

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

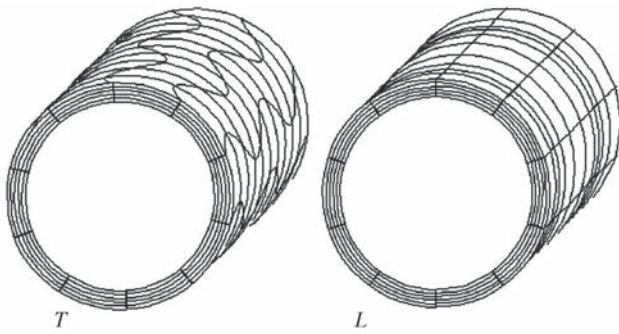


Рис. 2. Схематическое смещение структуры трубы при распространении крутильных (T) и продольных (L) волн

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») розробтаны НЧ УЗК-комплексы «Универсал-1П» (рис. 3) и «Универсал-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.

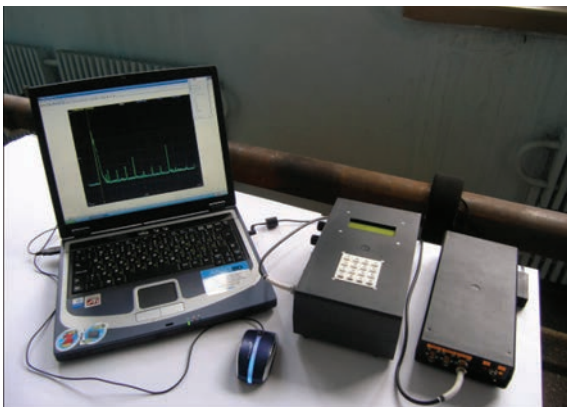


Рис. 3. Диагностический НЧ УЗК комплекс «Универсал-1П» (36 кГц) в процессе диагностирования трубы \varnothing 114 мм

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

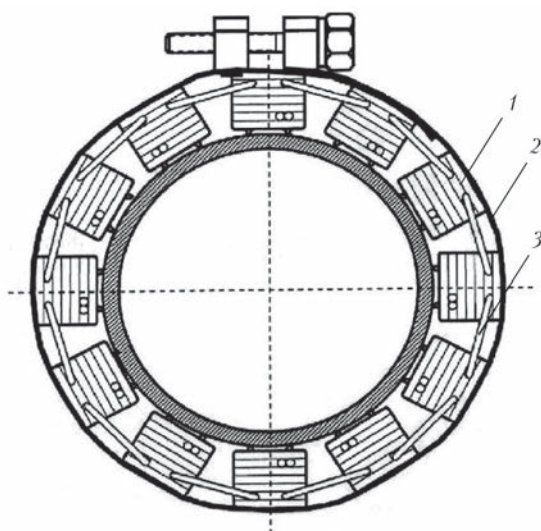


Рис. 5. Схема конструкции антенны: 1 – блок преобразователей; 2 – стягивающий хомут; 3 – скоба

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

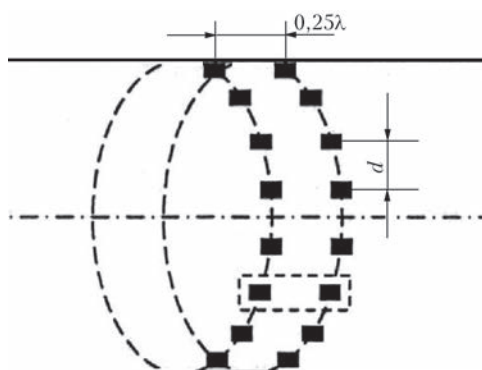


Рис. 6. Схема расположения пьезопреобразователей на трубе и параметры антенной решетки

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

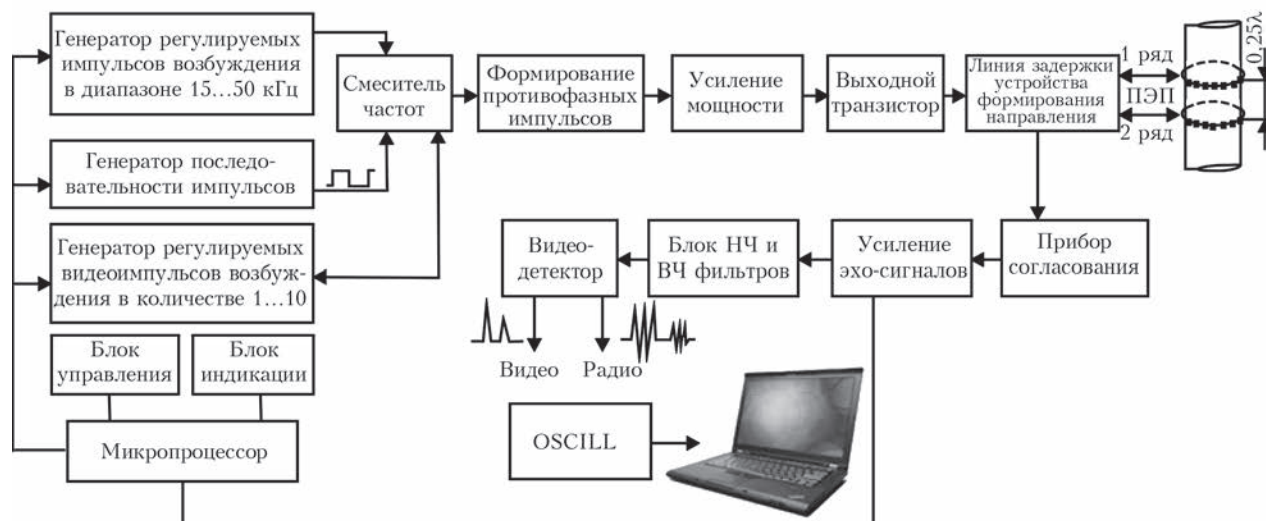


Рис. 7. Функциональная схема комплексов «Универсал-1П» и «Универсал-2П»



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

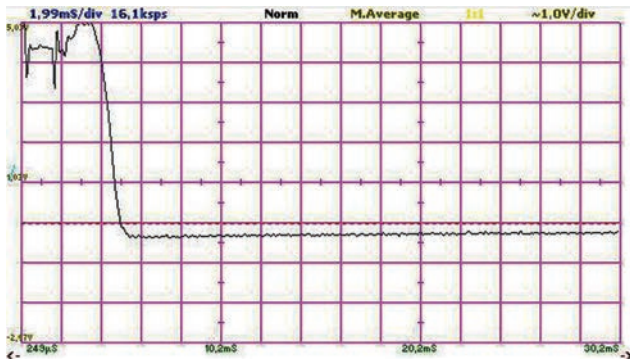


Рис. 9. Эхограмма поврежденного трубопровода длиной 5,2 м

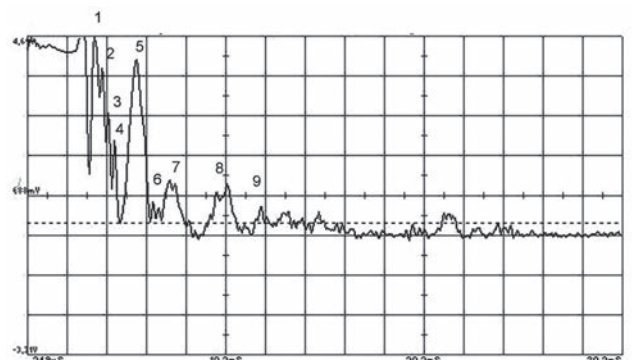


Рис. 11. Эхограмма аварийного участка трубопровода (обозн. см. в тексте)



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*