

МЕТОД ЭМА-КОНТРОЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ИЗОЛЯЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Ж. НИКИФОРЕНКО, А. БУЛАВИНОВ, В. ЯГЕР, Б. РОКШТРО, М. КРЕНИНГ, К. ЭЙШХОРН, Р. ЗАУЭР

Неразрушающий контроль систем трубопроводов в процессе эксплуатации — актуальная задача, требующая разработки новых методов контроля, ориентированных на текущее состояние объектов. Контроль сварных соединений в этом отношении — область относительно хорошо разработанная и подробно регламентированная. Что касается контроля «тела» трубы, т. е. участков от сварного шва до сварного шва, то в силу их большой протяженности и наличия различных антикоррозионных и изоляционных покрытий возможность их контроля ограничена.

Non-destructive testing of piping in operation is an urgent task, requiring development of new methods of control, oriented to the current condition of the plants. Control of welded joints in this respect is an area, which is relatively well-developed and specified in detail. As regards control of the pipe y, i.e. sections between welds, ability to control them is limited, in view of their large extent and presence of various anticorrosion and insulation coatings.

Введение. Унификация нормативных документов и их непрерывное развитие в соответствии с техническим прогрессом, а также растущее понимание того, что неразрушающий контроль (НК) вносит количественный вклад в надежность и безопасность эксплуатации технических сооружений — реалии сегодняшнего дня.

Современные направления развития систем НК характеризуются тенденцией к применению стратегий технического обслуживания, ориентированных на текущее состояние объектов [1]. Реализация таких стратегий позволяет оптимизировать сроки эксплуатации при сохранении эксплуатационной безопасности промышленных объектов. Разработка и последующее внедрение новых методик контроля является одной из наиболее актуальных задач.

Многообразие задач контроля требует технических решений, оптимизированных на объект и параметры контроля, такие, как материал и гео-

метрия изделия, тип дефекта, производительность контроля и т. п.

В данной работе будет представлен метод ультразвукового (УЗ) контроля, позволяющий за счет использования оригинальных технических решений выявлять коррозионные разрушения в изолированных трубопроводах.

Задача контроля. Коррозионное разрушение трубопроводов снаружи в местах касания с опорами или грунтом, а также вызываемое разъеданием материала изнутри, например, вследствие образования и скопления конденсата — известная проблема. Основная трудность выявления таких разрушений связана не со сложностью задачи как таковой. Для выявления коррозии существует множество методов, в том числе УЗ. Значительно ограничена возможность применения этих методов на практике, когда внешние условия, либо сам объект не приспособлены для проведения контроля (труднодоступность, наличие изоляционных покрытий или загрязнение поверхности, большая

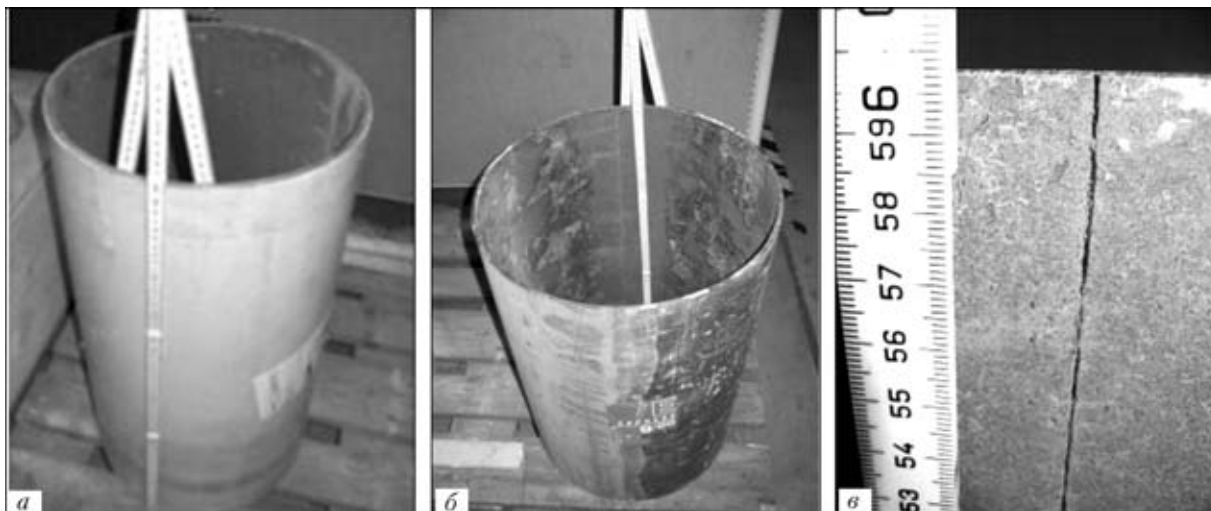


Рис. 1. Тест-образцы: а — отрезок новой трубы с пластиковым покрытием толщиной до 4,5 мм; б — отрезок трубы, бывшей в эксплуатации, со снятым покрытием, толщина стенки 6 мм; в — участок продольного сварного шва, пораженный «ручейковой» коррозией

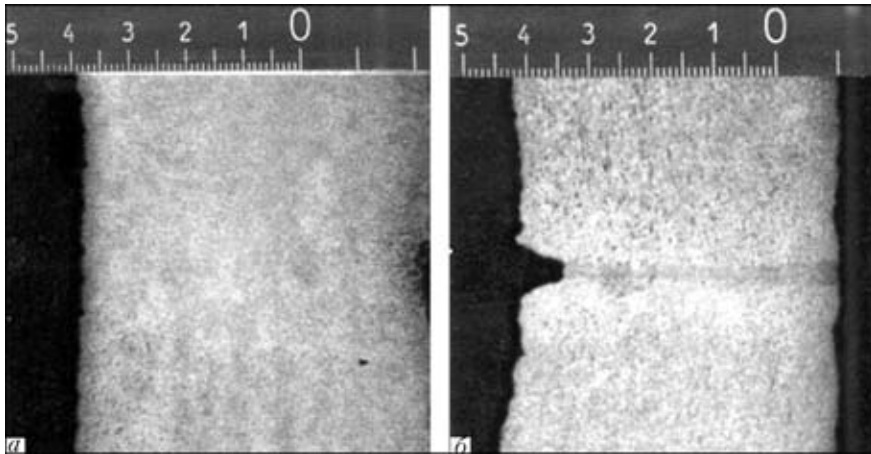


Рис. 2. Металлографическое исследование объекта контроля: а — металлографическое изображение области сварного шва новой трубы; б — металлографическое изображение области сварного шва, поврежденного коррозией

протяженность объекта, а также сложные климатические условия).

Во Фраунгоферовский институт IZFP обратился представитель нефтеперерабатывающего предприятия British Petroleum с просьбой разработать метод, позволяющий выявлять локальные коррозионные разрушения в трубопроводах системы охлаждения.

В качестве тест-образцов были представлены два отрезка трубы (рис. 1), дающие представление о задаче контроля.

По информации заказчика коррозионное разрушение развивается в нижней части трубопровода предположительно в месте продольного сварного шва. Трубы имеют пластиковое покрытие толщиной до 4,5 мм. Контроль должен проводиться с внешней стороны трубы без удаления покрытия.

Результаты металлографического исследования. Первоначально для оценки текстуры металла контролируемого объекта и возможности успешного решения задачи с помощью ультразвука было проведено металлографическое исследование пред-

ставленных образцов (рис. 2). Оно показало, что в обоих образцах отсутствуют валики усиления, материал сварного шва слабо отличается от основного материала, и имеется возможность получения эхосигналов только от участка, поврежденного коррозией.

Решение задачи контроля. В работах [2–5] описывались методики контроля труб и трубопроводов на большие расстояния, в которых применялись фазированные системы многоэлементных ЭМА-преобразователей и соответствующие методы обработки сигналов.

Первые работы, затрагивающие вопросы теории многоэлементных ЭМАП [6], показали принципиальную возможность возбуждения горизонтально-поляризованных волн в пластинах с помощью преобразователей такого типа.

Для проведения контроля волнами в ограниченных средах на расстояниях до нескольких десятков метров в IZFP были созданы низкочастотные многоэлементные ЭМА-преобразователи [2], позволяющие возбуждать моду SS0 на частотах порядка 50...250 кГц. В отличие от других мод, применяемых для решения данного класса задач, мода SS0 характеризуется отсутствием дисперсии. При отражениях от несплошностей материала практически не возникает ложных сигналов вследствие трансформации типов волн, характерных для классических волн Лэмба [8]. Данная мода наименее демпфируется изоляционными покрытиями на поверхности изделия, а также содержимым трубопровода. Еще одним преимуществом, присущим ЭМА-контролю в целом, является его бесконтактность, т. е. возможность в случае необходимости возбуждать и принимать ультразвуковые колебания через воздушный зазор или изолирующий слой.

В работах [2, 5, 9] описывается конструкция многоэлементного ЭМАП (рис. 3) как равномерной линейной фазированной решетки. Напомним здесь основные моменты. Преобразователь состоит из высокочастотной катушки, постоянных магнитов, замыкателя, медного экрана и протектора. На ВЧ-катушку подаются высокочастотные зондирующие импульсы. Они возбуждают электромагнитное поле, которое наводит вихревые токи в контролируемом электропроводном материале. Каждый постоянный магнит является локальным источником магнитного поля в материале контролируемого изделия. Вихревые токи, взаимодействуя с направленными по нормали к поверхности магнитными полями постоянных магнитов, создают локальные источники поперечнополяризованных УЗ SH₀-волн. Последние распространяются в стенке трубы в двух противоположных направлениях, параллельных удлиненным сторонам ВЧ-катушки. При условии, что расстояние между постоянными магнитами равно половине длины волны

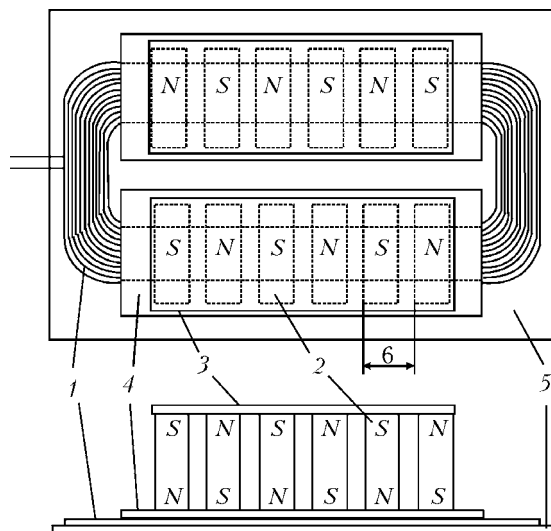


Рис. 3. Конструкция многоэлементного ЭМАП: 1 — ВЧ-катушка; 2 — постоянные магниты; 3 — ферромагнитный замыкатель; 4 — медный экран; 5 — протектор; 6 — расстояние между магнитами, соответствует половине длины волны возбуждаемых УЗ-колебаний

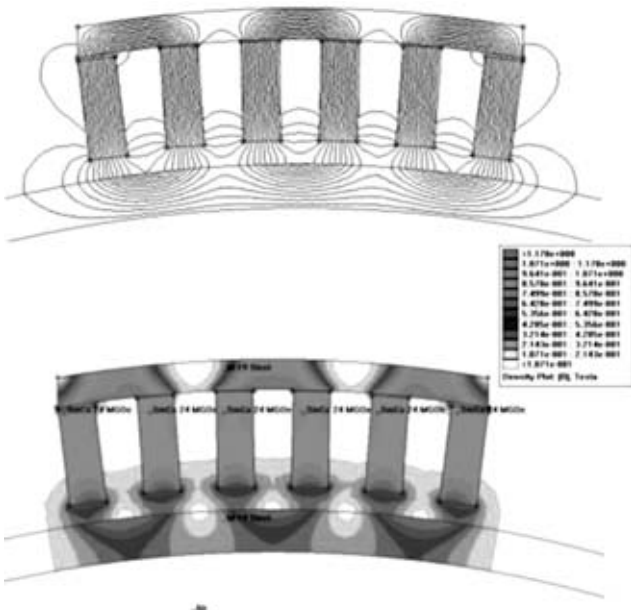


Рис. 4. Моделирование магнитной системы ЭМАП методом конечных элементов

ультразвука, колебания от различных локальных источников, распространяясь, совпадают по фазе. В результате их сложения амплитуда звукового давления результирующей УЗ волны возрастает пропорционально количеству магнитных каскадов. Обратный эффект наблюдается при приеме УЗ колебаний.

При УЗ контроле, в том числе волнами в ограниченных средах, наибольшая чувствительность достигается при нормальном падении на отражающую поверхность несплошности. В предлагаемой задаче контроля известным принимали расположение и ориентацию дефектов. Исходя из этого, выбрана схема прозвучивания по окружности трубы.

Необходимо было разработать специальный преобразователь или систему преобразователей, которые позволяют возбуждать УЗ волны в стенке трубы в окружном направлении и принимать эхосигналы, отраженные от дефекта.

В работе [9] с помощью моделирования методом конечных элементов показано, что оптимальное распределение магнитного поля (максимальное

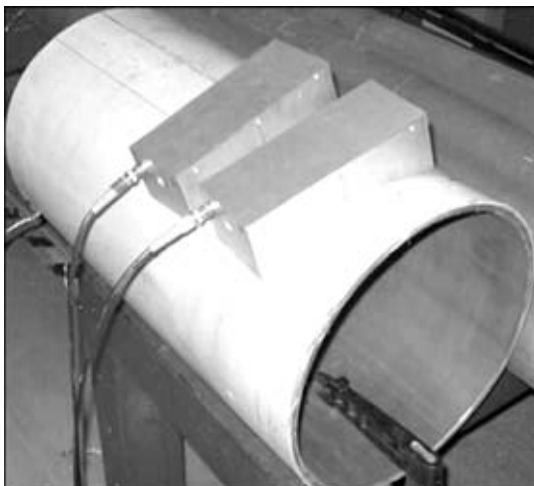


Рис. 5. Система ЭМАП на тест-образце

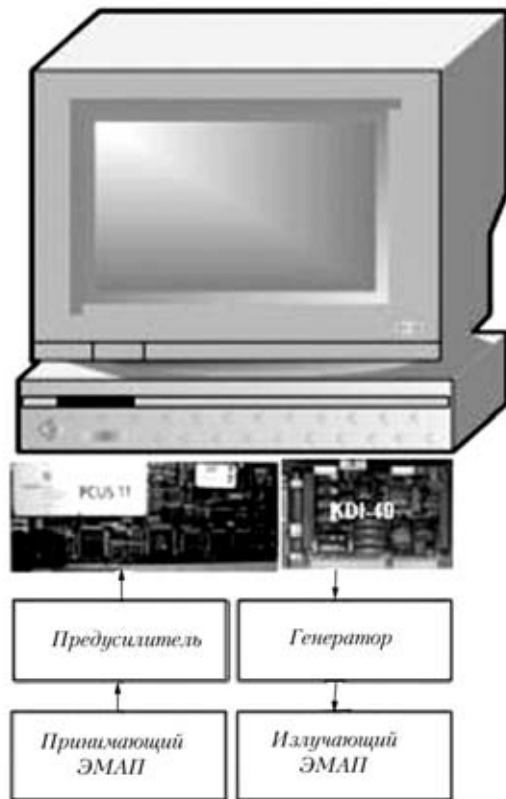


Рис. 6. Блок-схема электроники ЭМА-контроля

значение нормальной составляющей магнитной индукции, ее равномерное распределение на глубине) достигается при следующих условиях:

- 1) количество каскадов постоянных магнитов должно быть четным;
- 2) расстояние между соседними магнитами должно быть больше расстояния между магнитами и контролируемым объектом;
- 3) в магнитной системе должно использоваться ярмо (замыкатель), причем его толщина должна быть соизмерима с толщиной постоянных магнитов.

При соблюдении этих условий достигается минимальное рассеяние магнитного поля в прост-

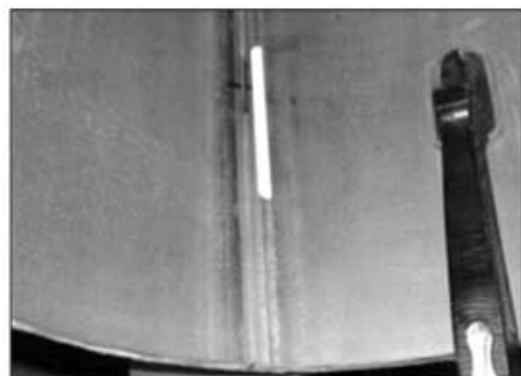
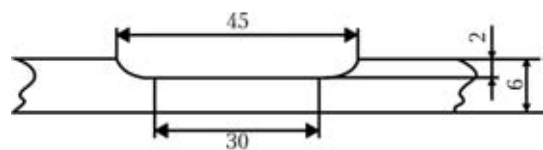


Рис. 7. Искусственный дефект в области сварного шва

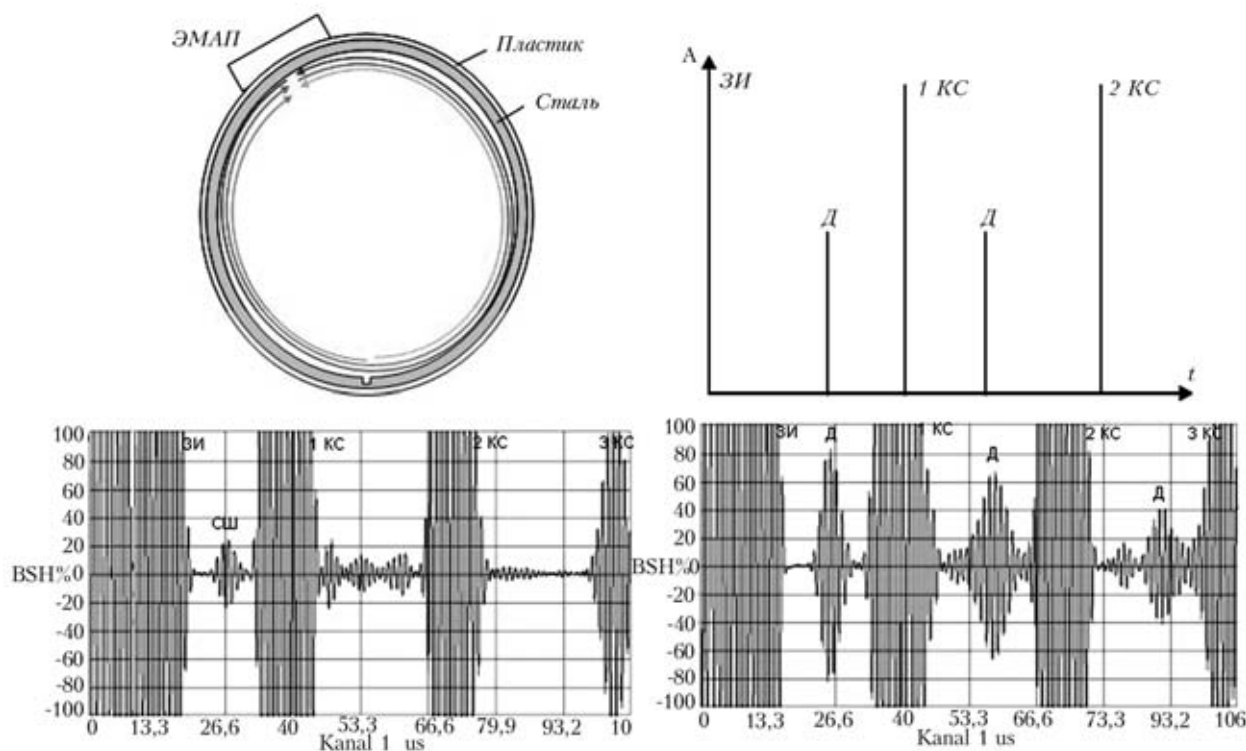


Рис. 8. Схема распространения УЗ-колебаний по окружности трубы с временной диаграммой и А-развертки с эхо-сигналами от сварного шва и от искусственного отражателя (ЗИ — зондирующий импульс; КС — кольцевой сигнал; Д — эхо-сигнал от дефекта; СШ — эхо-сигнал от сварного шва)

ранстве между магнитами (рис. 4), и, как следствие, повышается чувствительность ЭМАП. Только за счет оптимальной конструкции магнитной системы многоэлементного ЭМАП можно получить выигрыш в чувствительности до 50 %.

Кроме того, в работе [9] рассмотрены вопросы оптимизации длительности возбуждающего импульса с точки зрения фазовой накачки УЗ импульса, а также предложена модель расчета диаграммы направленности систем многоэлементных фазированных преобразователей.

С учетом этих результатов для решения предложенной задачи контроля была сконструирована система многоэлементных ЭМАП, оптимизированная под диаметр трубы 400 мм, толщину стенки 6 мм и толщину пластикового покрытия 4,5 мм (рис. 5), состоящая из одного излучающего и одного принимающего ЭМАП.

Для проведения испытаний и последующего контроля на предприятии заказчика была создана система контроля на базе стандартных модулей электроники IZFP (рис. 6). Специализированная интерфейсная карта PCUS11F, применяемая во многих системах контроля IZFP, была переработана для регистрации низкочастотных УЗ сигналов. Карта координатного интерфейса KDI40 использовалась для синхронизации PCUS11F и генератора импульсов тока, возбуждающего излучающий ЭМАП.

Результаты лабораторных испытаний. В представленном образце новой трубы в сварном шве был изготовлен искусственный отражатель в виде продольного пропила длиной 45 мм и глубиной

2 мм, что соответствует 30 % толщины стенки трубы (рис. 7).

Диаграмма направленности многоэлементного ЭМАП двунаправленная [8], т. е. ультразвук распространяется как по часовой, так и против часовой стрелки. Вне зависимости от положения излучающего и принимающего ЭМАП на временной развертке всегда будут кольцевые сигналы, являющиеся результатом сложения волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Во избежание наложения кольцевых сигналов и сигналов от дефектов необходимо располагать систему ЭМАП на окружности трубы таким образом, чтобы предполагаемая дефектная зона располагалась на временной развертке между зондирующим и первым кольцевым сигналом (рис. 8, *вверху*).

На рис. 8, *внизу* представлены А-развертки УЗ сигналов, полученные на тест-образце новой трубы. На бездефектном участке между зондирующим импульсом и первым кольцевым сигналом можно наблюдать небольшой эхо-сигнал от сварного шва. При перемещении системы преобразователей на участок с пропилом, расположенным в нижней части трубы, на А-развертке возникает эхо-сигнал от искусственного дефекта. Соотношение между эхо-сигналом от сварного шва и сигналом от отражателя составляет порядка 12 дБ.

Аналогичные измерения были проведены на образце, бывшем в эксплуатации и имеющим натуральные дефекты (рис. 9).

Для имитации пластикового покрытия между ЭМАП и контролируемым объектом помещался четырехмиллиметровый слой материала, аналогич-

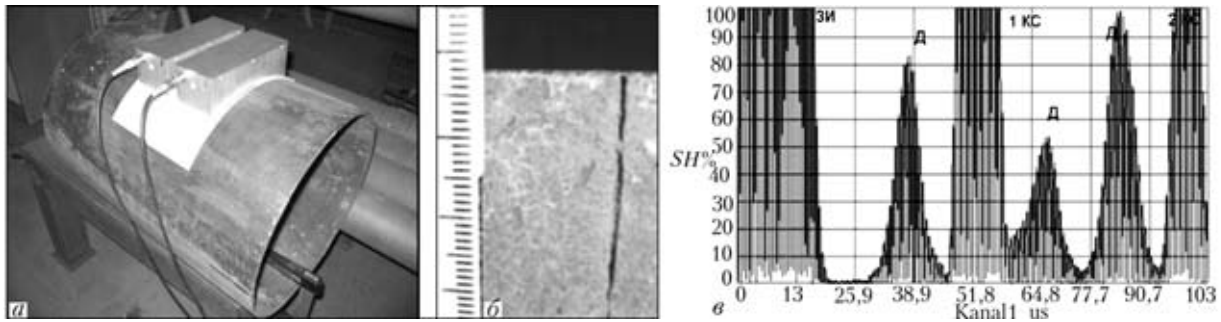


Рис. 9. Испытания на тест-образце с натуральным дефектом: а — ЭМАП на образце с натуральными дефектами; б — участок трубы с продольным дефектом; в — А-развертка с сигналом от дефекта

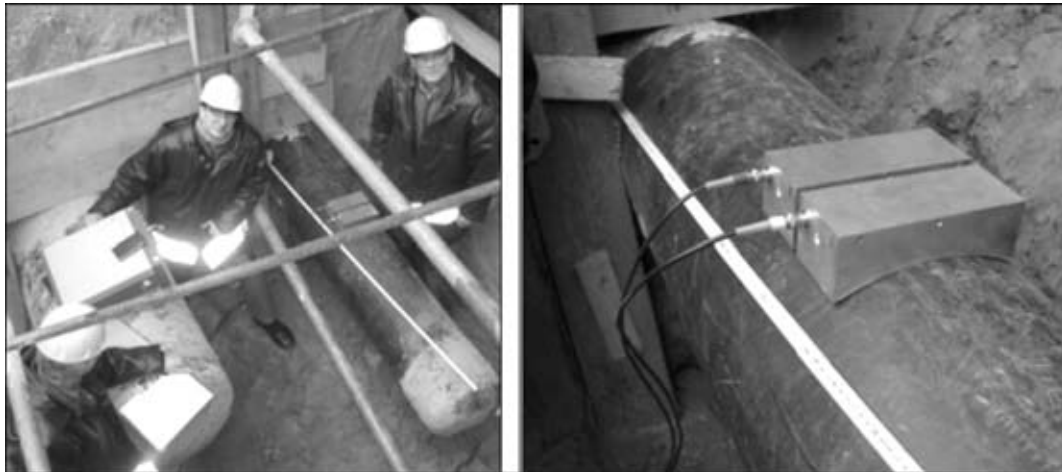


Рис. 10. Испытания на предприятии заказчика

ного по своим электромагнитным свойствам материалу изоляции. На рис. 9, в можно видеть, что эхо-сигнал от дефекта регистрируется с хорошим соотношением сигнал/шум.

Контроль труб на предприятии заказчика.

После успешных испытаний в лабораторных условиях, показавших перспективность метода, заказчиком было предложено провести контроль не-

посредственно на объекте, где предполагалось наличие эксплуатационных дефектов.

Два участка трубопровода диаметром 350 и 400 мм необходимо было проверить с помощью разработанного метода (рис. 10). Система ЭМАП перемещалась линейным сканированием вдоль оси трубы, УЗ сигналы регистрировались с помощью лабораторной системы (рис. 11), расположенной на расстоянии 12 м от контролируемых объектов.

На рис. 12 приведены примеры А-разверток с показаниями, зарегистрированными на контролируемых трубопроводах. На двух отрезках общей длиной около 3 м было зарегистрировано девять условно дефектных участков.

После проведения ЭМА-контроля независимой фирмой была проведена верификация метода. Пластиковое покрытие было удалено с поверхности трубы, и выполнена толщинометрия с реконструкцией полной Т-развертки по всей длине контролируемых участков.

На участках, отмеченных как условно дефектные, были зарегистрированы коррозионные повреждения. Остаточная толщина стенки на участках, поврежденных коррозией, составляла до 30 % от номинального значения.

Таким образом, была доказана пригодность метода ЭМА-контроля для выявления локальных коррозионных разрушений в трубах и трубопроводах с изоляционными покрытиями.

Для проведения контроля трубопроводов различных объектов Фраунгоферовский институт IZFP разрабатывает мобильные системы контроля на базе собственных компонентов электроники и



Рис. 11. Лабораторная система контроля

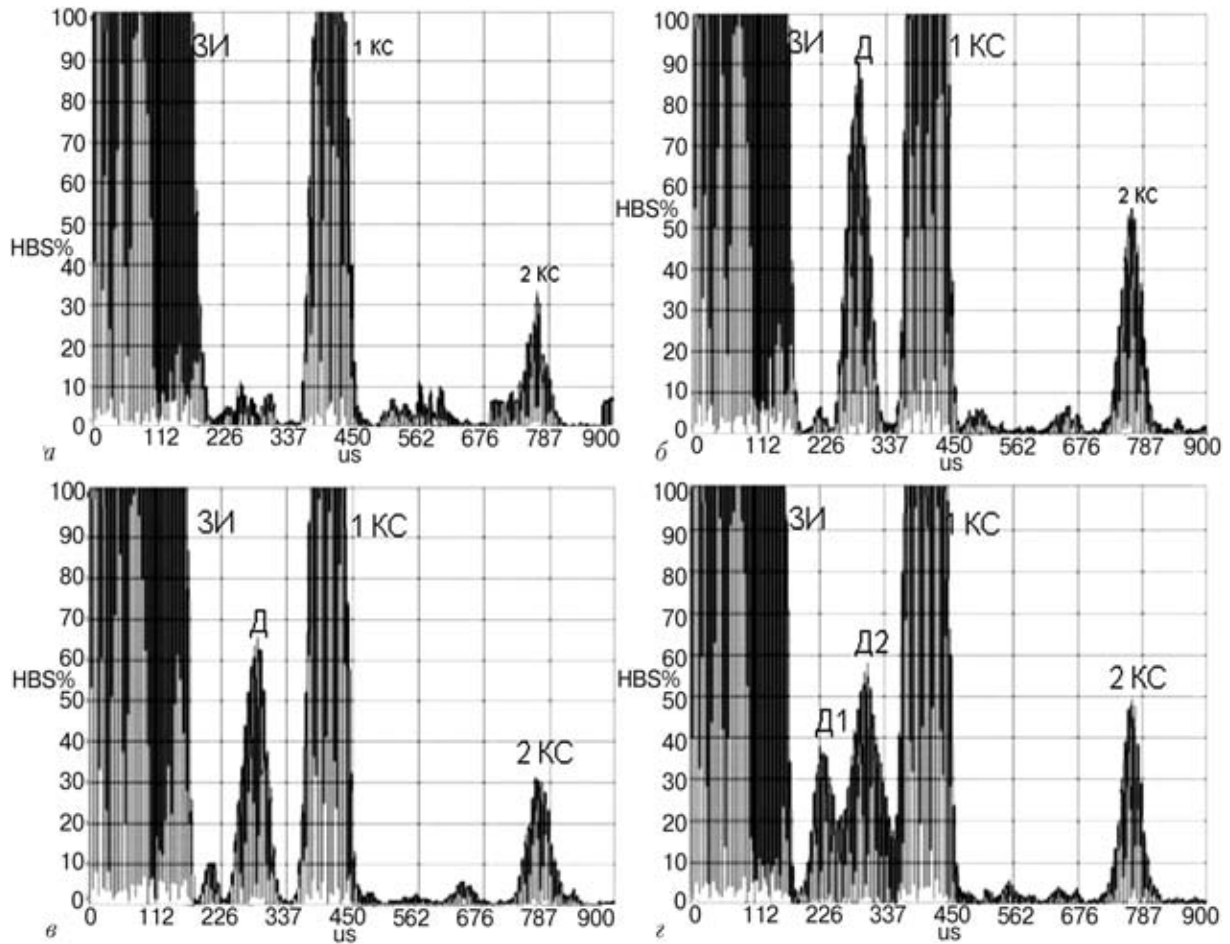


Рис. 12. Примеры А-разверток, зарегистрированных на реальном объекте контроля: а – А-развертка на бездефектном участке; б – А-развертка с показаниями (пример 1); в – А-развертка с показаниями (пример 2); г – А-развертка с показаниями (пример 3)

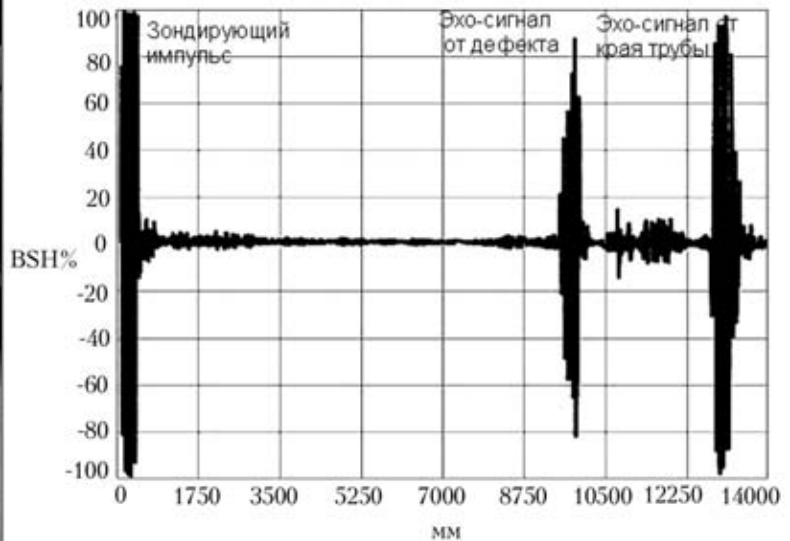


Рис. 13. Контроль труб УЗ волнами в ограниченных средах в продольном направлении. Выявление искусственного дефекта в виде пропила (50 % толщины стенки трубы) на расстоянии 10 м (а)

механики. Кроме контроля трубопроводов в окружном направлении имеются технологии ЭМА-контроля в продольном направлении (рис. 13) на расстояниях до 50 м [2–4].

Выводы

Описывается метод ЭМА-контроля коррозии в промышленных трубопроводах с изоляционными покрытиями. Контроль проводится волнами в ограниченных

средах (мода SS_0) путем прозвучивания по окружности трубы через покрытие толщиной до 5 мм.

В рамках разработки метода были сконструированы специальные многоэлементные ЭМАП, позволяющие возбуждать моду SS_0 на частотах порядка 50...250 кГц.

Приводятся результаты испытаний системы контроля в лабораторных и полевых условиях.

1. Горнев Ю. В., Шведов В. Н. Контроль и диагностика водопроводных трубопроводов. Проблемы, решения и перспективы // Контроль и диагностика. — 1999. — № 2.
2. Nikiforenko G., Boulavinov A., Kroning M., Rockstroh B. Vorrichtung und Verfahren zur Detektion von Materialdiskontinuitaten in einem Prufkorper, Europäische Patentanmeldung Nr. 03020090.1.
3. Никифороенко Ж. Г., Булавинов А. Н., Хюбшен Г., Кронинг М., Рокитро Б. Методы обработки сигналов фазированной системы ЭМА-преобразователей при контроле труб // Неразруш. контроль и диагностика. — 2002.

4. Никифороенко Ж. Г., Булавинов А. Н., Рокитро Б., Кронинг М., Хюбшен Г. Новая концепция ЭМА-контроля газовых труб // Мат. конф. «Промышленный неразрушающий контроль», Москва, Апрель, 2003.
5. Boulavinov A., Kroning M., Nikiforenko G., Smorodinsky J. Phase Controlled EMAT Antenna for the Inspection of Coated Pipes, NDE 2002 National Seminar of ISNT, Chennai, 2002.
6. Никифороенко Ж. Г., Булавинов А. Н., Рокитро Б., Ягер В., Рост П. УЗК литых аустенитных труб с помощью ЭМА-преобразователей // В мире неразруш. контроля. — 2003. — №1(19).
7. Пашутин А. В., Харитонов А. В. Некоторые вопросы теории электромагнитноакустических преобразователей нормальных волн, имеющих периодическию структуру // Известия ЛЭТИ. — 1975. — Вып. 168. — С. 12–19.
8. Cawley P. Practical Long Range Guided Wave Inspection — Applications to Pipes and Rail, NDE 2002 National Seminar of ISNT, Chennai, 2002.
9. Boulavinov A., Kroning M., Nikiforenko G., Rockstroh B., Jager W. Phasengesteuerte Systeme von EMUS-Multisenoren fur die Ultraschallprufung uber grobe Entfernungen, DACHJahrestagung 2004, Salzburg, 17–19 Mai 2004.

Ин-т неразруш. контроля Браунгоферовского об-ва, Саарбрюкен, Германия

Поступила в редакцию 10.03.2004

**V-й научно-технический семинар
«БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПРЕССОРНОГО И НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ»**

11–15 октября 2004 года, г. Одесса, Украина

Организаторы семинара:



Одесский Припортовый завод, г. Южный



ООО «ТРИЗ», г. Сумы



Ассоциация промышленного арматуростроения Украины

Ранее проводимые семинары подтвердили актуальность тематики и дали ощутимые практические результаты.

На семинар приглашаются руководители и представители заводов-производителей оборудования, механических и ремонтных служб предприятий химической промышленности Украины и ближнего зарубежья, а также предприятия и фирмы, имеющие практические результаты повышения надежности компрессорного и насосного оборудования отрасли.

Тематика семинара:

- поиск оптимальных решений обеспечения безопасной эксплуатации оборудования;
- усовершенствование системы технического обслуживания и управления ремонтами;
- выбор надежных поставщиков оборудования;
- содействие внедрению перспективных разработок;
- привлечение к сотрудничеству научных и машиностроительных фирм и предприятий;
- информационная деятельность, совершенствование нормативно-технической документации;
- обмен опытом решения общих проблем, деловое общение.

Для участия в семинаре необходимо перечислить на счет оргкомитета взнос-эквивалент \$200 за первого участника и 100\$ за каждого последующего или внести наличными в кассу при регистрации. Указанная сумма включает в себя расходы на организацию семинара и публикацию докладов.

Информационные спонсоры:

- + журнал «Химическая техника» г. Москва
- + журнал «Компрессорная техника и пневматика» г. Москва
- + журнал «Химическое и нефтегазовое машиностроение» г. Москва
- + журнал «Мир техники и технологий» г. Харьков
- + журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» г. Киев

Оргкомитет семинара

«ТРИЗ» АТД, ул. Машиностроителей, 1, 40020, г. Сумы, Украина

Для корреспонденции: а/я 1421

Тел.: (0542) 349-075, 349-076, Факс: (0542) 212-801, 349-075,

E-mail: triz@triz.sumy.ua