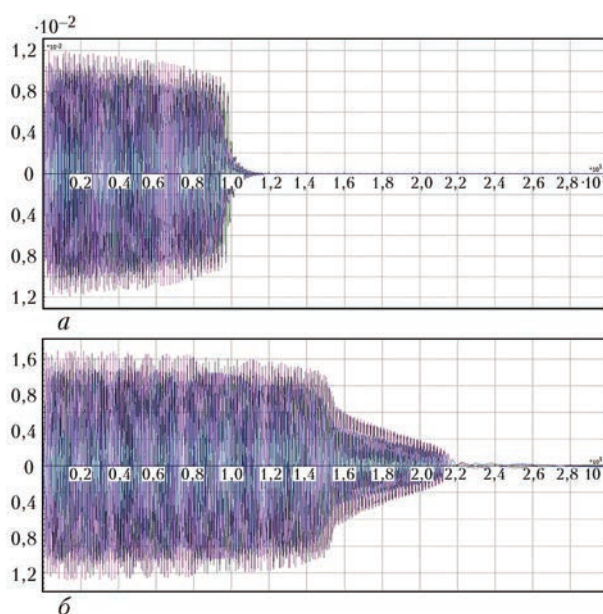


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования движения скоростного вагона: а – профиль нового колеса в начальном состоянии; б – в изношенном

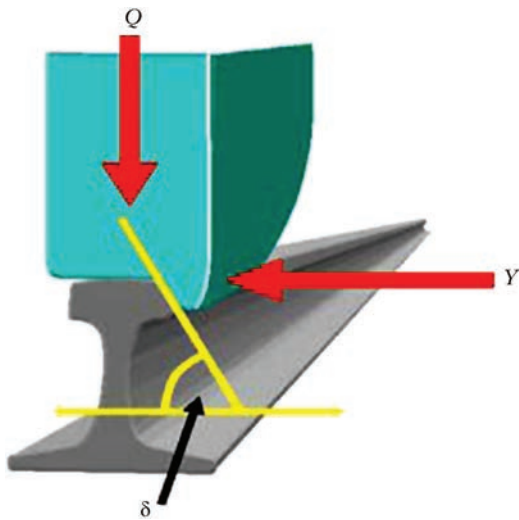


Рис. 2. Принципиальная схема взаимодействия колеса с рельсом $Y/Q = (\tan\delta - \mu)/(1 + \mu \tan\delta)$

проводить эту операцию только для тех транспортных средств, конструкционная скорость которых превышает 120 км/ч. Считается, что при меньших скоростях величина остаточного дисбаланса не оказывает существенного влияния на конструкционную прочность узлов пассажирского вагона. Это вопрос спорный, поскольку научные исследования свидетельствуют о том, что с ростом величины остаточного дисбаланса частота собственных колебаний колесной пары начинает приближаться к рабочей частоте вращения, вследствие чего наблюдается резкое увеличение амплитуды автоколебаний («виляния»). Конечно, к возникновению явления резонанса и к полному механическому разрушению поверхности профиля колес и рельс на скоростях до 120 км/ч это не приведет, но стать причиной ускоренного их износа вполне вероятно.

Сегодня скорости пассажирских перевозок уже достигли 160 км/ч, а значит, проблема контроля величины остаточного дисбаланса колесных пар становится актуальной. Снизить до нормируемых значений остаточный дисбаланс колесной пары можно только путем их динамической балансировки. Существуют две различные методики проведения балансировки колесных пар, одна – относительно центра катания обода (бандажей), другая – относительно центра вращения оси. На самом деле, проблема не в выборе способа балансировки, а в способе коррекции дисбаланса. Большинство производителей балансировочных станков для колесных пар предлагают способ коррекции дисбаланса – удаление избыточной массы металла в «тяжелом месте» с внутренней поверхности обода колеса механически при помощи фрезерного, либо токарного станка. Однако данный способ имеет существенные недостатки.

Первый недостаток – низкая ремонтпригодность колесной пары для повторной коррекции дисбаланса, которая после неравномерного из-

носа ободов колес в период эксплуатации будет, практически, невозможна. Вследствие механической обработки мы уменьшаем с обратной стороны толщину обода в одном определенном месте и тем самым снижаем эксплуатационный пробег всего колеса из-за нормируемых допусков по толщине обода.

Второй недостаток – снижение прочности колеса в месте сопряжения обода с диском, так как именно в этом месте фрезерованием вносим изменения в структуру кристаллической решетки материала обода, которая сформировалась после литья металла.

Третий – возникновение неравномерности температурного нагрева обода и диска колеса в процессе торможения колодками из-за уменьшения толщины обода в месте фрезерования. Следствием этого является разница в величине радиальных напряжений, возникающих по кругу оси вращения, с внутренней стороны сопряжения обода и диска колеса.

В данной работе предложен к рассмотрению вариант коррекции дисбаланса прямо противо-



Рис. 3. Пример закрепления корректирующего груза на оси колесной пары

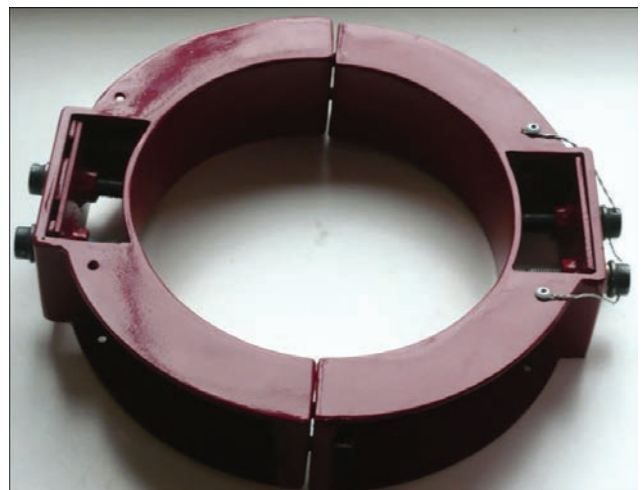


Рис. 4. Корректирующий груз

положный первому – добавление недостающей массы металла в «легком месте» путем установки корректирующих грузов на проточенной цилиндрической части оси вблизи шейки колеса (рис. 3).

Корректирующий груз представляет собой набор металлических пластин [5] различной толщины и веса, которые жестко закреплены на специальном металлическом хомуте (рис. 4).

При таком варианте коррекции дисбаланса удастся сохранить целостность литой структуры кристаллической решетки материала (металла) обода колеса и избежать указанных выше недостатков.

Преимущества предлагаемого нами варианта коррекции дисбаланса колесных пар:

- возможность многократно в ходе эксплуатации изменять не только общий вес пластин, но и положение корректирующего груза на оси при повторной коррекции дисбаланса колесной пары;

- съемный хомут может быть многократно и повторно использован на случай смены колес;

- не нарушается целостность материала ободов колес, а следовательно, и их механическая прочность после коррекции дисбаланса остается без изменений;

- экономия материальных затрат на приобретение необходимого для коррекции дисбаланса дорогостоящего фрезерного станка, а в дальнейшем, и на его техническое обслуживание;

- возможность одновременно проводить две технологические операции (балансировку и коррекцию) на одном и том же балансировочном станке, причем без каких-либо количественных ограничений процесса;

- значительно сокращаются общие энергозатраты, трудозатраты и время на проведение всех технологических операций за счет исключения их из технологического процесса;

- исключение лишнего технологического перемещения колесной пары от балансировочного

станка к фрезерному станку и обратно (для контрольного пуска);

- нет необходимости проведения испытаний на прочность бандажей колес после их фрезерования;

- экономия потребления электроэнергии (до 8 кВт/ч) при работе фрезерного станка;

- отпадает необходимость содержать в штате дополнительно вторую рабочую единицу – слесаря-фрезеровщика.

Выводы

Динамическая балансировка колесных пар позволит:

- увеличить межремонтный пробег колесных пар за счет снижения скорости деградиационных процессов износа поверхности профиля колес;

- повысить общий уровень безопасности скоростного движения за счет улучшения динамики движения вагона по рельсовому пути и лучшей управляемости вагонов;

- снизить энергозатраты (экономия топлива или электроэнергии) на тяге пассажирского состава за счет снижения сопротивления движению по рельсам.

1. *Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей* / Ю.В. Демин, Л.А. Длугач, М.Л. Коротенко, О.М. Маркова. — Киев: Наук. думка, 1984. — 160 с.
2. Демин Ю.В., Черняк А.Ю., Демин Р.Ю. Математическое моделирование и динамика подвижного состава железных дорог // *Залізничний транспорт України*. — 2007. — № 4. — С. 3–8.
3. Черняк А.Ю. Компьютерная модель для оперативного определения вероятных причин схода с рельсов грузовых вагонов. Ч. 1. // *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. — 2010. — № 5(147). — С. 40–46.
4. *Інструкція з огляду, обстеження, ремонту та формування вагонних колісних пар: №ЦЛ-ЦВ-0062*. Затв. наказом Укрзалізничці від 01.04.2005 р. № 067-Ц. — Київ, 2005. — 103 с.
5. *Декларац.* пат. UA № 57612. Балансувальний вантаж / К.Ф. Боряк, В.А. Калашник, И.И. Петков, В.И. Силкин. — Киев: УКРПАТЕНТ, 2011. — Бюл. № 5.

A new original method is proposed for correction of unbalance of railway wheel pairs, differing from the known traditional methods by its flexibility and applicability under the conditions of currently available technology of wheel pair examination in enterprises of SART of Ukraine. Practical value of the new method consists in extension of interrepair run (operating life) of railway wheel pairs, as well as saving material costs, associated with purchasing specialized expensive technological equipment, required to perform the procedure of wheel pair unbalance correction.

Keywords: imbalance, unbalance of wheel pair, offset weights, balancing machines, operating life, interrepair run

*Поступила в редакцию
04.02.2016*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ (Опыт работы ГП «Институт «УкрНИИпроект» Минэнергоугля Украины)

Э.С. КРЫЛОВ, В.А. КУЛИШ, Л.Е. ЛИТВИНЕНКО

ГП «Институт «УкрНИИпроект». 03680, г. Киев, просп. Акад. Палладина, 46/2. E-mail: ukrndipr@ukr.net

Представлен многолетний опыт работы ГП «Институт УкрНИИпроект» Минэнергоугля Украины по решению задач, позволяющих повысить работоспособность и безопасность эксплуатации объектов технологических комплексов угольных предприятий. В результате внедрения описанных в статье разработок появилась возможность более объективно оценивать сроки безопасной эксплуатации объектов; выявлять элементы несущих конструкций, которые подлежат ремонту, реконструкции или замене; осуществлять прогноз остаточного ресурса элементов конструкций; определять конструктивные, технологические и эксплуатационные ограничения, которые обеспечивают расчетный срок конструкций. Эффективное использование средств неразрушающего контроля несущих конструкций, нормативных документов для их реализации и результатов обследования фактического технического состояния значительно повышают достоверность научно-обоснованного продления сроков эксплуатации объектов повышенной опасности. Библиогр. 13, рис. 9.

К л ю ч е в ы е с л о в а: технологические комплексы угольных предприятий, работоспособность, безопасность, нормативный документ, средства неразрушающего контроля, акустическая эмиссия

Большинство объектов технологических комплексов угольных предприятий относятся к объектам повышенной опасности и эксплуатируются длительный период (до 40–60 и более лет) в сложных производственных условиях.

К таким объектам на шахтах относятся: надшахтные копры, транспортные эстакады и галереи, опоры канатных дорог, здания комплексов, горношахтное оборудование (ГШО), а на разрезах: экскаваторы непрерывного и циклического действия, отвалообразователи, перегружатели и другие горнотехнические сооружения.

Более 60 % этих объектов отработали свой нормативный срок и требуют замены. Однако, по различным объективным причинам многие предприятия не в состоянии обновить свой парк оборудования.

В этой ситуации очень актуальной является проблема определения возможности эксплуатации объектов с истекшим сроком службы и сохранения при этом их работоспособности и безопасности.

Важность этой проблемы подтверждается действующими в Украине законодательными и нормативными документами [1–4]. Поэтому одним из направлений деятельности института «УкрНИИпроект» являются работы по оценке фактического технического состояния этих объектов.

Указанное направление в разные периоды деятельности института включало следующие задачи:

– разработку отраслевых нормативно-технических документов (НТД) и стандартов, регламентирующих правила и организацию обследования, оценку и паспортизацию технического состояния объектов;

– разработку и внедрение средств контроля напряженно-деформированного состояния и дефектности несущих металлоконструкций (МК), а также защиту их от аварийных перегрузок;

– обследование, оценку и паспортизацию технического состояния зданий и сооружений штатной поверхности, а также горнотранспортных (ГТ) комплексов, эксплуатируемых на открытых разработках полезных ископаемых;

– разработку и внедрение средств контроля несущих МК оборудования для открытых горных работ и шахт с помощью перспективного акустико-эмиссионного (АЭ) метода.

До 1990-х годов деятельность института была связана с интенсивной разработкой бурых и каменных углей соответственно на разрезах Александровского и Экибастузского месторождений. Объектами исследования были транспортно-отвальные (ТО) комплексы, полученные СССР по репарациям из Германии и добычные роторные экскаваторы отечественного и зарубежного производства. В этот период были разработаны и внедрены [5]:

– «Инструкция по неразрушающему контролю МК транспортно-отвальных комплексов», которая устанавливает порядок и методику контроля, а также нормы оценки качества

при проведении дефектоскопии сварных (клепанных) соединений МК в процессе проведения ремонтных работ и эксплуатации ТО комплексов (ПО «Александряуголь»);

– «Руководство по неразрушающему контролю металлоконструкций роторных комплексов», которое включает карты дефектоскопии и характерные виды дефектов несущих элементов и узлов МК роторных комплексов, а также методики контроля их с помощью традиционных и перспективных методов НК (ПО «Экибастууголь»).

Позднее работы по стандартизации были распространены на здания и сооружения шахтной поверхности, в результате которых были разработаны:

1) РД 12.003–92. Порядок и организация обследования несущих металлических конструкций шахтных копров;

2) РД 12.011–96. Здания и сооружения технологических комплексов шахтной поверхности;

3) РД 12.005–94. Металлические конструкции шахтных копров. Требования к эксплуатации;

4) РД 12.004–93. Металлические конструкции шахтных копров. Общие требования к защите от коррозии;

5) СОУ 10.1.00174125.015:2008. Несущие металлические конструкции горного оборудования и горнотехнических сооружений. Оценка технического состояния;

6) СОУ 10.1.00174125.006:2005. Правила проведения контроля несущих металлоконструкций объектов технологических комплексов горных предприятий акустико-эмиссионным методом;

7) СОУ-Н10.1.00174125.002:2012. Порядок и организация обследования железобетонных копров;

8) СОУ-Н10.1.00174125.001:2012. Порядок и организация обследования металлических копров;

9) ГСТУ 101.00174125.002–2003. Правила обследования, оценки технического состояния технологических трубопроводов угольных предприятий.

Стандарты, разработанные после 2000 годов, учитывают требования новых законодательных и нормативных документов, использование современных средств инструментального контроля несущих конструкций и др., что позволяет при их использовании решать следующие основные задачи:

– оценивать сроки безопасной эксплуатации конструкций;

– выявлять элементы несущих конструкций, которые подлежат ремонту, реконструкции или замене;

– осуществлять прогноз остаточного ресурса элементов конструкций и обоснование продления срока их безопасной эксплуатации;

– определять конструктивные, технологические и эксплуатационные ограничения, которые обеспечивают расчетный срок службы конструкций.

В течение многих лет проводятся инструментальные обследования, оценка и паспортизация технического состояния объектов технологических комплексов угольных предприятий.

В настоящее время во Львовско-Волынском, Донецком, Луганском угольных бассейнах, а также на рудных и нерудных месторождениях полезных ископаемых Украины обследовано более 250 объектов, среди которых металлические и железобетонные шахтные копры, горнотранспортные комплексы, здания, сооружения и др. оборудование.

Многолетние исследования института позволили констатировать, что большинство аварийных ситуаций можно предотвратить, оснастив ГТ машины регистрирующей аппаратурой, позволяющей вести непрерывный контроль за техническим состоянием несущих МК в наиболее нагруженных узлах.

Поэтому для определения напряженно-деформированного состояния несущих МК в процессе обследования и защиты их от перегрузок наряду с применением широко распространенного тензометрического метода в институте были разработаны приборы и устройства специального назначения.

1) Четырехканальное устройство регистрации экстремальных режимов нагружения основных узлов МК (УРЭН). Предназначено для непрерывного слежения за текущими значениями нагрузок в элементах МК, в которых в процессе работы машины могут возникнуть опасные механические напряжения, приводящие к разрушению МК.

В устройстве использованы индуктивные дифференциальные датчики, устанавливаемые на контролируемых МК.

2) Устройство УЗНЧ-1 предназначено для регистрации виброперемещений с большими амплитудами и углами кручения, возникающими в МК.

Устройство работает в диапазоне частот от 0 до 3 Гц, которые представляют наибольшую опасность для несущих МК (ГТ) машин.

В устройстве используется электролитический преобразователь дифференциального типа, заполненный токопроводящей жидкостью.

3) Устройство для определения напряжений в МК от собственного веса МИН-А позволяет определять степень статической напряженности уже нагруженных элементов МК, а также остаточных напряжений в сварных конструкциях. Принцип действия устройства основан на способности металлов изменять свою магнитную проницаемость пропорционально прилагаемой нагрузке.

4) Устройство защиты металлоконструкций от опасных вибраций АЗОВ-3, которое позволяет автоматически отключать приводы рабочего органа и перемещения оборудования в случае возникновения в конструкции механических колебаний с амплитудой, превышающей предельно допустимый уровень вибрации.

В устройстве используется индуктивный датчик, смонтированный на конструкции.

Устройство АЗОВ-3 было внедрено на четырех типах роторных экскаваторов отечественного и зарубежного производства, которые эксплуатировались на разрезе «Богатырь» ПО «Экибастузуголь».

5) Радиотелеметрическая тензометрическая станция РТТС-5, предназначенная для беспроводной передачи информации о деформациях и вибрации элементов МК, мощности, потребляемой электродвигателями в процессе эксплуатации ГТ оборудования.

Как показывает практика, основным критерием ограничения нормативного срока эксплуатации МК является физический износ, преимущественно усталостное и коррозионное разрушение.

Научно-обоснованное продление сроков эксплуатации оборудования базируется на доминирующей в последнее время концепции «безопасного повреждения конструкций». Исходя из этой концепции, неопасно допускать эксплуатацию поврежденных конструкций, в которых дефекты, возникающие или развивающиеся в процессе эксплуатации, не приводят к отказам, т. е. нарушению функциональной работоспособности.

С учетом этого при определенных условиях можно допускать эксплуатацию в условиях регламентированного разрушения, которое для трещин соответствует области ВС (рис. 1), ширина раскрытия трещины в этой области обычно превышает 10^{-3} мм [6].

Согласно нормативам, действующим в различных отраслях промышленности, максимально допустимое уменьшение площади сечения элемента МК от коррозии колеблется от 5 до 30 % при исходной толщине элемента от 5 до 25 мм.

В настоящее время для контроля несущих МК объектов технологических комплексов широко используются современные дефектоскопы и толщиномеры, которые обеспечивают обнаружение и измерение параметров дефектов.

В соответствии с требованиями СНиП.III-18-85 и других отраслевых НТД допуски по выявленным с помощью традиционных методов НК (УЗД, радиографического и др.) дефектам сварных соединений зависят от категории швов, которые классифицированы по видам нагружения. Однако в большинстве случаев из-за сложной схемы нагружения конструкции не представляется возможным

однозначно отнести сварное соединение к той или иной категории и поэтому объективно оценить результаты дефектоскопии.

Контроль АЭ методом выгодно отличается от УЗД и других традиционных методов тем, что обнаруженные с его помощью дефекты (трещины, предельное утонение сечения МК и др.) являются развивающимися, т. е. особо опасными.

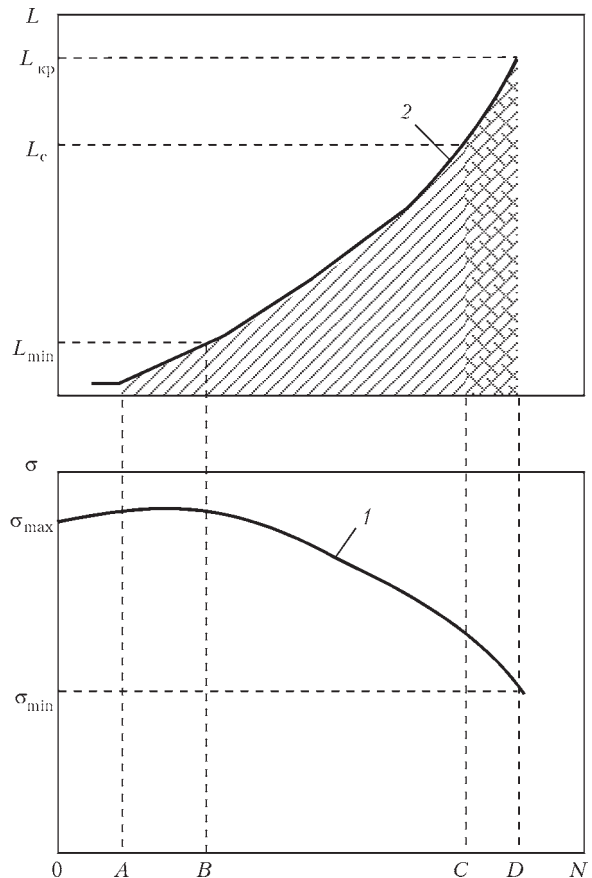


Рис. 1. Изменение остаточной прочности конструкции 1 и размеров трещин 2 в процессе циклического нагружения (L – длина трещины; N – число циклов нагружения; σ – уровень напряжений) (OD – расчетный ресурс конструкций – 100 %; OA – развитие ядра трещины – 10 % ресурса; AB – развитие субмикротрещины в микротрещину – 30 % ресурса; BC – развитие усталостной трещины – 50 % ресурса (чувствительность УЗД более 10^3 мм); CD – критический размер усталостной трещины – до 10 % ресурса (обнаруживается визуально)

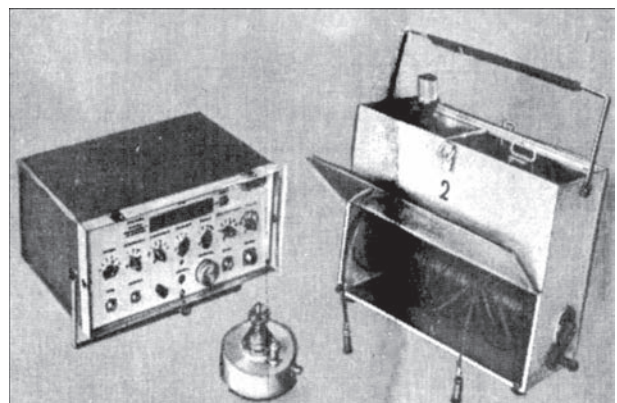


Рис. 2. Устройство УКОД

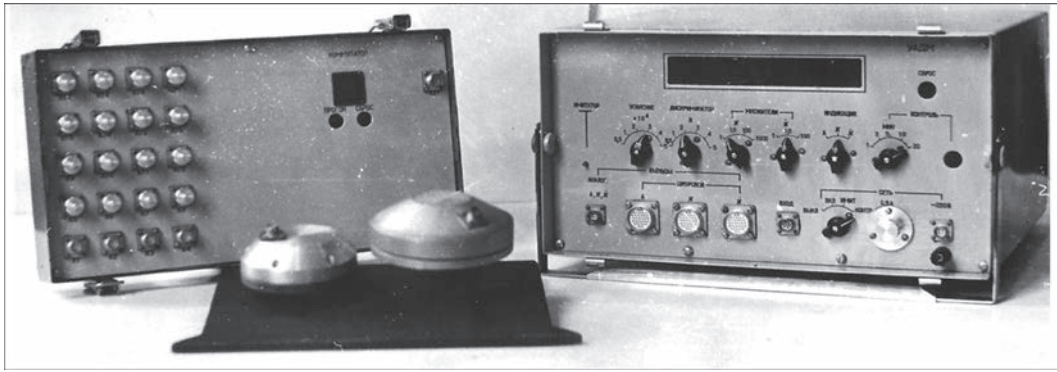


Рис. 3. Устройство УАДМ

Поэтому при использовании данного метода вопрос о степени опасности дефектов решается автоматически.

Многoletние фундаментальные исследования АЭ метода контроля, а также разработка и внедрение современных средств для его реализации в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины [7, 8] позволили стандартизировать этот метод для диагностики объектов повышенной опасности [9].

Учитывая изложенное выше, в институте «УкрНИИпроект» за последние 30 лет были разработаны и внедрены на оборудовании для открытых горных работ и шахтах несколько модификаций средств контроля с помощью АЭ метода (прошедших эволюцию от аналоговой до цифровой обработки и регистрации АЭ информации).

1) Устройство неразрушающего контроля технического состояния МК роторных экскаваторов УКОД (рис. 2).

Устройство является переносным в пылевлагозащищенном исполнении и может быть использовано для периодического обследования МК ГТ машин типа экскаваторов, отвалообразователей, ТО мостов, эксплуатируемых на угольных, сланцевых, рудных и других месторождениях.

Рабочий диапазон температур: от -40 до 40 °С.

2) Устройство встроенное контроля технического состояния МК горнотранспортных машин УАДМ (рис. 3).

Устройство УАДМ является аппаратно-программным средством и предназначено для централизованного контроля информативных параметров АЭ как в составе информационно-вы-

числительного комплекса (ИВК) ГТ машины, так и автономно для АЭ контроля технического состояния узлов МК. С его помощью возможно осуществлять контроль узлов МК путем опроса двадцати датчиков, установленных на расстоянии до 150 м от электронного блока.

Выносные элементы устройства (датчик с предварительным усилителем и имитатор) функционируют в рабочем диапазоне температур от -50 до 50 °С и выполнены в пылевлагозащищенном исполнении.

3) Комплекс АЭ контроля трубопроводов КАРАТ.

Комплекс КАРАТ состоит из переносного компьютера класса Notebook, четырех датчиков, совмещенных с предварительными усилителями, устройства обработки, имитатора, аккумулятора, сетевого блока питания и комплекта кабелей (рис. 4).

Комплекс КАРАТ является аппаратно-программным средством контроля и предназначен для обнаружения и определения местоположения утечек транспортируемого вещества (рис. 5) в технологических трубопроводах на угольных предприятиях (шахтах, обогатительных фабриках, разрезах и т. п.), а также для обнаружения и определения координат развивающихся под нагрузкой дефектов типа трещин (рис. 6) и значительных зон пластической деформации в указанных трубопроводах.

Длина участка трубопровода, контролируемого за одну установку датчиков не более 250 м.



Рис. 4. Комплекс КАРАТ

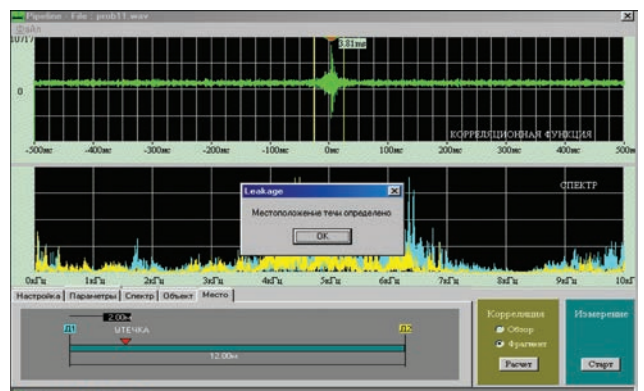


Рис. 5. Регистрация с помощью комплекса КАРАТ утечки воды из трубопровода

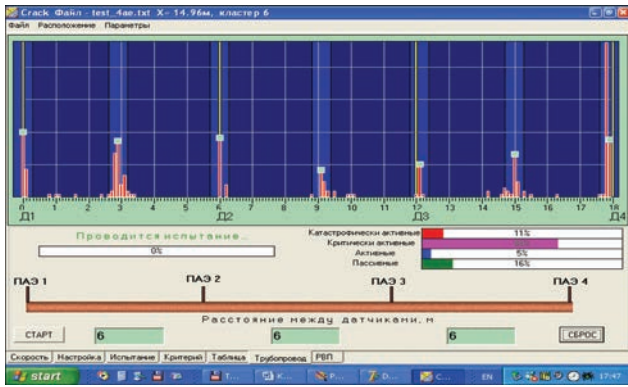


Рис. 6. Регистрация с помощью комплекса КАРАТ сигналов акустической эмиссии



Рис. 7. Комплекс КОМПАС

4) Комплекс АЭ контроля несущих МК секций шахтных механизированных крепей КОМПАС.

Комплекс КОМПАС состоит из переносного ПК класса Notebook, четырех пьезопреобразователей сигналов АЭ с предварительными усилителями, четырех тензопреобразователей деформации с резисторными мостами, двух имитаторов (импульсного и управляемого), а также блока обработки сигналов АЭ и тензометрической станции, которые расположены в одном корпусе (рис. 7).

Комплекс КОМПАС предназначен для выявления в несущих МК (новых и после эксплуатации) опасных дефектов в основном металле и сварных соединениях (рис. 8, 9), которые развиваются в процессе испытательных нагрузок шахтных механизированных крепей [10].

Работа комплекса основана на использовании метода АЭ в ультразвуковом диапазоне частот, а также тензометрического метода измерения напряженно-деформированного состояния несущих МК в процессе АЭ контроля. Ком-

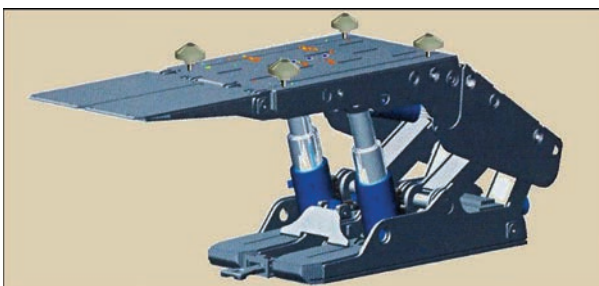


Рис. 8. Секция крепи с датчиками АЭ и тензорезисторами

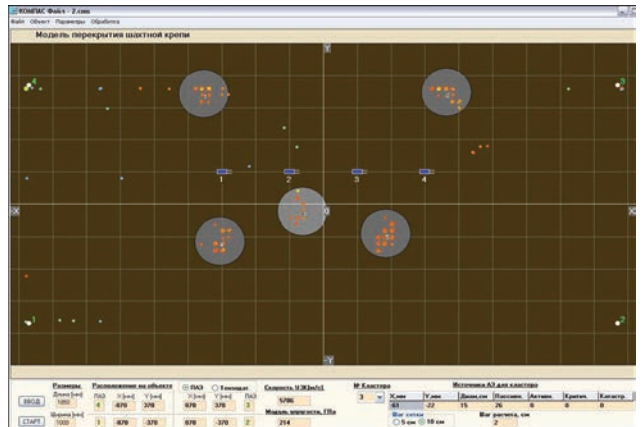


Рис. 9. Перекрытие шахтной крепи с зонами дефектов

плекс КОМПАС прошел успешные приемочные испытания на стенде СТД-2000 на Дружковском машиностроительном заводе и Государственную метрологическую аттестацию в ГП «Укрметрестандарт».

Эффект от внедрения АЭ контроля при прочностных испытаниях секций шахтных механизированных крепей достигается за счет:

- обеспечения безопасности эксплуатации оборудования;
- сокращения простоев оборудования из-за поломок (аварий) МК в результате обнаружения опасных дефектов на ранней стадии их развития;
- сокращения простоев оборудования во время обследования МК;
- сокращения трудоемкости обследования МК по сравнению с традиционными методами неразрушающего контроля.

Большинство созданных средств контроля технического состояния защищено авторскими свидетельствами и патентами [11–13].

Выводы

Для обеспечения работоспособности и безопасности эксплуатации объектов технологических комплексов угольных предприятий ГП «Институт «УкрНИИпроект» выполнены работы по:

- разработке отраслевых нормативно-технических документов и стандартов;
- разработке и внедрению средств контроля напряженно-деформированного состояния несущих МК объектов, а также защиты их от аварийных перегрузок;
- обследованию, оценке и паспортизации технического состояния объектов;
- разработке и внедрению средств контроля несущих МК объектов с помощью АЭ метода.

Эффективность использования разработанных средств контроля несущих МК и нормативных документов для их реализации позволяют осуществлять научно-обоснованное продление сроков экс-

платации объектов повышенной опасности.

На базе описанных разработок могут быть успешно реализованы подобные проекты для использования их на объектах, которые эксплуатируются в других отраслях промышленности.

1. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки». – Від 18.01.2001. № 2245-III.
2. Гірничий Закон України. – Від 06.10.1999. № 1127-XIV.
3. Постанова Кабміну України від 05.05.97 р. № 409 «Про забезпечення надійності і безпеки експлуатації будівель, споруд і інженерних мереж».
4. Постанова Кабміну України від 26.05.04 р. № 687 «Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки».
5. Крылов Э.С., Боголюбов М.В. Техническое состояние и контроль металлоконструкций горнотранспортных машин // Минуглепром СССР. Обзоры по основным направлениям развития отрасли. – Вып. 1. – М: ЦНИЭИ, 1986. – 43 с.
6. Диагностика технического состояния несущих металлоконструкций объектов технологических комплексов горнорудных предприятий / В.А. Кулиш, Э.С. Крылов, А.В. Яций, Л.Е. Литвиненко // Матер. Первой межд.

пром. конф. «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях». – Пос. Плавье (Украина). 10–14 февраля 2011 г. – С. 58–63.

7. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Индром, 2008. – 812 с.
8. Недосека А.Я., Недосека С.Я. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2008. – № 2. – С. 5–9.
9. ДСТУ 4227–2003. Руководство по проведению акустико-эмиссионного диагностирования объектов повышенной опасности.
10. Комплекс акустико-эмиссионного контроля КОМПАС / В.В. Радченко, В.А. Кулиш, Э.С. Крылов, А.В. Дроздов // Уголь Украины. – 2011. – № 1. – С. 37–41
11. Пат. № 7250. Украина. МПК G01N29/04. Датчик сигналов акустической эмиссии / Э.С. Крылов. – Оpubл. 15.09.2000, Бюл. № 4.
12. Пат. № 80929. Украина. МПК G01N29/04. Способ определения координат источников акустической эмиссии / Э.С. Крылов, А.В. Дроздов – Оpubл. 10.06.2013, Бюл. № 11.
13. Пат. № 92168. Украина. МПК G01N29/04. Способ определения координат источников акустической эмиссии / А.В. Дроздов, Э.С. Крылов. – Оpubл. 11.08.2014, Бюл. № 15.

The paper presents many years of experience of SC “Institut UkrNIIProekt” of Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine on solving the problems, which allow improvement of serviceability and safe operation of coal processing facility equipment. Introduction of described developments enabled more accurate assessment of the terms of safe service of facilities, detecting the load-carrying structure elements to be repaired, upgraded or replaced; prediction of residual life of structural elements; determination of structural, technological and operational limitations, ensuring the structure design life. Effective application of means for non-destructive testing of load-carrying structures, normative documents for their realization and results of examination of actual technical condition considerably improve the validity of scientifically-based extension of service life of high-risk facilities. 13 References, 9 Figures.

Keywords: coal processing facilities, serviceability, safety, normative document, NDT means, acoustic emission

Поступила в редакцію
19.01.2016

НОВИНИ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

16 лютого 2016 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (ІЕЗ) відбулось засідання Бюро Правління УТ НКТД, на якому були обговорені питання стосовно проведення 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (далі 8-а конференція), організації участі спеціалістів УТ НКТД у 19-й Всесвітній конференції з НК в Мюнхені, необхідності реорганізації систем неруйнівного контролю на Укрзалізниці і в галузі атомної енергетики, співпраці з Американським товариством з НК (ASNT).

В результаті обговорення були прийняті наступні рішення.

Погодитися з пропозицією О.В.Мозгового про проведення чергової 8-ї конференції з 22 по 25 листопада 2016 р. в ІЕЗ. Доручити А.Л. Шекеро підготувати перше інформаційне повідомлення про конференцію і розмістити його в інформаційних виданнях і на сайті Товариства. Для проведення підготовчих робіт с організації конференції створити робочу групу.

У відповідності з домовленістю між секретаріатом УТ НКТД і організаційним комітетом 19-ї Всесвітньої конференції з НК УТ НКТД буде мати власний інформаційний стенд на виставці. Прийняти до відома інформацію В.О. Троїцького про хід підготовки доповідей на конференцію, звернути увагу відповідальних за прийняття повних текстів доповідей про наближення дедлайну. Створити робочу групу з організації поїздки делегації українських спеціалістів на 19-у Всесвітню конференцію з НК.

Доручити керівництву УТ НКТД прийняти участь в технічній нараді з питань формування напрямків розвитку НК на залізничному транспорті і визначення головної організації з НК на Укрзалізниці.

Доручити О.В. Мозговому підготувати від імені УТ НКТД письмові пропозиції для НАЕК «Енергоатом» стосовно реорганізації системи сертифікації персоналу з неруйнівного контролю в галузі атомної енергетики і її приведення у відповідність до міжнародних стандартів.

Прийняти до відома інформацію В.О.Троїцького про видачу сертифікатів членів УТ НКТД виконавчому директору ASNT Arny Bereson та президенту ASNT Kevin Smith у відповідності з договором про двосторонню співпрацю між УТ НКТД та ASNT. Прийняти до відома інформацію М.Л. Казакевича про виконану роботу з організації в Україні секції ASNT, а також інформацію В.О. Троїцького про домовленість з дирекцією ІЕЗ про згоду на розміщення секретаріату секції у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

Доручити М.Л. Казакевичу організувати треті збори зі створення секції ASNT в режимі Skype-конференції.



ОТЧЕТНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОГРАММЕ «РЕСУРС»

22 января 2016 г. в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины состоялась отчетная конференция по итогам выполнения четвертого этапа целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин» («Ресурс») в 2013–2015 гг. В работе конференции приняло участие более 100 ученых и специалистов из различных учреждений и организаций Украины.

Открыл конференцию академик НАН Украины Л.М. Лобанов. Он сообщил, что для выполнения этой программы, которая состояла из девяти разделов и содержала 126 проектов, было привлечено 25 институтов восьми отделений НАН Украины. Часть работ была посвящена внедрению результатов предыдущих этапов программы в соответствующие отрасли промышленности Украины и дальнейшему совершенствованию мониторинга технического состояния ответственных объектов.

Были заслушаны следующие обзорные доклады научных руководителей разделов программы «Ресурс» об основных полученных результатах:

– чл.-кор. НАН Украины В.В. Харченко, руководитель раздела «Разработка методологических основ оценки и продления ресурса конструктивных элементов объектов повышенной опасности и авиакосмической техники»;

– академик НАН Украины З.Т. Назарчук, руководитель раздела «Разработка методов и новых технических средств неразрушающего контроля и диагностики состояния материалов и изделий длительной эксплуатации»;

– д-р техн. наук М.С. Хома, заместитель руководителя раздела «Разработка методов защиты от коррозии элементов конструкций объектов длительной эксплуатации»;

– чл.-кор. НАН Украины В.Н. Воеводин, руководитель раздела «Разработка эффективных методов оценки и удлинения ресурса объектов атомной энергетики»;

– академик НАН Украины А.А. Долинский, руководитель раздела «Повышение надежности и продление ресурса энергетического оборудования и систем»;

– чл.-кор. НАН Украины А.Я. Красовский, руководитель раздела «Создание систем мониторинга технического состояния трубопроводов и объектов газо- и нефтеперерабатывающей промышленности»;

– академик НАН Украины Л.М. Лобанов, руководитель раздела «Повышение надежности и продление ресурса мостов, строительных, промышленных и транспортных конструкций»;

– академик НАН Украины К.А. Ющенко, руководитель раздела «Разработка технологий ремонта и восстановления элементов конструкций объ-



Выступление академика В.В. Панасюка

ектов повышенной опасности с целью продления срока их эксплуатации»;

– академик НАН Украины В.В. Панасюк, руководитель раздела «Подготовка и печать нормативных документов и научно-технических пособий по вопросам оценки ресурса объектов длительной эксплуатации».

В процессе выполнения проектов программы «Ресурс» получены важные научные, научно-технические и практические результаты. Представим некоторые из них.

Для отрасли железнодорожного транспорта в пределах комплексного проекта, который выполняется Институтом черной металлургии, Физико-технологическим институтом металлов и сплавов и Физико-механическим институтом, разработана новая износостойкая сталь для железнодорожных колес и методы определения их эксплуатационного ресурса при наличии повреждаемой поверхности катания дефектами типа выщербина.

Создан лабораторный металлургический комплекс, который позволил изготовить опытные образцы, постоянные по химическому составу, неметаллическим включениям, вредным примесям. Параметры горячего деформирования отвечают требованиям промышленного производства колес и отличаются от базовой стали уменьшенным содержанием углерода и применением технологий дисперсионного нитридного и твердорастворимого упрочнения марганцем и кремнием. Прогнозируется существенное повышение эксплуатационного ресурса и надежности колес.

Специалистами Физико-технологического института металлов и сплавов доказано, что повышение ресурса сильно-токового скользящего контакта базируется на применении вставок на основе меди с легирующими добавками железа, хрома и углерода, которые обеспечивают повышенные трибологические свойства при меньшем износе контактного провода.

Создано технологическое оборудование, изготовлены опытные образцы вставок и проведены исследования их свойств соответственно потребностей Укрзалізничці. Совместно с предприятием, которое изготавливают контактные пластины пантографов, разработаны технологические рекомендации для промышленного освоения производства предложенных контактных деталей, которые используются на железнодорожном транспорте.

Институтом проблем материаловедения разработаны технологии изготовления элементов фрикционных пар из порошковых композиционных материалов с повышенным эксплуатационным ресурсом для тормозных устройств подвижного состава железнодорожного транспорта.

Выполнен комплекс лабораторных и стендовых испытаний физико-механических и триботех-

нических характеристик полученных материалов системы металл–стекло и опытно-промышленная апробация разработанной технологии в заводских условиях, начата подготовка к их серийному производству.

Создана система управления процессом контактной сварки оплавлением рельсов в стационарных и полевых условиях, что обеспечивает повышение эксплуатационного ресурса и надежности железнодорожных путей. Она позволяет обнаруживать отклонение параметров и предупреждать их выход за нормативные допуски, что стабилизирует процесс сварки и улучшает качество и долговечность сварных соединений. Система прошла испытание в промышленных условиях и внедряется на рельсосварочных предприятиях Укрзалізничці.

Создан комплекс технических средств для автоматизированной ультразвуковой дефектоскопии железнодорожных рельсов с использованием современных информационных технологий. Разработано математическое обеспечение микропроцессорных узлов и средств интерактивного взаимодействия оператора с органами управления ультразвукового рельсового дефектоскопа.

Проведено комплексное исследование разработанных механических и электронных узлов дефектоскопа на образцах рельсов с разными типами дефектов. Создан опытный образец автоматизированного ультразвукового дефектоскопа для применения в путевом хозяйстве Украины при выявлении дефектов в рельсах железнодорожного пути.

Для отрасли трубопроводного транспорта исследованы причины разрушения кольцевых сварных соединений магистральных газонефтепроводов. Установлено, что они обусловлены наличием технологических дефектов, главным образом коррозионных, из-за низкого качества сборочно-сварочных и эксплуатационных работ. Уровень механических свойств металла сварных соединений, в том числе после длительной эксплуатации газонефтепроводов, является достаточным и не может рассматриваться в качестве причин их разрушения. Предоставлены рекомендации относительно устранения причин возникновения дефектов и предупреждения разрушения кольцевых соединений во время эксплуатации.

Создано первое отечественное оборудование низкочастотного ультразвукового контроля состояния технологических трубопроводов и других протяженных объектов без сканирования их поверхностей. Его существенным преимуществом является дальное действие и эффективность диагностики протяженных объектов в местах, где другие методы являются непригодными. Например, в местах подземного пересечения трубопроводами автодорог и

железнодорожных путей, прохождения трубопроводов через реки и другие препятствия.

Осуществлено испытание и проведена адаптация разработанной аппаратуры к применению в производственных условиях. Установлено, что она обеспечивает повышенную чувствительность к коррозионно-эрозионным повреждениям и по точности определения расстояния к дефектам отвечает лучшим зарубежным аналогам.

Институтом электросварки разработана система непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга технического состояния высокотемпературных компонентов энергетического оборудования. Она позволяет на основе данных акустической эмиссии в реальных условиях эксплуатации конструктивных элементов определить предразрушительную нагрузку материала в любой момент времени независимо от срока наработки и колебаний температуры. Система внедрена в промышленную эксплуатацию для мониторинга паропроводов горячего перегрева пара энергоблока № 1 Киевской ТЭЦ-6. Также проводятся работы относительно ее приложения для непрерывного мониторинга барабана котла на Киевской ТЭЦ-5.

Создан комплекс технических мероприятий для высокочастотной и оптико-акустической диагностики композитных элементов конструкций авиакосмической техники. Комплекс включает сверхвысокочастотный рефлектометр миллиметрового диапазона длин волн, оптико-акустический интерференционный коррелятор и программное обеспечение для выявления в реальном времени расслоений и других внутренних дефектов в композитах. Проведено исследование выявления дефектов в композитных образцах многослойной и ячеистой структуры. Запланировано испытание разработанного комплекса технических средств сверхвысокочастотной и опти-

ко-акустической диагностики в производственных условиях на ГП «Антонов» и КБ «Южное».

Разработана технология диагностики методом электронной широгрaфии элементов авиационных конструкций из металлических и композиционных материалов. Ее эффективность подтверждена исследованиями как на тестовых образцах, так и на натуральных элементах обшивки фюзеляжа крыла самолета. Она может использоваться при производстве конструкций, а также при их эксплуатации и ремонте. В настоящее время технология внедряется для диагностики компонентов авиационного оборудования на ГП «Антонов».

Разработана гибридная технология, которая совмещает электронно-лучевую сварку и сварку трением с перемешиванием для возобновления ресурса конструкций авиационной и космической техники из алюминиевых и магниевых сплавов. Разработан типоразмерный ряд инструментов и методология предварительной обработки трением с перемешиванием поверхностных слоев, что позволяет получить мелкозернистую структуру сплавов и значительно повысить прочность соединений после электронно-лучевой сварки. Гибридная технология внедрена на предприятии «Мотор-Січ».

Суммарный ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов проектов программы «Ресурс» составляет десятки миллионов гривен в год. В целом по проектам программы получено много других полезных результатов. Эти результаты являются актуальными и дают основание считать целесообразным продолжение работы программы на следующем этапе.

С материалами выполнения программы «Ресурс» можно ознакомиться в открытом доступе по ссылке: <http://patonpublishinghouse.com/compilations/resurs2015.pdf>.

*А.Т. Зельниченко,
канд. физ.-мат. наук*

Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей. — Київ: Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. — 816 с. (електронне видання <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations#winresurs2015>).

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2013–2015 рр., до реалізації якої було залучені інститути НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин



КАЛЕНДАРЬ ВЫСТАВОК И КОНФЕРЕНЦИЙ по НК в 2016 г.

Дата	Место проведения	Название
23–25 марта	Львов, Украина	5-я специализированная выставка «Металл. Оборудование. Инструмент–2016»
29–31 марта	Киев, Украина	3-я Международная специализированная выставка «Киевская техническая ярмарка–2016»
11–14 апреля	Луизианна, США	25-й исследовательский симпозиум Американского общества по неразрушающему контролю
27–29 апреля	Астана, Казахстан	Казахстанская Международная выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»
17–19 мая	Мендзыздрое, Польша	22-я научно-техническая конференция сварщиков «Прогресс, инновации и требования к качеству в сварочных процессах»
27–29 мая	Запорожье, Украина	Выставка «Машиностроение. Metallургия»
13–15 июня	Киев, Украина	Международная конференция «Современные технологии сварки»
13–17 июня	Мюнхен, Германия	19-я Международная выставка и конференция по неразрушающему контролю NDT
6–8 сентября	Екатеринбург, Россия	Международная специализированная выставка приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля «Дефектоскопия»
13-15 сентября	Париж, Франция	ESOPЕ-2015 «Строительство и ресурс оборудования, работающего под давлением. Главные проблемы»
19–23 сентября	Одесса, Украина	8-я Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии»
20–23 сентября	Место проведения будет уточнено	16-я Международная научно–практическая конференция с действующими семинарами «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика»
21–23 сентября	Одесса, Украина	Международная научно-практическая конференция «Новые и нетрадиционные технологии в ресурс- и энергосбережении»
4–7 октября	Краматорск, Донецкая обл., Украина	4-я Международная научно-техническая конференция «Сварка и родственные технологии: перспективы развития»
18–20 октября	Сосновице, Польша	Международная конференция «Технологии XXI века» одновременно с выставкой «Exprowelding-2016»
22–25 ноября	Киев, Украина	XV Международный промышленный форум–2016

ММС100**7–10 June 2016,
Kyiv, Ukraine****www.medovar100.org**

Международный симпозиум к 100-летию со дня рождения Б.И. Медовара

Дата проведения	7–10 июня 2016 г.
Тематика симпозиума	ЭШП и другие процессы специальной электрометаллургии, их научные основы, технологии и оборудование; электрошлаковое литье; сварка высоколегированных и высокопрочных сталей, а также аустенитных сталей и сплавов; теория кристаллизации сталей и сплавов; управление затвердеванием в металлургии и сварке; крупные кузнечные и листовые слитки; моделирование затвердевания в процессах специальной электрометаллургии и сварки; современные стали для магистральных газопроводов, сосудов давления, крупных поковок, роторов, валков; родственные области металлургии, сварки и металловедения.
Место проведения	Киев, Украина, Президент Отель
Организационный комитет	Тел.: +38(044) 287-52-18, +38(044) 337-30-81. Тел./факс: +38(044) 337-30-82 E-mail: org@medovar100.org, info@medovar100.org Дополнительная информация на сайте симпозиума www.medovar100.org

Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»

13–15 июня 2016 г.

Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

Тематика конференции:

- ◆ электронно-лучевая сварка
- ◆ лазерная сварка
- ◆ гибридные процессы сварки
- ◆ сварка трением с перемешиванием
- ◆ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ◆ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ◆ 3D адитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

Контрольные даты

- ◆ Подача заявок для участия и отправка доклада до 15.03.2016
- ◆ Рассылка программы конференции до 15.04.2016
- ◆ Оплата организационного взноса до 14.06.2016

Организационный комитет:

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
03680, г. Киев, ул. Боженко 11, тел./факс: +38(044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com
www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016
www.patonpublishinghouse.com

ПОДПИСКА — 2016

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
240 грн.	480 грн.	1800 руб.	3600 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», «Прессцентр», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
 на сайте: www.patonpublishinghouse.com.

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules
 Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license
 В 2016 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2014 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190x190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200x290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200x290 мм)
- Вклейка А4 (200x290 мм)
- Разворот А3 (400x290 мм)
- 0,5 А4 (185x130 мм)
- 0,25 А4 (90x130 мм)
- Размер журнала после обрезки 200x290 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 (техническая диагностика и неразрушающий контроль)

- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

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

Подписано к печати 9.03.2016. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24
 Печать ООО «Фирма «Эссе».
 03142, г. Киев, просп. Академика Вернадского, 34/1.